

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
робота на правах рукопису

МАКСИМОВ ОЛЕКСІЙ МАКСИМОВИЧ

УДК 681.5;358.1

ДИСЕРТАЦІЯ

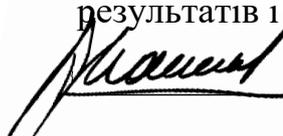
**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ АРТИЛЕРІЙСЬКИХ СИСТЕМ В УМОВАХ
ДИНАМІЧНИХ ЗБУРЕНЬ ЗА РАХУНОК УДОСКОНАЛЕННЯ
ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АСК**

Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Галузь знань 15 – Автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 О.М. Максимов

Науковий керівник Брунеткін О.І. доктор технічних наук, професор

Одеса – 2025

АНОТАЦІЯ

Максимов О. М. Підвищення надійності артилерійських систем в умовах динамічних збурень за рахунок удосконалення інформаційного забезпечення АСК. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. – Національний університет «Одеська політехніка» МОН України, Одеса, 2025.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню надійності артилерійських систем за умов динамічних збурень шляхом розробки та вдосконалення математичного та інформаційного забезпечення автоматизованих систем управління засобом імітаційного моделювання процесів зношення, діагностики та ефективності функціонування артилерійських стволів на основі об'єктно-орієнтованих методів. З цією метою розроблено алгоритмічне та інформаційне забезпечення для підтримки заданого рівня надійності АСК під час виконання бойових завдань артилерійськими підрозділами в умовах динамічних змін бойової ситуації на основі Марківських моделей та симуляційних методів для адаптації управління за обставин невизначеності. Створено методи моніторингу станів стволів артилерійських гармат, які засновані на обробці акустичних сигналів та візуалізації розширення порохових газів, що виникають під час пострілу, в навколишньому середовищі.

У першому розділі «Аналіз поточного стану ефективності керування артилерійськими системами за умов динамічних збурень» одержано такі результати:

– Визначено ключові фактори, які впливають на надійність і ефективність артилерійських систем за умов динамічних збурень. Аналіз процесів показав, що навіть відносно невелике переміщення цілі без урахування її динаміки зумовлює

промах з відхиленням точки влучання, що значно перевищує радіус ураження цілі.

– Показано, що випадкові варіації балістичних параметрів пострілу можуть нівелювати зусилля з точного наведення без вимірювання фактичної швидкості кожного пострілу та введення поправок навіть по нерухомій цілі не гарантує влучання з першого пострілу. Для виконання цього завдання сучасні гармати оснащують датчиками дульної швидкості або системами контролю траєкторії пострілу, дані з яких надходять до системи управління вогнем і дозволяють автоматично скоригувати наведення перед наступним пострілом.

– Комплексний аналіз сучасних алгоритмів управління показав, що жоден не забезпечує оптимального поєднання адаптивності, ефективності та надійності. Прогностичні МРС-системи відзначаються високою точністю та гнучкістю, але потребують значних обчислювальних ресурсів і особливо чутливі до цілісності математичних моделей. Робастні регулятори гарантують стійкість до збурень, проте складні в реалізації. Інтелектуальні контролери нечіткої логіки чи нейронних мереж здатні пристосовуватися до нелінійностей, однак вимагають великих навчальних вибірок і не гарантують стабільності. Це ускладнює їх пряме застосування за умов реального бою, що зумовлює потребу в якісно новому комплексному рішенні.

– Обґрунтовано необхідність удосконалення імітаційних моделей зношення стволів з урахуванням акустичних та оптичних проявів пострілу, розробки нових адаптивних алгоритмів управління стрільбою на основі Марківських процесів та важливість створення методів оперативного моніторингу стану гармат за сигналами пострілу з метою верифікації результатів стрільби в реальному часі.

У другому розділі «Інформаційне моделювання зносу артилерійських стволів» удосконалено імітаційні моделі зношення артилерійських стволів і зарядних камор, які враховують акустичні та візуальні поля, з метою забезпечення

діагностики їх стану за миттєвою швидкістю снаряда, який виходить з каналу ствола, і об'єму порохових газів, що утворюються під час пострілу.

– Запропоновано імітаційну та інформаційну моделі внутрішньої балістики пострілу з поступовим зношенням каналу ствола, які вперше враховують генерацію акустичних та оптичних полів, що супроводжують постріл, для діагностики технічного стану гармати. Проведено розрахункові експерименти, які дозволили дослідити вплив ключових факторів (тиск порохових газів, температура, властивості заряду, ступінь зношеності ствола) на параметри пострілу та його наслідки для ресурсу гармати. На основі синтезованих сигналів виділено інформативні ознаки акустичного поля, зокрема амплітуда і тривалість балістичної та дульної хвиль та спектральні характеристики, які чутливі до ступеня зношеності ствола.

– Показано, що за інформативними ознаками акустичних і оптичних полів пострілу можна автоматично класифікувати технічний стан ствола гармати. Водночас використання методу опорних векторів дозволило досягти можливості розпізнавання стану «справний або зношений». Для забезпечення цілісності аналізу вперше запропоновано новий тип інформаційної одиниці, що об'єднує синхронізовані параметри акустичного та оптичного спостережень. Така інформаційна одиниця реалізована як абстрактний базовий клас, що дозволяє уніфіковано інкапсулювати різноманітні дані, узгоджувати часові характеристики пострілу, спрощувати інтерфейси обробки в системі управління та підвищувати узагальнену точність оцінювання технічного стану.

– Одержані результати підтверджують доцільність використання об'єднаних акустичних та оптичних параметрів у форматі єдиної інформаційної одиниці для оперативної діагностики зношеності, а визначення початкової швидкості та яскравості дульного спалаху дає змогу розраховувати рівень деградації ствола в режимі реального часу. Імітаційне моделювання сприяло додатковому дослідженню впливу варіативності характеристик боєприпасів.

Встановлено, що порохові заряди зі значним терміном зберігання зумовлюють прискорення ерозійної зношеності. Удосконалені імітаційні моделі з використанням нових інформаційних одиниць формують базу для інтегрованої системи моніторингу за допомогою програмного забезпечення, здатного виявляти критичну зношеність безперервно, без виведення гармати з бойової експлуатації.

У третьому розділі «Алгоритмічне та інформаційне забезпечення адаптивного управління артилерійськими системами» розглянуто зміну бойової ситуації на основі Марківських моделей та симуляційних методів для адаптації автоматизованих систем управління за умов невизначеності на базі об'єктно-орієнтованих методів та одержано такі результати:

– Запропоновано поєднання стохастичної моделі станів бойової роботи з подієво-орієнтованою симуляційною моделлю дій підрозділу, що дозволяє приймати рішення на основі прогнозу ймовірнісних траєкторій польоту снаряда. Такий підхід базується на об'єктно-орієнтованому представленні артилерійської батареї, в якій керовані об'єкти поєднують як властивості (ресурс, точність, боєздатність), так і динамічні стани (переміщення, вогонь, вихід з ладу, реакція на загрозу).

– Розроблено ключовий метод взаємодії між симуляційною підсистемою та ядром управління через запропоновану інформаційну одиницю. Усі сенсорні дані про стан гармати після пострілу (акустичні та оптичні) комплектуються в окремі структури. Ці об'єкти формують потік спостережень, де на основі характеристик хвиль (Δt , спектр, спалах, яскравість, площа полум'я тощо) виконується оцінювання технічного стану гармати. Далі оновлений стан агрегується і передається до Марківської моделі, яка використовує цю інформацію для коригування ймовірностей переходів між станами та перегляду стратегій.

– Визначено метод, який зумовлює оновлення Марківського контролю станів, що забезпечує зворотний зв'язок між поточними властивостями артилерійського озброєння і прогнозами в інформаційній моделі. Якщо

класифікатор ідентифікує початкові ознаки критичного зношення, то ймовірність успішного ураження зменшується, що спричиняє зміну стратегії: гармата тимчасово вилучається із залпу або ідентифікується як менш затребувана в розподілі пострілів. Це забезпечує реалізацію адаптивного управління, де Марківські стани не є фіксованими, а динамічно уточнюються на основі симуляційних спостережень, що принципово відрізняє даний підхід від класичних схем зазначених моделей.

– Проведено імітаційне моделювання бойової роботи, яке підтвердило ефективність запропонованої інтеграції. У сценаріях з динамічними загрозами та невизначеністю (наприклад, контрбатареїним вогнем або частковою відмовою обладнання) адаптивна система зберігала до 85 % боєздатності, тоді як традиційна втрачала її майже повністю. Запропоновані інформаційні одиниці забезпечили єдину узгоджену точку доступу до поточних параметрів пострілу, що спростило інтерфейс між підсистемами та зменшило тривалість аналізу. Таким чином, розроблена автоматизована система управління дозволила вперше реалізувати зворотний цикл «постріл – моніторинг – оновлення стану – нове рішення» в артилерійській підсистемі управління на основі інтеграції Марківських процесів з симуляційною моделлю, підтримуваною інформаційними одиницями. Це забезпечило підвищення точності, адаптивності та ефективності вогневих рішень за умов динамічних збурень, що й зумовило досягнення поставленої мети дисертаційного дослідження.

У четвертому розділі «Методи моніторингу та адаптивного управління бойовою роботою артилерійських установок» переслідувалась мета забезпечення оперативної верифікації процесу стрільби й підтримки заданого рівня надійності артилерійського озброєння за умов динамічних збурень, що забезпечило такі результати:

– Розроблено узагальнену структуру інформаційно-аналітичної підсистеми моніторингу стану гармат і адаптивного управління вогнем, реалізовану за

принципом безперервного збору даних та автоматизованого циклу «сенсори–аналіз–управління». Підсистема включає акустичні й оптичні сенсори, модулі оцифрування й попередньої обробки сигналів, оснащена автоматизованою системою управління і балістичним обчислювачем польоту снаряда та визначає координати його зіткнення з поверхнею. Структура побудована на засадах об'єктно-орієнтованого проєктування, що забезпечує модульність і сумісність із наявними системами управління.

– Проведено імітаційний експеримент, який засвідчив високу ефективність інтегрованої системи. Імовірність ураження цілі першим пострілом зросла до 78%. Середня витрата боєприпасів на одну ціль зменшилась з 6,1 до 3,8 пострілу, а середній час ураження цілі скоротився з 130 с до 85 с. Узагальнений показник ефективності стрільби (комплексно враховує точність, швидкість і надійність) підвищився на 60% порівняно з традиційним варіантом. Адаптивний розподіл навантаження оптимізує вияв зношеності матеріальної частини. Найбільш зношена гармата виводиться із залпу, а основне навантаження переноситься на ефективні справні установки.

– Проведено імітаційні стрільби, під час яких було зафіксовано зменшення дульної швидкості на одному зі стволів та були внесені відповідні поправки, у результаті чого середнє вертикальне відхилення точок влучання визначених координат зменшилось приблизно на 30% у порівнянні зі стрільбою без корекції. Вказані кількісні результати свідчать про радикальне підвищення ефективності артилерійських операцій завдяки впровадженню адаптивного управління. Система забезпечує високу ймовірність ураження цілі вже першим пострілом і значно скорочує загальний час виконання вогневого завдання. Інтегрована підсистема моніторингу й управління успішно пройшла експериментальну перевірку та продемонструвала значне підвищення точності й ефективності артилерійського вогню у порівнянні з традиційними підходами.

Отже, отримані в зазначених розділах наукові результати забезпечили в цілому досягнення поставленої мети дисертаційного дослідження.

Ключові слова: автоматизована система управління, об'єктно-орієнтовані методи, політ снаряда, інформаційна модель, моніторинг, математична модель, визначення координат, надійність, артилерійські операції та озброєння, підтримка прийняття рішень, ланцюги Маркова, імітаційне моделювання, програмне забезпечення, збурення, симуляційні методи.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні результати дисертації:

1. Dobrynin Y., Brunetkin O., Maksymov M., & **Maksymov O.** Constructing a method for solving the Riccati equations to describe objects parameters in an analytical form. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Том 3, №4 (105). P. 20–26. (Scopus) <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.205107>

2. Brunetkin O., Beglov K., Brunetkin V., **Maksymov O.**, Maksymova O., Havaliukh O., & Demydenko V. Construction of a method for representing an approximation model of an object as a set of linear differential models. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol 6, №2(108). P. 66–73. (Scopus) <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.220326>

3. Brunetkin O. Maksymov M. Brunetkin V. **Maksymov O.** Dobrynin Y. Kuzmenko V. Gultsov P. Development of the model and the method for determining the influence of the temperature of gunpowder gases in the gun barrel for explaining visualize of free carbon at shot. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Том 4, № 1(112). P. 41–53. (Scopus), <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239150>

4. Dobrynin Ye.V., Boltenev V.O., Kuzmenko V.V., **Maksymov O.M.** Development of a universal binary classifier of the state of artillery barrels by the

physical fields of shots. *Applied Aspects of Information Technology*. 2022. Vol.5 №4. P. 289–302. <https://doi.org/10.15276/aait.05.2022.19> (категорія Б)

5. Maksymov M. V., Boltenkov V. O., Gultsov P. S., **Maksymov O. M.** “Verification of artillery fire under the influence of random disturbances for the computer game ARMA 3”. *Applied Aspects of Information Technology*. 2023. Vol.6 No.4: P. 362–375. <https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.24>(категорія Б)

6. Maksymova O.B., Boltenkov V.O., Maksymov M. V., Gultsov P.S. **Maksymov O.M.** Development and Optimization of Simulation Models and Methods for Controlling Virtual Artillery Units in Game Scenarios. *Herald of Advanced Information Technology*. 2023. Vol.6. No.4. p. 320–337. DOI: <https://doi.org/10.15276/hait.06.2023.21>. (категорія Б)

7. Maksymova O., Boltyonkov V., Gultsov P., **Maksymov O.** Improvement of the model and method of artillery installation target damage control with minimal combat capability loss. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*. Issue 2(68). Dec. 2023. P. 98–115. DOI: <https://doi.org/10.15276/opu.2.68.2023.1>(категорія Б)

8. Максимов М.В., Гульцов П.С., Болтъонков В.О., & Максимов О.М. Метод верифікації артилерійського вистрілу під час впливу випадкових збурень. *Морська безпека*. 2024, №1. С. 36-49. <https://doi.org/10.32782/msd/2024.1/05> (категорія Б)

9. **Maksymov O.**, Toshev O., Demydenko V., & Maksymov M. Simulation modeling of artillery operations in computer games: approach based on Markov processes. *Technology Audit and Production Reserves*. 2024. №5/2(79). P. 23-28. <https://journals.uran.ua/tarp/article/view/312873> (категорія Б)

10. Спосіб визначення зношення дула і зарядної камери артилерійської гармати: пат. України на винахід № 126356; заявл. 13.08.2020; опубл. 21.09.2022, Бюл. № 38. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1706588>

11. Спосіб визначення координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею: пат. України на винахід № 127193; заявл. 20.11.20 ; опубл. 31.05.2023. Бюл. №22. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1739129>

12. Спосіб визначення енергетичної ефективності артилерійської гармати: пат. України на винахід. № 128164; заявл. 05.04.21; опубл. 24.04.24, Бюл. № 17. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1796619>

13. Спосіб визначення кількості послідовного пуску ракет пусковою установкою для знищення морської цілі: пат. України на на корисну модель № 155594; заявл. 02.10.2023; опубл. 13.03.2024. Бюл. №11. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1788150>

Опубліковані праці апробаційного характеру:

14. Tarakhtiy O. S., Gultsov P. S., **Maksimov O. M.** Modeling the formation of muzzle blast as a diagnostic sign of the state of the shot. *Science and society: modern trends in a changing world*: Proceedings of the 2nd International scientific and practical conference. MDPC Publishing. Vienna, Austria. 2024. P. 21-27. <https://sci-conf.com.ua/ii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-science-and-society-modern-trends-in-a-changing-world-22-24-01-2024-viden-avstriya-arhiv>

15. Тарахтій О. С., Гульцов П. С., **Максимов О. М.** Удосконалення моделі управління бойовою здатністю артилерійської гармати. *Topical aspects of modern scientific research*: proceedings of the 5th International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. 2024. P. 256-261. URL: <https://sci-conf.com.ua/v-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-topical-aspects-of-modern-scientific-research-25-27-01-2024-tokio-yaponiya-arhiv>

16. Тарахтій О.С., Гульцов П. С., **Максимов О. М.** Удосконалення методу управління бойовою здатністю артилерійської гармати. *European congress of scientific achievements*: proceedings of the 1st International scientific and practical conference. Barca Academy Publishing. Barcelona, Spain. 2024. P. 120-125. <https://sci->

[conf.com.ua/i-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-european-congress-of-scientific-achievements-29-31-01-2024-barselona-ispaniya-arhiv](https://sci-conf.com.ua/i-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-european-congress-of-scientific-achievements-29-31-01-2024-barselona-ispaniya-arhiv)

17. Тарахтій О. С., Гульцов П. С., **Максимов О. М.** Метод параболічної апроксимації визначення координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею. *Modern problems of science, education and society: proceedings of the 12th International scientific and practical conference*. SPC “Sci-conf.com.ua”. Kyiv, Ukraine. 2024. P. 21-27. <https://sci-conf.com.ua/xii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-modern-problems-of-science-education-and-society-5-7-02-2024-kiyiv-ukrayina-arhiv>

ABSTRACT

Maksymov O. M. Enhancing the reliability of artillery systems under dynamic disturbances by improving information support of automated control systems. – Qualification scientific work, manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 151 – Automation and Computer-Integrated Technologies. – National University «Odesa Polytechnic» of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2025.

The dissertation is devoted to enhancing the reliability of artillery systems under dynamic disturbances by developing and improving mathematical and informational support for automated control systems through simulation modeling of wear processes, diagnostics, and performance efficiency of artillery barrels based on object-oriented methods. For this purpose, algorithmic and informational support has been developed to maintain a specified reliability level of automated control systems during combat operations by artillery units in dynamically changing combat scenarios using Markov models and simulation methods for adaptive control under uncertainty conditions. Methods for monitoring the condition of artillery barrels based on acoustic signal

processing and visualization of the expansion of propellant gases in the surrounding environment arising during firing have been developed.

The following results have been obtained in Chapter 1, «Analysis of the current state of artillery systems control effectiveness under dynamic disturbances.»

- Key factors influencing the reliability and effectiveness of artillery systems under dynamic disturbances have been identified. Analysis of the processes demonstrated that even relatively minor movements of a target, if not accounted for, cause a miss with a deviation significantly exceeding the effective target radius.

- It has been shown that random variations in ballistic parameters of the shot can negate precision aiming efforts. Without measuring the actual muzzle velocity for each shot and adjusting accordingly, even stationary targets cannot be guaranteed to be hit with the first shot. Modern artillery systems address this issue by incorporating muzzle velocity sensors or projectile trajectory monitoring systems, whose data feeds into the fire control system, enabling automatic adjustments in aiming before the subsequent shot.

- Comprehensive analysis of modern control algorithms showed that none provide an optimal combination of adaptability, responsiveness, and reliability. Predictive MPC systems offer high accuracy and flexibility but require considerable computational resources and depend heavily on precise mathematical models. Robust controllers ensure disturbance stability but are complex to implement. Intelligent controllers based on fuzzy logic or neural networks can adapt to nonlinearities but require extensive training datasets and do not guarantee stability. This complicates their direct application under real combat conditions and further substantiates the need for a fundamentally new comprehensive solution.

- The necessity has been substantiated for: improving simulation models of barrel wear, considering acoustic and optical effects of firing; developing new adaptive fire-control algorithms based on Markov processes; creating methods for real-time monitoring of gun conditions using firing signals to verify shooting results promptly.

In Chapter 2, «Information modeling of artillery barrel wear», improved simulation models of artillery barrel and chamber wear have been developed, incorporating acoustic and visual fields generated during firing to enable diagnostics based on the instantaneous projectile velocity exiting the barrel channel and the volume of propellant gases produced during firing.

– Simulation and informational models of the internal ballistics of a shot with progressive barrel wear have been proposed, which, for the first time, consider the generation of acoustic and optical fields accompanying the shot for artillery technical condition diagnostics. Computational experiments have been conducted, allowing investigation into how key factors—such as propellant gas pressure, temperature, charge properties, and barrel wear level—influence shot parameters and barrel life expectancy. Based on synthesized signals, informative features of the acoustic field, including amplitudes and durations of ballistic and muzzle waves, as well as spectral characteristics sensitive to barrel wear levels, have been identified.

– It has been demonstrated that the informative features of acoustic and optical fields during firing allow automatic classification of the gun barrel's technical condition. Specifically, the use of the support vector method has enabled recognition of the barrel condition as either «serviceable» or «worn» with high probability. To ensure analytical coherence, a novel type of informational unit integrating synchronized acoustic and optical observation parameters has been introduced for the first time. This informational unit is implemented as an abstract base class, enabling unified encapsulation of heterogeneous data, synchronization of shot timing characteristics, simplified interfaces for processing within the control system, and improved generalized accuracy of the technical condition assessment.

– The obtained results confirm the practicality of utilizing combined acoustic and optical parameters within a unified informational unit format for the real-time diagnostics of wear. Determining the muzzle velocity and the brightness of muzzle flash enables calculation of barrel degradation levels in real time. Simulation modeling has

allowed additional research into the impact of ammunition characteristic variability, establishing that propellant charges with extended storage durations accelerate erosive wear. Improved simulation models employing informational units form the foundation for an integrated monitoring system utilizing software capable of continuously detecting critical wear without withdrawing artillery from combat positions.

In Chapter 3, «Algorithmic and informational support of adaptive artillery systems control», changes in combat scenarios are examined using Markov models and simulation methods to adapt automated control systems to uncertainty conditions based on object-oriented methods, yielding the following results.

- A combination of a stochastic combat operation state model and an event-driven simulation model of artillery unit actions has been proposed, allowing decision-making based on predicted probabilistic projectile trajectories. This approach relies on an object-oriented representation of the artillery battery, wherein managed objects integrate both properties (resource availability, accuracy, combat readiness) and dynamic states (movement, firing, malfunction, threat response).

- A key method of interaction between the simulation subsystem and the control core was developed, based on informational units. All sensor data regarding the gun's condition after firing (acoustic and optical) are encapsulated into structured objects. These objects form an observation flow, where the gun's technical state is evaluated based on wave characteristics (such as spectrum, flash intensity, brightness, flame area, etc.). Subsequently, the updated state is aggregated and passed to the Markov model, which utilizes this information to adjust state transition probabilities and recalculate strategies.

- A method was developed that facilitates the updating of Markov state estimations, providing feedback between the real properties of artillery systems and predictions made by the informational model. If the classifier identifies initial signs of critical wear, the probability of successful target engagement is reduced, modifying the artillery strategy: the gun may be temporarily excluded from a salvo or allocated reduced

propellant charges during the battery's salvo distribution. This approach enables adaptive control, where Markov states are not fixed but dynamically refined based on simulation observations, fundamentally differentiating it from classical fixed mathematical model approaches.

– Simulation modeling of combat operations confirmed the effectiveness of the proposed integration. In scenarios featuring dynamic threats and uncertainties (such as counter-battery fire or partial equipment failure), the adaptive system maintained up to 85% combat readiness, whereas traditional systems lost readiness almost completely. The informational units provided a unified, coherent access point to current firing parameters, simplifying subsystem interfaces and increasing analysis performance. Thus, the developed automated control system enabled, for the first time, a closed-loop cycle "firing – monitoring – state updating – new decision" in artillery control subsystems by integrating Markov processes with simulation models powered by software-fed informational units. This improved accuracy, adaptability, survivability, and decision-making effectiveness in dynamic combat disturbances, achieving the goal of this dissertation research.

In Chapter 4, «Methods for monitoring and adaptive control of artillery combat operations», the following results have been obtained to provide real-time verification of the firing process, ensuring a specified reliability level of artillery armament under dynamic disturbances.

– A generalized structure of an information-analytical subsystem for gun condition monitoring and adaptive fire control was developed, implementing principles of continuous data collection and an automated "sensor–analysis–control" cycle. The subsystem includes acoustic and optical sensors, digitization and preliminary signal processing modules, an automated control system, and a ballistic computer for projectile trajectory calculation and determination of the impact coordinates. The architecture is based on object-oriented design principles, ensuring modularity and compatibility with existing control systems.

– A simulation experiment confirmed the high efficiency of the integrated system. The probability of hitting the target with the first shot increased to 78%. The average ammunition consumption per target decreased from 6.1 to 3.8 shots, and the average time to engage a target was reduced from 130 s to 85 s. The generalized shooting effectiveness indicator (comprehensively accounting for accuracy, speed, and reliability) increased by 60% compared to traditional methods. Adaptive load distribution optimizes equipment wear, with the most worn artillery pieces excluded from the salvo, transferring the main load to more effective artillery units.

– Simulation firings were conducted, during which a reduction in muzzle velocity was detected on one of the barrels, prompting the application of an appropriate control action. As a result, the average vertical deviation of impact points from the designated coordinates decreased by approximately 30% compared to firing without corrections. These quantitative results demonstrate a significant enhancement in artillery operation efficiency due to the implementation of adaptive control. The system ensures a high probability of first-shot target engagement and significantly reduces the overall time required to complete firing missions. The integrated monitoring and control subsystem has successfully passed experimental verification, demonstrating notable improvements in accuracy and responsiveness of artillery fire compared to traditional methods.

– Thus, the scientific results obtained in the chapters collectively enabled the achievement of the dissertation's stated goal.

Keywords: automated control system, object-oriented methods, projectile flight, informational model, monitoring, mathematical model, coordinate determination, reliability, artillery operations and armament, decision support, Markov chains, simulation modeling, software, disturbances, simulation methods

LIST OF PUBLICATIONS BY THE APPLICANT

Scientific works publishing the main dissertation results:

1. Dobrynin Y., Brunetkin O., Maksymov M., & **Maksymov O.** Constructing a method for solving the Riccati equations to describe objects parameters in an analytical form. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol 3 №4 (105). P. 20–26. (Scopus) <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.205107>
2. Brunetkin O., Beglov K., Brunetkin V., **Maksymov O.**, Maksymova O., Havaliukh O., & Demydenko V. Construction of a method for representing an approximation model of an object as a set of linear differential models. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol 6 №2(108). P. 66–73. (Scopus) <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.220326>
3. Brunetkin O. Maksymov M. Brunetkin V. **Maksymov O.** Dobrynin Y. Kuzmenko V. Gultsov P. Development of the model and the method for determining the influence of the temperature of gunpowder gases in the gun barrel for explaining visualize of free carbon at shot. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol 4 № 1(112). P. 41–53. (Scopus), <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239150>
4. Dobrynin Ye.V., Boltenev V.O., Kuzmenko V.V., **Maksymov O.M.** Development of a universal binary classifier of the state of artillery barrels by the physical fields of shots. *Applied Aspects of Information Technology*. 2022. Vol.5 №4. P. 289–302. <https://doi.org/10.15276/aait.05.2022.19> (Category B)
5. Maksymov M. V, Boltenev V. O., Gultsov P. S., **Maksymov O. M.** Verification of artillery fire under the influence of random disturbances for the computer game ARMA 3. *Applied Aspects of Information Technology*. 2023. Vol.6 No.4: P. 362–375. <https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.24> (Category B)

6. Maksymova O.B., Boltenkov V.O., Maksymov M. V., Gultsov P.S. **Maksymov O.M.** Development and Optimization of Simulation Models and Methods for Controlling Virtual Artillery Units in Game Scenarios. *Herald of Advanced Information Technology*. 2023. Vol.6. No.4. p. 320–337. DOI: <https://doi.org/10.15276/hait.06.2023.21>. (Category B)

7. Maksymova O., Boltyonkov V., Gultsov P., **Maksymov O.** Improvement of the model and method of artillery installation target damage control with minimal combat capability loss. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*. Issue 2(68). Dec. 2023. P. 98–115. DOI: <https://doi.org/10.15276/opu.2.68.2023.1> (Category B)

8. Maksymov M.V., Hultsov P.S., Boltonkov V.O., & Maksymov O.M. Metod veryfikatsii artyleriiskoho vystrilu pid chas vplyvu vypadkovykh zburen. *Morska bezpeka*. 2024, №1. S. 36-49. <https://doi.org/10.32782/msd/2024.1/05> (katehoriia B)

9. **Maksymov O.**, Toshev O., Demydenko V., & Maksymov M. Simulation modeling of artillery operations in computer games: approach based on Markov processes. *Technology Audit and Production Reserves*. 2024. №5/2(79). P. 23-28. <https://journals.uran.ua/tarp/article/view/312873> (Category B)

10. Sposib vyznachennia znoshennia dula i zariadnoi kamory artyleriiskoi harmaty: pat. Ukrainy na vynakhid № 126356; zaiavl. 13.08.2020; opubl. 21.09.2022, Biul. № 38. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1706588>

11. Sposib vyznachennia koordynaty zustrichi artyleriiskoho snariada z poverkhneiu: pat. Ukrainy na vynakhid № 127193; zaiavl. 20.11.20 ; opubl. 31.05.2023. Biul. №22. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1739129>

12. Sposib vyznachennia enerhetychnoi efektyvnosti artyleriiskoi harmaty: pat. Ukrainy na vynakhid. № 128164; zaiavl. 05.04.21; opubl. 24.04.24, Biul. № 17. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1796619>

13. Sposib vyznachennia kilkosti poslidovnoho pusku raket puskovoiu ustanovkoiu dlia znyschennia morskoi tsili: pat. Ukrainy na na korysnu model

№ 155594; zaiavl. 02.10.2023; opubl. 13.03.2024. Biul. №11.
<https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1788150>

Published works of an approbation nature:

14. Tarakhtiy O. S., Gultsov P. S., Maksimov O. M. Modeling the formation of muzzle blast as a diagnostic sign of the state of the shot. Science and society: modern trends in a changing world: Proceedings of the 2nd International scientific and practical conference. MDPC Publishing. Vienna, Austria. 2024. P. 21-27. <https://sci-conf.com.ua/ii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-science-and-society-modern-trends-in-a-changing-world-22-24-01-2024-viden-avstriya-arhiv>

15. Tarakhtii O. S., Hultsov P. S., Maksymov O. M. Udoskonalennia modeli keruvannia boiovoiu zdatnistiu artyleriiskoi harmaty. Topical aspects of modern scientific research: proceedings of the 5th International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. 2024. P. 256-261. URL: <https://sci-conf.com.ua/v-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-topical-aspects-of-modern-scientific-research-25-27-01-2024-tokio-yaponiya-arhiv>

16. Tarakhtii O.S., Hultsov P. S., Maksymov O. M. Udoskonalennia metodu keruvannia boiovoiu zdatnisttiu artyleriiskoi harmaty. European congress of scientific achievements: proceedings of the 1st International scientific and practical conference. Barca Academy Publishing. Barcelona, Spain. 2024. P. 120-125. <https://sci-conf.com.ua/i-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-european-congress-of-scientific-achievements-29-31-01-2024-barselona-isperaniya-arhiv>

17. Tarakhtii O. S., Hultsov P. S., Maksymov O. M. Metod parabolichnoi aproksimatsii vyznachennia koordynaty zitknennia artyleriiskoho snariada z poverkhneiu. Modern problems of science, education and society: proceedings of the 12th International scientific and practical conference. SPC "Sci-conf.com.ua". Kyiv, Ukraine. 2024. P. 21-27. <https://sci-conf.com.ua/xii-mizhnarodna-naukovo-praktichna->

konferentsiya-modern-problems-of-science-education-and-society-5-7-02-2024-kiyiv-ukrayina-arhiv

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	23
ВСТУП	26
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПОТОЧНОГО СТАНУ ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ АРТИЛЕРІЙСЬКИМИ СИСТЕМАМИ ЗА УМОВ ДИНАМІЧНИХ ЗБУРЕНЬ... 34	
1.1 Надійність артилерійських систем: визначення та ключові фактори ефективності	34
1.2. Сучасні підходи до діагностики артилерійських стволів та їх зношеності... 36	
1.3. Проблеми управління артилерійськими системами за умов динамічних збурень	44
1.4. Огляд наявних алгоритмів управління та їх недоліки	50
1.4.1. Модельно-прогностичне управління МРС.....	50
1.4.2. Адаптивні алгоритми управління.....	51
1.4.3. Методи робастного управління	52
1.4.4. Контролери нечіткої логіки та нейронних мереж	54
1.4.5. Порівняльний аналіз і недоліки.....	55
1.5. Методи підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності	57
1.6. Постановка завдань дослідження.....	63
РОЗДІЛ 2. ІНФОРМАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗНОСУ АРТИЛЕРІЙСЬКИХ СТВОЛІВ	78
2.1 Аналіз методів до моделювання зношення артилерійських стволів і зарядних камор.....	78
2.2 Розробка імітаційної моделі зношення артилерійських стволів.....	84
2.3 Інформаційна модель об'єкта АСК як результат ООА.....	92
2.4 Аналіз результатів моделювання та верифікація адекватності моделі	101
РОЗДІЛ 3. АЛГОРИТМІЧНЕ ТА ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ АРТИЛЕРІЙСЬКИМИ СИСТЕМАМИ.....	110

3.1. Аналіз завдань адаптивного управління артилерійськими системами за умов динамічних змін	110
3.2 Розробка Марківських моделей управління за умов невизначеності.....	114
3.3 Інтеграція Марківських моделей із симуляційними методами.....	126
3.4 Реалізація алгоритмічного та інформаційного забезпечення на основі об'єктно-орієнтованих методів.....	132
3.5 Аналіз ефективності адаптивного управління за умов динамічних збурень	141
РОЗДІЛ 4. МЕТОДИ МОНІТОРИНГУ Й АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ	
БОЙОВОЮ РОБОТОЮ АРТИЛЕРІЙСЬКИХ УСТАНОВОК.....	147
4.1 Структура інформаційно-аналітичної системи моніторингу стану ствола гармати	147
4.2. Моделі стану артилерійської гармати: класи та алгоритми	149
4.3 Системи управління (Controller) на основі Марківських моделей	159
4.4 Реалізація підсистеми відображення стану (View) та візуалізації процесів пострілу	163
4.5. Методика експериментальної перевірки та оцінювання ефективності	167
4.6 Методи і моделі наукової новизни патентованих рішень для забезпечення надійності АУ	172
ВИСНОВКИ	178
ЛІТЕРАТУРА	188
ДОДАТОК А.....	201
ДОДАТОК Б	204

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АСК – автоматизована система керування
- АСУ – автоматизована система управління
- АСУВ – автоматизована система управління військами
- АУ – артилерійська установка
- БПЛА – безпілотний літальний апарат
- ВМС – Військово-Морські Сили
- ЗСУ – Збройні сили України
- ЛДВ – лазерна доплерівська велосиметрія
- НДР – науково-дослідна робота
- НК – неруйнівний контроль
- ООА – об’єктно-орієнтований аналіз
- ООП – об’єктно-орієнтоване програмування
- ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор
- РЛС – радіолокаційна станція
- СУВ – система управління вогнем
- УЗК – ультразвуковий контроль
- ФМУЗК – фазований масив ультразвукового контролю
- ЦКЗ – цифрова кореляція зображень
- 3D-ЦКЗ – тривимірна цифрова кореляція зображень
- ШІ – штучний інтелект
- ABM – Agent-Based Modeling (агентно-орієнтоване моделювання)
- ASTM – American Society for Testing and Materials (Американське товариство з випробування матеріалів)
- AU – Artillery Unit (артилерійська установка)
- CNN – Convolutional Neural Network (згорткова нейронна мережа)

CoAP – Constrained Application Protocol (протокол взаємодії з обмеженими пристроями)

CRNN – Convolutional Recurrent Neural Network (згортова рекурентна нейронна мережа)

EKF – Extended Kalman Filter (розширений фільтр Калмана)

FLC – Fuzzy Logic Controller (контролер нечіткої логіки)

FMEA – Failure Modes and Effects Analysis (аналіз видів і наслідків відмов)

FTA – Fault Tree Analysis (аналіз дерев відмов)

GUI – Graphical User Interface (графічний інтерфейс користувача)

HIL – Hardware-in-the-Loop (тестування з апаратурою в контурі)

HMM – Hidden Markov Model (прихована марковська модель)

IoT – Internet of Things (Інтернет речей)

LQR – Linear Quadratic Regulator (лінійний квадратичний регулятор)

LS-SVM – Least Squares Support Vector Machine (машина опорних векторів на методі найменших квадратів)

LSTM – Long Short-Term Memory (мережа довгої короткочасної пам'яті)

MCMC – Markov Chain Monte Carlo (методи Маркова ланцюга Монте-Карло)

MPC – Model Predictive Control (модельно-прогностичне управління)

MQTT – Message Queuing Telemetry Transport (телеметричний транспорт із чергами повідомлень)

MRAC – Model Reference Adaptive Control (адаптивне керування з еталонною моделлю)

MVC – Model View Controller (модель–представлення–контролер)

NN – Neural Network (нейронна мережа)

RL – Reinforcement Learning (підкріплювальне навчання)

RNN – Recurrent Neural Network (рекурентна нейронна мережа)

SMC – Sliding Mode Control (керування методом ковзного режиму)

STR – Self-Tuning Regulator (самоналаштувальний регулятор)

SVM – Support Vector Machine (машина опорних векторів)

UKF – Unscented Kalman Filter (несцентрований фільтр Калмана)

UML – Unified Modeling Language (уніфікована мова моделювання)

ВСТУП

Світові військові конфлікти, зокрема сучасна російсько-українська війна, показали визначальну роль артилерії в досягненні стратегічної мети засобом далекобійного ураження цілей противника [1–3]. Все активніше використання БПЛА для розвідки та коригування стрільби суттєво підвищило ефективність артилерійського вогню [4]. Однак інтенсивне застосування виявило серйозні проблеми з надійністю і бойовою готовністю артилерійських систем, наприклад швидке зношення стволів, перегрів та порушення точності наведення [5, 6]. Наявні методи оцінювання технічного стану АУ є недостатньо оперативними, потребують громіздкого обладнання, нечітко оцінюють ситуацію, ускладнюючи своєчасне обслуговування [6].

Навіть під час ретельної підготовки до стрільби неминучими є динамічні збурення, що впливають на траєкторію снаряда та на надійність артилерійських систем [7, 8]. Основними факторами виникнення таких збурень є ерозія ствола, нагрів під час стрільби, коливання характеристик боєприпасів, вібрації установки та метеорологічні умови [8, 9]. Перераховані чинники зумовлюють розсіювання траєкторій і зменшують ефективність пострілів, що, у свою чергу, потребує додаткових боєприпасів і більшого часу на ураження цілі, а також призводить до поступового погіршення бойової ефективності артилерійських систем.

Актуальний підхід до виконання цих завдань включає моніторинг стану системи, удосконалення алгоритмічного та інформаційного забезпечення управління вогнем, застосування стохастичних моделей та імітаційне моделювання. Водночас наразі розвиваються акустичні та оптичні методи моніторингу: за акустичними сигналами пострілу з високою точністю визначають зношеність ствола SVM-класифікація [6, 7], а фотоелектронні системи дають змогу аналізувати траєкторію та швидкість снаряда для визначення енергоефективності пострілу [10]. Використання БПЛА для коригування вогню

також підтвердило доцільність інтеграції різнорідних сенсорів і систем управління [4, 5].

Алгоритмічне та інформаційне забезпечення артилерії на сьогодні базується на цифрових АСУВ, які дозволяють в реальному часі обмінюватися інформацією між розвідувальними та вогневими компонентами [11]. Сучасні наукові дослідження пропонують методи оптимального розподілу вогню та управління стрільбою для мінімізації витрат боєприпасів і підвищення ймовірності ураження цілей [12]. Особливе місце в науковому осмисленні займають марківські моделі, що враховують випадкові процеси під час стрільби й прогнозують стан системи з огляду на невизначеність [9].

Імітаційне моделювання бойових дій стало важливим інструментом для апробації нових алгоритмів та стратегій без обов'язкових реальних навчань [13-15]. Застосування ігрових симуляторів підтвердило ефективність моделювання реалістичних сценаріїв для тестування методів управління й оцінювання боєздатності [3, 16]. Використання методів об'ООА і шаблонів структури MVC значно підвищує роль розробки та інтеграції таких комплексів [17, 16].

Однак наукова та практична сфери зазначеної задачі мають значні прогалини: відсутня комплексна інтеграція моніторингу, мало розроблена система моделювання та управління для автоматизованої підтримки прийняття рішень у реальному часі. Марківські та імітаційні моделі поки ще недостатньо впроваджені у штатні системи автоматизованого управління, що суттєво знижує оперативність реагування на збурення та зношеність артилерійських систем [18, 19].

Отже, актуальність дисертаційної роботи полягає в необхідності створення комплексного математичного та інформаційного забезпечення АСК артилерією на основі сучасних методів моніторингу, марківських моделей та імітаційного моделювання. Реалізація запропонованого підходу дозволить значно підвищити надійність і живучість артилерійських систем у складних умовах сучасного бою,

тим самим відповідаючи нагальним запитам військової практики і тенденціям розвитку оборонних технологій [1–5, 20, 21, 22].

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконана відповідно до планів, затверджених Міністерством освіти і науки України, в Національному університеті «Одеська політехніка» і є складовою частиною держбюджетної НДР за темою «Підвищення ефективності АСУ спеціального призначення за рахунок моделювання нелінійних високоенергетичних динамічних процесів» НДР № 224-47 (№ ДР 0122U200907).

Мета дослідження. Метою дисертаційного дослідження є підвищення надійності артилерійських систем за умов динамічних збурень шляхом розробки та вдосконалення алгоритмічного та інформаційного забезпечення автоматизованих систем управління засобом імітаційного моделювання процесів зношення, діагностики та ефективності функціонування артилерійських стволів на основі об'єктно-орієнтованих методів.

Реалізації цієї мети передбачила вирішення таких **завдань**:

– здійснено комплексний аналіз впливу управлінських факторів на артилерійські гармати з боку протидіючих сил для ідентифікації основних показників, що характеризують втрату боєздатності, та розроблено автоматизовану систему контролю бойового стану;

– удосконалено імітаційні моделі зношеності артилерійських стволів і зарядних камер з урахуванням акустичних та візуальних полів, що утворюються під час пострілу, для забезпечення діагностики їх стану за поточною швидкістю снаряда, який виходить з каналу ствола, і об'ємом порохових газів, що супроводжують постріл;

– розроблено алгоритмічне та інформаційне забезпечення для дотримання заданого рівня надійності АСК під час виконання бойових завдань артилерійськими підрозділами за умов динамічних змін бойової ситуації на основі

марківських моделей та симуляційних методів з метою адаптації управління до обставин невизначеності на основі об'єктно-орієнтованих методів;

– створено методи моніторингу станів артилерійських гармат, які засновані на обробці акустичних сигналів та візуалізації розширення порохових газів в навколишньому середовищі, що виникають під час пострілу, для оперативної верифікації процесу стрільби як засобу підвищення ефективності управління бойовою роботою.

Об'єкт дослідження – імітаційні моделі артилерійських систем, що функціонують за умов динамічних збурень, як комплексів, на які здійснюється керуючий вплив.

Предмет дослідження – інформаційні моделі та методи підвищення надійності артилерійських систем шляхом вдосконалення автоматизованих систем управління, які базуються на математичному моделюванні зношеності, діагностики та ефективності функціонування.

Методи дослідження. Для реалізації поставлених завдань були використані такі методи: методи математичного моделювання для аналізу процесів зношення артилерійських систем; марківські процеси для побудови оптимальних (стохастичних) алгоритмів управління артилерійськими комплексами; методи теорії ймовірностей та статистичні методи для оцінювання ефективності роботи артилерійських підрозділів; об'єктно-орієнтоване моделювання на основі UML-діаграм для створення інформаційних моделей властивостей об'єкта управління за умов зміни керування при взаємодії.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Удосконалено комплекс імітаційних математичних моделей, що враховує акустичні та візуальні поля пострілів для оцінювання зношеності артилерійських стволів і зарядних камор за умов динамічних збурень. Вперше запропоновано використання нового типу інформаційної одиниці для синхронізації моделей швидкості снаряда за балістичною хвилею та розширення порохових газів в

атмосфері. Це дозволяє вдосконалити алгоритмічне та інформаційне забезпечення автоматизованих систем управління артилерійськими комплексами на основі об'єктно-орієнтованого аналізу, що забезпечує підвищення ефективності ураження при заданому рівні оперативної готовності.

2. Вперше запропоновано інтеграцію марківських моделей з симуляційними методами для адаптації управління артилерійськими гарматами за умов невизначеності, що дозволяє приймати рішення на основі моделювання ймовірнісних станів системи та прогнозування змін бойової обстановки. Це стало можливим завдяки застосуванню об'єктно-орієнтованого підходу, який дозволяє сформулювати вимоги щодо об'єктів управління, що інтегрують як зміну їхніх властивостей у процесі адаптації, так і станів, які визначають динамічні параметри системи, з якими взаємодіє АСК. Такий підхід дозволяє вдосконалити імітаційне моделювання процесів управління, що підвищує ефективність функціонування артилерійських систем за умов динамічних змін бойового середовища і зменшує ризики втрати боєздатності, водночас підвищуючи рівень оперативної готовності.

3. Вперше запропоновано методи моніторингу станів артилерійських гармат, які засновані на обробці акустичних сигналів та візуалізації розширення порохових газів, що виникають під час пострілу, для оперативної верифікації процесу стрільби як засобу підвищення боєздатності і оперативної готовності до бойової роботи. Методи моделювання базуються на парадигмі Model-View-Controller, де артилерійська гармата або її математична модель виступає в ролі Model, а АСУ виконує функції Controller, для аналізу та адаптації бойових процесів за умов динамічних збурень, які моделюють реальні елементи системи та методи взаємодії, забезпечуючи підвищення ефективності артилерійських систем за рахунок адаптивного управління на основі оперативного контролю та аналізу фізичних параметрів пострілу, що сприяє підвищенню надійності бойової роботи та оперативної готовності.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновані в дисертаційній роботі імітації, методи й алгоритми дозволили суттєво підвищити ефективність артилерійських систем через впровадження адаптивного управління, яке базується на марківських моделях. Встановлено, що впровадження адаптивного контролера забезпечує значне зростання ймовірності ураження цілі з першого пострілу (від 45% до 78%), що істотно підвищує результативність початкового вогневого нальоту. Завдяки адаптивному підходу середня витрата снарядів зменшується з 6,1 до 3,8 одиниць, а час, необхідний для знищення цілі, скорочується з 130 с до 85 с. Це дозволяє значно знизити витрати ресурсів та оперативно виконувати бойові завдання.

Основні положення дисертаційного дослідження апробовано в межах національного конкурсу Міністерства оборони України «Кращий винахід 2023 року» у Сухопутних військах та Десантно-штурмових військах, що підтверджено патентом України на винахід № 127193 «Спосіб визначення координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею». Автори: Максимов М. В., Болтьонков В.О., Добринін Є. В., Максимов О. М., Петрушенко М. М., Демиденко В. Е., Плешко Е. А., Гульцов П. С.

Особистий внесок здобувача. Наукові результати, викладені в дисертації, одержані автором самостійно. Автору належать основні ідеї щодо підвищення надійності артилерійських систем на основі розробки та вдосконалення алгоритмічного та інформаційного забезпечення автоматизованих систем управління за умов динамічних збурень.

У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать:

В [7, 10, 23, 24] – комплекс імітаційних математичних моделей зношення артилерійських стволів та зарядних камор, який вперше враховує синхронізовані акустичні та візуальні фактори пострілу, зокрема розроблено математичну модель впливу температурних параметрів на порохові гази у стволі артилерійської системи, а також досліджено процес розширення порохових газів та формування

вільного вуглецю. Це дозволило запропонувати новий тип інформаційної одиниці для синхронізації моделей швидкості снаряда за балістичною хвилею та процесів розширення газів, що істотно підвищує точність діагностики і визначення зношеності артилерійських стволів та зарядних камор.

В [12, 25, 26, 27–31] – інтеграція марківських моделей із симуляційними методами управління артилерійськими системами, що дозволило вперше адаптувати управління на основі ймовірнісних моделей станів системи та прогнозування бойової обстановки. Здобувачем було розроблено та оптимізовано симуляційні моделі управління віртуальними артилерійськими підрозділами для комп'ютерних ігрових сценаріїв, а також запропоновано та реалізовано підхід до моделювання артилерійських операцій на базі марківських процесів, що підвищує ефективність функціонування та оперативну готовність артилерійських підрозділів за умов невизначеності й динамічних збурень.

В [8, 32, 33–36] – методи оперативного моніторингу технічного стану артилерійських гармат на основі обробки акустичних сигналів та візуалізації розширення порохових газів під час пострілу, вперше застосовані для верифікації артилерійського вогню. Дисертантом було досліджено універсальний бінарний класифікатор для оцінювання зношеності стволів на основі акустичних та відеоданих, опрацьовано метод визначення координат влучання артилерійського снаряда шляхом реєстрації акустичних полів пострілу, а також запропоновано та реалізовано підхід до покращення симуляції артилерійського вогню із використанням сучасних методів верифікації. Це дозволило значно підвищити ефективність управління бойовою роботою, забезпечити високий рівень боєздатності й надійності артилерійських систем.

Апробація результатів роботи.

Отримані в дисертаційному дослідженні результати, ідентифіковані як науково обґрунтовані положення, були представлені, обговорені та схвалені на таких наукових форумах:

V-та Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні аспекти сучасних наукових досліджень» (25–27 січня 2024 р.), видавництво CPN Publishing Group, Токіо, Японія;

I-ша Міжнародна науково-практична конференція «Європейський конгрес наукових досягнень» (29–31 січня 2024 р.), видавництво Barca Academy Publishing, Барселона, Іспанія;

II-га Міжнародна науково-практична конференція «Наука і суспільство: сучасні тенденції у змінному світі» (22–24 січня 2024 р.), видавництво MDPC Publishing, Відень, Австрія;

XII-та Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні проблеми науки, освіти і суспільства» (5–7 лютого 2024 р.), видавництво SPC, Київ, Україна.

Публікації. Результати наукових досягнень викладено в 17 друкованих працях, зокрема 9 у спеціалізованих наукових виданнях (3 публікації індексуються у міжнародній науково-метричній базі SCOPUS, 3 патенти України на винахід і 1 патент України на корисну модель), 4 доповіді і тез на міжнародних конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел, що містить 93 позиції. Загальний обсяг дисертації становить 207 сторінки (з них 179 основного тексту), 20 рисунків, 12 таблиць та 2 додатки.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПОТОЧНОГО СТАНУ ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ АРТИЛЕРІЙСЬКИМИ СИСТЕМАМИ ЗА УМОВ ДИНАМІЧНИХ ЗБУРЕНЬ

1.1 Надійність артилерійських систем: визначення та ключові фактори ефективності

Одним із найважливіших критеріїв використання артилерійських систем є їх надійність, що визначає ефективність і практичність військових операцій [1, 37]. У процесі дії артилерії надійність виявляє здатність системи виконати задану функцію за певних умов упродовж конкретного часу. Сюди ж відносимо не лише точність ураження цілі АУ, а й її потенціал ефективно спрацьовувати за умов різних динамічних збурень. Динамічні збурення, зокрема атмосферні коливання, механічні навантаження та удари протиборчої сторони, можуть суттєво вплинути на результативність та довговічність артилерійських систем. Дослідження дії динамічних збурень та зменшення їхнього негативного впливу на постріл є важливими чинниками у підвищенні надійності артилерійських систем.

Розглянемо низку ключових факторів, що впливають на надійність артилерійських систем під час динамічних збурень. По-перше, іманентна конструкція та якість АУ відіграють вирішальну роль [2–4]. Ті системи, які спроектовані з урахуванням високого рівня стійкості до вібрацій, ударів та температурних коливань, імовірніше зберігають експлуатаційну цілісність в несприятливих умовах. Також важливим для забезпечення тривалої надійності АУ є вибір матеріалів, що можуть витримувати постійні механічні навантаження без деформації. Водночас точність у процесі виробництва сприяє стабільній та передбачуваній експлуатації артилерійської системи, зменшуючи кількість збоїв у роботі, викликаних невідповідністю компонентів або дефектами.

По-друге, своєчасне обслуговування та контроль [5, 6, 38–40] робочого циклу є обов'язковими для підтримки надійності артилерії. Регулярні графіки

обслуговування, ремонт та заміна деталей, що вийшли з ладу, допомагають попередити зношеність, спричинену динамічними збуреннями. Доцільними також вважаємо ефективні діагностичні інструменти та системи моніторингу, що забезпечують завчасне виявлення потенційних проблем. З цією метою вживаються коригувальні заходи до того, як незначні несправності стануть критичними і зумовлять відмови в роботі АУ. До того ж комплексне навчання персоналу з обслуговування забезпечує правильне та ефективне виконання процедур, мінімізуючи помилки, які знижують надійність системи.

По-третє, інтеграція передових технологій управління та стабілізації підвищує здатність артилерійської системи адаптуватися до динамічних збурень. Сучасні артилерійські системи в основному включають складну електроніку та програмне забезпечення, які можуть коригувати параметри стрільби відповідно до умов, що характеризують довкілля в режимі реального часу. Ці адаптивні системи можуть компенсувати такі фактори, як пориви вітру, вібрації ґрунту та швидкі зміни температури, тим самим забезпечуючи точність стрільби та стабільність системи [41, 42]. Крім того, запас критичних компонентів системи створює додатковий рівень надійності за умови відмови одного з елементів структури.

Зауважимо, що зовнішні фактори (умови навколишнього середовища) також суттєво впливають на ефективну роботу артилерійських систем. Екстремальні погодні умови, зокрема сильний дощ, сніг або масштабна спека, можуть зумовити пошкодження як механічних, так і електричних компонентів артсистем. Успішне проектування АСК із захисними заходами (стійкі до погодних умов покриття та герметичні відсіки) може зменшити негативний вплив природних стихійних явищ [43, 44]. До того ж дослідження та вивчення специфічних екологічних викликів уможлиблює налаштування артилерійських систем для легшої адаптації до очікуваних динамічних збурень.

Фактори експлуатації, зокрема частота та інтенсивність використання, також впливають на безперебійну роботу АУ. Інтенсивні графіки стрільби можуть пришвидшити зношення механічних частин і вичерпування витратних матеріалів, тому виникає потреба в міцних конструкціях систем, які можуть витримувати тривалі навантаження під час експлуатації [20, 45]. Інфраструктура логістичної підтримки, яка забезпечує необхідні запаси та запчастини, є важливою в гарантії готовності та надійності системи під час тривалих операцій.

Підсумовуючи, зазначимо, що надійність артилерійських систем за умов динамічних збурень є актуальною різнобічною проблемою, яка залежить від низки факторів: міцність конструкції, регулярне обслуговування, передова технологічна інтеграція, стійкість до стихій навколишнього середовища та ефективного керування експлуатацією. Дослідження цих чинників сприятиме забезпеченню ефективної й надійної роботи артилерії збройних сил навіть у складних та непередбачуваних умовах. Безумовно, актуальні дослідження такого характеру в поєднанні зі стратегічним впровадженням заходів для підвищення надійності артилерійських систем є важливими для покращення результативності артилерії в сучасній війні [11, 22].

1.2. Сучасні підходи до діагностики артилерійських стволів та їх зношеності

Беззаперечною умовою надійності та довговічності артилерійських систем є цілісність їх стволів. Зношеність ствола, природний результат повторних пострілів можуть значно погіршити ефективність, точність і безпеку дії АУ [6, 37]. Традиційні методи оцінювання зношеності ствола, тобто візуальні огляди та вимірювання діаметрів каналу за допомогою штангенциркулів, часто є трудомісткими й недостатньо точними. Натомість сучасні передові досягнення впроваджують складні діагностичні методи, спрямовані на підвищення точності, ефективності та надійності оцінювання зношеності ствола.

Одним з таких сучасних підходів є імплементація методів НК, що оцінюють стан ствола без порушення його структурної цілісності. Серед таких значну увагу заслуговує УЗК [37]. УЗК використовує високочастотні звукові хвилі, які поширюються через матеріал ствола і виявляють та аналізують аномалії, такі як тріщини, тонкі стінки й інші форми зношування. Основний принцип ультразвукового контролю можна записати рівнянням:

$$V = f\lambda, \quad (1.1)$$

де V – швидкість ультразвукової хвилі, f – частота, а λ – довжина хвилі. Точне вимірювання цих параметрів дозволяє УЗК надавати детальну інформацію про внутрішній стан ствола, виявляючи зношення, невидимі ззовні. До того ж доречним є рівняння, що описує згасання ультразвукових хвиль:

$$I = I_0 e^{-\alpha x}, \quad (1.2)$$

де I – інтенсивність хвилі після проходження відстані x , I_0 – початкова інтенсивність, а α – коефіцієнт згасання, що додатково характеризує властивості матеріалу і виявляє найменші зміни в товщині ствола. Доцільними стали методи обробки сигналів, такі як перетворення Фур'є й аналіз часу-частоти, що підвищують роздільну здатність і точність УЗК, ізолюючи специфічні частотні компоненти, пов'язані з різними типами дефектів. Водночас ФМУЗК дозволяє одночасно оцінювати кілька ділянок у стволі, збільшуючи швидкість і масштаб перевірки. Інтеграція ФМУЗК з автоматизованими системами сканування може додатково зменшити похибки й покращити повторюваність вимірювань.

Іншою ефективною технікою є використання лазерних систем вимірювання. Наприклад, лазерна профілометрія полегшує точне картографування внутрішніх і зовнішніх поверхонь артилерійських стволів. Цей метод використовує когерентність і спрямованість лазерних променів для

створення високороздільних тривимірних профілів [37]. Точність лазерних вимірювань дозволяє виявляти найменші відхилення в структурі ствола, які свідчать про прогресуючий процес зношування. Так, основне рівняння, що регулює лазерну профілометрію, базується на принципі триангуляції:

$$\theta = \arctan\left(\frac{d}{f}\right), \quad (1.3)$$

де θ – кут падіння, d – зміщення лазерного вектора, а f – фокусна відстань системи. Обчислюючи θ , можна отримати точні багатовекторні вимірювання, що дозволяють виявляти нерівності поверхонь та зношування ствола. Крім того, лазерні системи можуть працювати в режимі реального часу, забезпечуючи безперервний моніторинг і нагальне оцінювання стану ствола під час циклів обслуговування. Використання ЛДВ дозволяє вимірювати швидкість рухомих поверхонь і надавати динамічну інформацію про зношування ствола через постійні навантаження під час експлуатації, що може додатково підвищити можливості лазерних систем.

ЦКЗ також стає ключовим засобом у діагностиці стану відпрацювання ствола [37]. ЦКЗ передбачає вияв та аналіз зображень поверхні ствола за різних умов для визначення деформацій і руйнівної дії потужного тиску. Така техніка, порівнюючи зображення, зроблені на різних етапах використання, може виявити ділянки, що зазнають значного зношення, і передбачити потенційні точки відмови зброї. Математична основа ЦКЗ включає обчислення поля зміщення u з підмножин зображень:

$$u = u_0 + \epsilon \cdot u_1, \quad (1.4)$$

де u_0 – початкове зміщення, а ϵ становить параметр деформації. Для підвищення точності ЦКЗ можуть використовуватися моделі деформації вищого ґатунку:

$$u = u_0 + \epsilon \cdot u_1 + \epsilon^2 \cdot u_2 + \dots \quad (1.5)$$

Це дозволяє виявляти нелінійні типи деформації, які є показовими для прогнозування складних механізмів зношування в артилерійських стволах. Водночас досягнення в сфері високошвидкісної зйомки та обчислювальної потужності дозволяють проводити аналіз ЦКЗ в режимі реального часу, що сприятиме своєчасному втручання й прийняттю рішення щодо обслуговування. Впровадження тривимірної ЦКЗ (3D-ЦКЗ) забезпечує додаткову інформацію про глибину деформації, даючи більш комплексний аналіз зношування поверхні ствола за різних умов навантаження. Машинне навчання та ШІ також удосконалили діагностику зношеності стволів. Використовуючи показники спроможності стволів та індикатори зношення, алгоритми машинного навчання можуть виявляти складні шаблони та кореляції, які не враховують традиційні методи аналізу. Прикметно, що такі моделі фіксують моменти ранніх стадій зношення стволів, тим самим прогнозуючи оптимальні графіки технічного обслуговування і в результаті покращуючи загальну надійність артилерійських систем. Для прикладу, бінарний класифікатор, розроблений для оцінювання зношеності стволів, використовує такі характеристики, як частота стрільби, тип снаряда та умови навколишнього середовища, що дає можливість класифікувати стволи за рівнем складності зношення. Ефективність класифікатора оцінюється за такими показниками: точність, прецизійність, відгук [16, 33]. Саме вони забезпечують надійну роботу в різних операційних сценаріях. Водночас більш складні моделі, зокрема згорткові нейронні мережі CNN та рекурентні нейронні

мережі RNN, можуть брати до уваги часо-просторові залежності в даних про зношеність, у такий спосіб надаючи точніші прогнози [46–50].

Таблиця 1.1 – Порівняння сучасних діагностичних методів для виявлення рівня зношеності артилерійських стволів

Метод	Точність (%)	Швидкість (с/замір)	Вартість (тис. \$)
Ультразвукове тестування	85-90	30-60	50-100
Лазерна профілометрія	95-98	10-30	150-300
Цифрова кореляція зображень	90-95	10-20	80-150
Моделі машинного навчання	75-99*	<5	50-200

Джерело: розроблено автором

Таблиця 1.1 демонструє переваги та недоліки різних сучасних діагностичних методів. Так, ультразвукове тестування забезпечує відносно високу точність, характеризується належною швидкістю та помірною вартістю. Лазерна профілометрія, хоча і має перевагу в дуже високій точності, проте відстає в швидкості від попереднього та потребує більших витрат через складне обладнання. Цифрова кореляція зображень досягає балансу у високій точності та швидкості за помірної вартості, що робить її пріоритетною для багатьох застосувань. Моделі машинного навчання, у свою чергу, представляють високо масштабовану та швидку діагностичну здатність, хоча їх продуктивність залежить від якості та кількості доступних навчальних даних.

Варто зауважити, що інтеграція цих діагностичних методів з технологіями Інтернету речей (IoT) веде до виникнення «розумних» артилерійських систем. Показово, що датчики, що підтримують IoT, можуть безперервно контролювати стан стволів і передавати дані до централізованих обробних блоків, де передові алгоритми аналізують інформацію в режимі реального часу. Такий постійний

зв'язок підвищує здатність виконувати прогнозоване завчасне обслуговування, зменшуючи час простою та продовжуючи термін функціонування артилерійських стволів. Впровадження нових інтегрованих систем не тільки покращує надійність стволів, але й сприяє процесам прийняття рішень на основі даних у військових операціях. Важливо зазначити, що залучення обчислень на периферії ще більше оптимізує процес обробки даних, виконуючи попередній аналіз локально, тим самим зменшуючи затримки та використання пропускну здатності. Наприклад, розгортання моделей ШІ на устаткуванні дозволяє негайно виявляти критичні індикатори зношення, що дозволяє швидко здійснити обслуговування.

Розгортання IoT-систем у діагностиці артилерійських систем передбачає наявність ключових компонентів, зокрема мережі датчиків, протоколи зв'язку та платформи керування даними. Такі вимірювачі, як акселерометри, тензодатчики та датчики температури, розміщуються вздовж ствола для охоплення різноманітних параметрів, що вказують на зношеність та експлуатаційне навантаження. Протоколи зв'язку, зокрема MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) та CoAP (Constrained Application Protocol), забезпечують ефективну та безперешкодну передачу даних у бойових умовах. Передові платформи керування даними використовують хмарні обчислення та технології об'ємних даних для зберігання, обробки та аналізу інформації, що генерується. Заявлена комплексна система, у свою чергу, забезпечує безперервний моніторинг та сприяє активним стратегіям обслуговування, тим самим підвищуючи загальну надійність артилерійських систем. До того ж техніки злиття даних можуть бути використані для опрацювання інформації з кількох типів датчиків, надаючи більш цілісне уявлення про стан ствола та пропонуючи більш ефективну діагностику.

Зазначимо, що, попри все, також важливою є розробка стандартизованих протоколів та інструкцій для оцінювання зношеності стволів. Коректні методології забезпечують відносність та надійність діагностичних результатів на різних платформах та за різних умов. Стандартизація також ефективна в

калібруванні діагностичних інструментів, адже мінімізує змінність та підвищує достовірність оцінювання. Спільні зусилля зацікавлених сторін, а саме науково-дослідних установ, військових організацій та промислових об'єктів, є важливими для встановлення певних стандартів і сприяють уніфікації та удосконаленню в діагностиці артилерійських стволів. Зокрема, стандарти, такі як ISO 9001 для систем керування якістю та ASTM International для тестування матеріалів, надають шаблони для розробки та впровадження надійних діагностичних процедур. Крім того, імплементація стандартизованих форматів даних та інтерфейсів полегшує інтероперабельність між різними діагностичними системами та підвищує масштабованість діагностичних рішень на різних артилерійських платформах. Водночас використання принципів інженерії надійності підвищує прогностичні можливості сучасних діагностичних методик. Моделі надійності, а саме: розподіл Вейбулла та байєсівські мережі, можуть бути використані для оцінювання ймовірності збою та залишкового терміну експлуатації стволів АУ. Наприклад, функція щільності ймовірностей Вейбулла задається так:

$$f(t; \lambda, k) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-(t/\lambda)^k}, \quad (1.5)$$

де t – це час, λ – параметр масштабу, а k – параметр форми. Адаптуючи цю модель до даних зношеності, інженери з надійності можуть передбачати моменти відмов зброї та, відповідно, оптимізувати графіки технічного обслуговування. Байєсівські мережі пропонують ймовірнісний підхід до моделювання залежностей між різними факторами зношення, дозволяючи включати експертні знання та оновлювати результати оцінювання надійності в міру надходження нових даних. Прикметно, що методи моделювання Монте-Карло можуть бути використані для імітації стохастичного характеру процесів зношення, забезпечуючи надійне підґрунтя для кількісного оцінювання невизначеності та ризиків. Застосування цих моделей надійності з даними реального часу

діагностики дозволяє стрімко оновлювати стратегії технічного обслуговування, тим самим забезпечуючи своєчасне втручання в оптимальні інтервали на основі фактичних умов зношування, а не фіксованих графіків.

Інженерія надійності також займається розробкою аналізу дерев відмов FTA та аналізу видів і наслідків відмов FMEA для систематичної ідентифікації та пом'якшення потенційних точок збою в артилерійських стволах. FTA надає графічне представлення чинників, що провокують відмови, дозволяючи інженерам зосередити діагностичні зусилля на найбільш критичних компонентах. Водночас FMEA оцінює серйозність і ймовірність різних видів відмов, залучаючи запобіжні заходи та удосконалюючи структуру конструкцій. Розглянуті методи доповнюють вищезазначені діагностичні методики, демонструючи комплексний підхід до забезпечення надійності стволів через проактивний моніторинг і систематичне запобігання ризиків.

Отже, сучасні підходи до діагностики артилерійських стволів та рівня їх зношеності репрезентують значні досягнення на відміну від традиційних методів. Впровадження методів ультразвукового тестування, лазерних вимірювань, цифрової кореляції зображень та алгоритмів машинного навчання значно покращило точність та ефективність оцінювання зношування стволів. Водночас інтеграція цих технологій з IoT та розроблення стандартизованих протоколів також підвищують надійність артилерійських систем. Залучення принципів інженерії надійності та конвергенція кількох діагностичних технологій уможливають більш ефективні та комплексні рішення. З огляду на те, як актуалізуються певні дослідження та розробки, запропоновані інноваційні діагностичні методики, вочевидь, відіграватимуть ключову роль у забезпеченні стабільної результативності, безпеки та оперативної ефективності артилерійських операцій. Актуальні досягнення перш за все опиратимуться на пріоритетність аналітики даних у реальному часі, вдосконалення сенсорних технологій та

інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, що сприятиме розвитку нового покоління надійних та ефективних артилерійських систем.

1.3. Проблеми управління артилерійськими системами за умов динамічних збурень

Проблема ефективного управління артилерійськими системами в сучасній війні все частіше осмислюється в аспекті функціонування за умов динамічних збурень, які суттєво знижують результативність та успіх військової операції [1, 34, 35]. Динамічні збурення охоплюють низку факторів, зокрема зміни навколишнього середовища, мобільність цілей та ворожі контрзаходи, які небезпечні складністю виявлення та координації артилерійських операцій. Уникнення таких збурень є надзвичайно важливим фактором у підвищенні надійності та ефективності артилерійських систем.

Зауважимо, що докільця є основним джерелом динамічних збурень, які впливають на результативність артилерійських операцій. Такі фактори, як швидкість і напрямок вітру, коливання температури, вологість і неоднорідна топографія місцевості, можуть сукупно впливати на балістичну траєкторію артилерійських снарядів. Вітер, наприклад, викликає бокові та вертикальні відхилення в траєкторіях руху снарядів, що потребує точного профілювання вітру в реальному часі та механізмів компенсації. Балістичний коефіцієнт C_d і сила опору F_d часто моделюються як $F_d = \frac{1}{2} \rho v^2 C_d A$, де ρ – густина повітря, v – швидкість, а A – площа поперечного перерізу. Ці показники є критичними параметрами для прогнозування та коригування змін траєкторії, викликаних вітром. Коливання температури можуть впливати на ефективність згоряння порохових зарядів, що призводить до коливань початкової швидкості v_0 і, відповідно, дальності R снарядів, представлені рівнянням $R = \frac{v_0^2 \sin(2\theta)}{g}$, де θ – кут стрільби, а g – прискорення вільного падіння. Заразом неоднорідна місцевість стає причиною невизначеності точок влучання снарядів, що потребує

вдосконаленого геопросторового моделювання та адаптивних рішень для стрільби, які б враховували зміни висоти та нерівності поверхонь [19, 23, 36].

Мобільність цілей становить собою ще один рівень складності в управлінні артилерійськими системами. Сучасні поля бою часто характеризуються високоманевреними цілями, наприклад, броньовані транспортні засоби, піхотні підрозділи та мобільні ракетні установки, які можуть виконувати ухильні маневри, щоб уникнути виявлення та ураження. Динамічний характер руху цілей вимагає від артилерійських систем використання складних алгоритмів відстеження в реальному часі та прогнозування траєкторій. Наприклад, фільтри Калмана забезпечують оптимальне оцінювання стану, мінімізуючи середньоквадратичну похибку положення та швидкості цілей [13]. Прогностична здатність таких фільтрів є важливою для розрахунку оновлених рішень для стрільби, які враховують передбачене положення рухомих цілей. До того ж залучення методів машинного навчання, таких як рекурентні нейронні мережі RNN та мережі довгої короткочасної пам'яті LSTM, може підвищити точність прогнозування за умов вивчення складних моделей руху та адаптації до змін положення цілей.

В умовах динаміки ворожі контрзаходи ще більше ускладнюють управління артилерійськими системами. Тактики електронної війни, зокрема глушіння та імітації-обмани, спрямовані на порушення систем зв'язку та навігації, що призводить до зниження координації та точності наведення. Для уникнення таких перешкод артилерійські системи повинні дотримуватись стабільних протоколів зв'язку (стрибкоподібна зміна частоти та методи розширеного спектру), які підвищують стійкість до спроб глушіння. Зауважимо, що впровадження вдосконалених методів злиття даних, взятих з різних джерел (радары, інфрачервоні та оптичні датчики), може покращити ідентифікацію та локалізацію цілей, незважаючи на наявність електронних контрзаходів. Використання приманок і псевдоманеврів ворожими силами потребує використання надійних

алгоритмів розрізнення, здатних диференціювати справжні цілі від обманних елементів, тим самим зменшуючи ймовірність нераціонального розподілу артилерійських ресурсів і мінімізуючи збитки.

Математичне моделювання є невід'ємною частиною прогнозування та компенсації динамічних збурень, оскільки сприяє розробці надійних систем управління, здатних адаптуватися до змінних умов. Попередня імітація станів у часо-просторовому вимірі забезпечує ґрунтовну основу для моделювання динаміки артилерійських систем, охоплюючи як внутрішні стани, так і зовнішні входи. Стохастичні моделі, що передбачають ймовірнісні елементи для врахування невизначеності, дозволяють моделювати різні сценарії збурень і оцінювати стійкість системи. Передові методи фільтрації, такі як розширені фільтри Калмана EKF і несцентровані фільтри Калмана UKF, підвищують точність оцінювання стану, враховуючи нелінійну динаміку системи та характеристики негаусівського шуму. Методи оптимізації, зокрема лінійні квадратичні регулятори LQR і модельно-прогностичне управління MPC, використовуються для визначення оптимальних параметрів стрільби, які збільшують ефективність ураження цілей, мінімізуючи при цьому витрати ресурсів і випадкові пошкодження [9, 38]. Розглянута математична база дозволяє формулювати закони управління, які є як адаптивними, так і прогностичними, та забезпечувати високий рівень надійності системи за умов динамічних збурень [51–53].

Варто зауважити, що моделювання та тестування є незамінними для валідації моделей і стратегій управління, розроблених для підвищення надійності артилерійських систем. Високоточні засоби моделювання, що використовують передові фізичні досягнення та реалістичні сценарії бойових дій, забезпечують важливі платформи для оцінювання результативності системи в умовах широкого спектра динамічних збурень [15]. Такі імітації дозволяють виявляти потенційну вразливість та вдосконалювати стратегії уникнення руйнівного впливу до

розгортання на полі бою. Наприклад, моделювання методом Монте-Карло може бути використане для проведення широких аналізів сценаріїв, оцінюючи стійкість системи в різних імовірних розподілах екологічних та операційних змінних. Крім того, тестування з апаратурою в контурі НІЛ залучає реальні апаратні компоненти з модельованими середовищами, полегшуючи оцінювання взаємодій елементів системи та перевірку алгоритмів управління в реальному часі та в реалістичних умовах експлуатації. Дослідження показало, що ітеративні процедури тестування дозволяють постійно вдосконалювати систему, забезпечуючи здатність АУ адаптуватися до нових загроз і мінливої динаміки поля бою, через систематичне оцінювання ефективності й результативності.

Впровадження адаптивних механізмів навчання також підвищує надійність артилерійських систем, що демонструє постійне вдосконалення через навчання на основі практичного досвіду. Алгоритми машинного навчання можуть обробляти значні обсяги операційних даних для виявлення непередбачуваних шаблонів і кореляцій, сприяючи пошуку прихованих факторів, що впливають на результативність системи. Методи навчання з наставником, такі як машини опорних векторів SVM і дерева рішень, можуть класифікувати та прогнозувати динаміку цілей, тоді як методи навчання без наставника, такі як алгоритми кластеризації, можуть виявляти нові шаблони загроз і адаптивні контрзаходи. Підкріплювальне навчання RL, зокрема, демонструє парадигму для оптимізації стратегій стрільби, винагороджуючи успішні ураження та караючи невдалі, тим самим спрямовуючи систему до все більш ефективних програм прийняття рішень [54]. Однак упровадження адаптивного навчання вимагає ретельного врахування обчислювальних обмежень, якості даних і запобігання перенавчанню, акцентуючи увагу на тому, щоб дослідження динаміки ефективно узагальнювалося, реагувало на непередбачені сценарії і водночас не погіршувалася результативність системи в нових умовах.

Підсумовуючи, зауважимо, що управління артилерійськими системами в умовах динамічних збурень вимагає багатогранного та інтегрованого підходу, що синтезує моделювання навколишнього середовища, відстеження цілей у реальному часі, досконалі комунікаційні протоколи, автономні технології, інженерію надійності, математичне моделювання, адаптивні механізми навчання тощо. Безумовно, вирішення актуальних викликів є важливим для підтримки надійності та ефективності артилерійських операцій в умовах все більш складних і непередбачуваних бойових умов. Постійні досягнення в технології та методології покликані підвищувати здатність артилерійських систем адаптуватися та удосконалюватися в умовах динамічних збурень, забезпечуючи стійку оперативну перевагу через покращену ефективність системи, практичність і точність.

Щоб проілюструвати практичне застосування математичного моделювання для підвищення надійності артилерійських систем, розглянемо впровадження фільтра Калмана для прогнозування траєкторії за умов динамічних збурень. Фільтр Калмана забезпечує оптимальне рекурсивне рішення для оцінювання змінних стану лінійної динамічної системи, що піддається гаусівському шуму. У контексті роботи артилерійських систем вектор стану x_k на дискретному часовому кроці k може включати координати положення (x_k, y_k) , компоненти швидкості $(v_{x,k}, v_{y,k})$ та інші відповідні параметри, зокрема прискорення a_k . Динаміка системи може бути змодельована за допомогою представлення в просторі станів:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + w_k \quad (1.6)$$

$$z_k = Hx_k + v_k, \quad (1.7)$$

де A – матриця переходу стану, B – матриця вхідного керування, u_k представляє вхідні керування, w_k – шум процесу з коваріацією Q , z_k – вектор вимірювань, H – матриця спостереження, а v_k – шум вимірювань з коваріацією R .

Фільтр Калмана працює в два основні етапи: прогнозування та оновлення. Під час етапу прогнозування фільтр оцінює наступний стан і коваріацію на основі поточного стану та вхідних показників:

$$\hat{x}_{k|k-1} = A\hat{x}_{k-1|k-1} + Bu_k \quad (1.8)$$

$$P_{k|k-1} = AP_{k-1|k-1}A^T + Q \quad (1.9)$$

На етапі оновлення фільтр враховує нові вимірювання для уточнення оцінювання поточного стану:

$$K_k = P_{k|k-1}H^T (HP_{k|k-1}H^T + R)^{-1} \quad (1.10)$$

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k(z_k - H\hat{x}_{k|k-1}) \quad (1.11)$$

$$P_{k|k} = (I - K_kH)P_{k|k-1} \quad (1.12)$$

Коефіцієнт Калмана K_k оптимально контролює оновлення прогнозу та вимірювань для мінімізації коваріації помилки оцінювання. Постійно перевіряючи показники стану, фільтр Калмана підвищує рівень прогнозування траєкторії, що покращує точність наведення та зменшує вплив збурень навколишнього середовища.

У сценаріях, що демонструють нелінійну динаміку або негаусівський шум, можуть бути використані розширені варіанти фільтра Калмана, такі як розширений фільтр Калмана EKF або несцентований фільтр Калмана UKF, щоб врахувати більш складну реакцію системи. Такі розширені фільтри лінеаризують нелінійну динаміку в поточному оцінюванні EKF або використовують детермінований підхід до відбору для отримання середнього значення та коваріації UKF, забезпечуючи більш точну експертизу стану в ускладнених умовах експлуатації.

1.4. Огляд наявних алгоритмів управління та їх недоліки

Надійність артилерійських систем є надзвичайно важливою для забезпечення точності та ефективності в різних сценаріях. Алгоритми управління відіграють критичну роль в керуванні траєкторією, стабільністю та загальною результативністю артилерійських одиниць.

У цьому розділі детально розглянемо наявні алгоритми управління, що використовуються в артилерійських системах, пояснюючи їх механізми, застосування та властиві недоліки. Досліджуючи класичні підходи і порівнюючи їх із сучасними інтелектуальними методами, ми прагнемо виокремити труднощі та виклики, пов'язані з досягненням оптимальної надійності в системах управління артилерією.

1.4.1. Модельно-прогностичне управління MPC

Модельно-прогностичне управління MPC є більш складним і універсальним підходом, що використовує прогностичну модель системи для оптимізації управління. В артилерійських застосуваннях MPC може передбачати майбутні стани снарядів і динамічно коригувати їх вплив для підвищення як точності, так і надійності. Загальне поняття MPC включає розв'язання оптимізаційної задачі на кожному етапі управління, найчастіше вираженої так:

$$\begin{aligned}
 \min_{u(t)} \quad & \sum_{k=0}^{N-1} [(x(t+k|t) - x_{ref})^T Q (x(t+k|t) - x_{ref}) + u(t+k|t)^T R u(t+k|t)] \\
 \text{subject to} \quad & x(t+k+1|t) = Ax(t+k|t) + Bu(t+k|t) \\
 & u_{min} \leq u(t+k|t) \leq u_{max} \\
 & x_{min} \leq x(t+k|t) \leq x_{max}
 \end{aligned} \tag{1.13}$$

Тут $x(t)$ позначає вектор стану, $u(t)$ – керуючий вплив, Q і R є матрицями балансу, що врівноважують поточний стан і зусилля управління, а N – обсяг прогнозування. Обмеження u_{min} і u_{max} представляють допустимий діапазон для керуючих впливів, тоді як x_{min} і x_{max} визначають допустиму амплітуду станів.

Основна перевага MPC полягає в його здатності обробляти змінні системи та включати обмеження безпосередньо в стратегію управління, тим самим підвищуючи стійкість і продуктивність системи. Аналізуючи спроектовані стани, MPC може заздалегідь коригувати керуючі дії для уникнення впливу збурень і нелінійності системи. Однак ця прогностична здатність характеризується підвищеною обчислювальною складністю, що породжує суттєві виклики в сучасних артилерійських застосуваннях, де швидке прийняття рішень є важливим. Потреба розв'язання оптимізаційної задачі на кожному етапі управління вимагає потужних обчислювальних ресурсів, що потенційно знижує рівень реалізації MPC в умовах обмежених можливостей.

Варто зазначити, що ефективність MPC значною мірою залежить від точності підпорядкованої прогностичної моделі. Неточності в моделюванні динаміки системи, такі як неспроектовані нелінійності або варіації параметрів, можуть погіршити продуктивність і надійність регулятора. Вирішення цих проблем часто потребує інтеграції адаптивних або стійких методологій у межах MPC, що ще більше ускладнює проектування та залучення регулятора.

1.4.2. Адаптивні алгоритми управління

Концептуальними в раціональному підході управління артилерійськими системами є адаптивні алгоритми, які застосовують динамічний підхід, що налаштовує ключові параметри [39] реального часу для врахування змін у динаміці системи або впливу зовнішніх збурень. Водночас адаптивні контролери можуть змінювати параметри стрільби на основі зворотного зв'язку, у такий спосіб підвищуючи стійкість до трансформацій довкілля, таких як пориви вітру або зміни властивостей матеріалів, викликані температурою. Найчастіше стратегії адаптивного управління містять у собі адаптивне керування з еталонною моделлю MRAC та самоналаштовувальні регулятори STR.

MRAC функціонує шляхом узгодження продуктивності системи з попередньо визначеною еталонною моделлю. Параметри контролера

налаштовуються ітеративно для мінімізації похибки між фактичним виходом системи та виходом еталонної моделі. Загальний адаптивний закон можна інтерпретувати так:

$$\dot{\theta}(t) = -\Gamma e(t)\phi(t), \quad (1.14)$$

де $\theta(t)$ – це адаптивні параметри, Γ є позитивно визначеною матрицею коефіцієнтів адаптації, $e(t)$ – похибка відстеження, а $\phi(t)$ – вектор регресора.

А STR, у свою чергу, передбачає онлайн-ідентифікацію параметрів системи з подальшим налаштуванням коефіцієнтів контролера в реальному часі на основі ідентифікованої моделі. Цей двосторонній процес забезпечує ефективність контролера, незважаючи на постійні зміни в динаміці системи.

Хоча адаптивні алгоритми управління забезпечують підвищену гнучкість і надійність, їх реалізація часто супроводжується труднощами. Необхідність у значних обчислювальних ресурсах може бути обмежувальним фактором, особливо у високошвидкісних артилерійських системах, затримка яких повинна бути мінімізована. Крім того, забезпечення стабільності та відповідності адаптивних контролерів у високодинамічних і невизначених середовищах залишається складним завданням. Завелика тривалість адаптації або неправильне налаштування параметрів можуть призвести до нестабільності або зниження результативності, тим самим дискредитуючи надійність артилерійської системи.

1.4.3. Методи робастного управління

Методи робастного управління розроблені для підтримки бажаних рівнів ефективності, незважаючи на невизначеність системи та зовнішні збурення [40]. Існують два широко застосовувані методи робастного управління в артилерійських системах – це H_∞ управління та управління методом ковзного режиму SMC.

H_∞ управління зосереджується на мінімізації пікового випадку впливу збурень на виходи продуктивності, тим самим дотримується стабільність умов експлуатації у широкому спектрі. Задача H_∞ управління може бути сформульована так:

$$\min \| T_{zw}(s) \|_\infty, \quad (1.15)$$

де $T_{zw}(s)$ – передавальна функція від вхідного збурення w до виходу продуктивності z , а $\|\cdot\|_\infty$ позначає норму H_∞ , що становить собою максимальне сингулярне значення на всіх частотах.

Управління методом ковзного режиму (SMC) відрізняється тим, що підводить стан системи до попередньо визначеної ковзної поверхні і підтримує його там, регулюючи робастність проти варіацій параметрів і зовнішніх збурень. Ковзна поверхня $S(x)$ зазвичай визначається так:

$$S(x) = Cx + Dx, \quad (1.16)$$

де C і D – параметри проектування. Закон управління потім розробляється для підтримки $S(x) = 0$, тим самим забезпечуючи, що траєкторії системи залишаються на ковзній поверхні.

Хоча техніки робастного управління значно підвищують надійність артилерійських систем, надаючи значні гарантії проти невизначеності, вони не позбавлені недоліків. H_∞ -контролери часто вимагають точного знання меж системи і можуть включати складні процедури синтезу, що робить їх складними для реалізації на практиці. Метод SMC хоча і дуже ефективний в уникненні збурень, однак може викликати високочастотне перемикання й ефекти тріску, що може призвести до надмірного механічного зношення компонентів артсистеми. Зауважуємо, що проектування і налаштування робастних контролерів вимагає

глибокого розуміння динаміки системи і моделей невизначеності, що ускладнює розробку контролера.

1.4.4. Контролери нечіткої логіки та нейронних мереж

Інтелектуальні підходи до управління, зокрема контролери нечіткої логіки FLC та контролери нейронних мереж NN, пропонують розширені можливості для обробки нелінійностей і невизначеностей, властивих артилерійським системам. FLC використовують евристичні правила, отримані з експертних знань, для інтерпретації неточних вхідних даних і прийняття рішень на основі лінгвістичних змінних. Базу нечітких правил можна виразити так:

$$\text{ЯКЩО Умова}_1 \text{ І Умова}_2 \text{ ТО Дія,} \quad (1.17)$$

де умови зазвичай визначаються за допомогою нечітких множин і функцій належності.

Контролери нейронних мереж використовують потенціал нейронних мереж для моделювання складної динаміки системи і адаптації до змінних умов. Типовий контролер NN складається з вхідного, прихованого і вихідного шарів, структура його розроблена для апроксимації бажаного керуючого відображення. Процес навчання містить налаштування значень мережі для мінімізації визначеної функції втрат, що часто має зворотне поширення:

$$\Delta w_{ij} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}}, \quad (1.18)$$

де Δw_{ij} означає оновлення значення, η – швидкість навчання, а E – термін помилкового значення. Ці інтелектуальні контролери пропонують підвищену гнучкість і можуть потенційно покращити надійність і точність артилерійських

операцій, ефективно керуючи нелінійною динамікою та адаптуючись до непередбачуваних збурень. Все ж деякі серйозні виклики є і в таких актуальних заявках. Наприклад, FLC вимагають всебічних і точних баз норм, які можуть бути складними для розробки та підтримки артилерійських систем. Водночас контролери NN вимагають значної обчислювальної потужності та великої кількості навчальних даних для досягнення надійної продуктивності, що може бути недоступним у всіх операційних контекстах. Крім того, властива нейронним мережам «чорна скринька» ускладнює забезпечення стабільності та передбачуваності, викликаючи занепокоєння щодо їхньої надійності в критичних застосуваннях.

1.4.5. Порівняльний аналіз і недоліки

Комплексне порівняння досліджених алгоритмів управління виявило тонкий компроміс між складністю, адаптивністю та надійністю. MPC пропонує високу адаптивність і надійність завдяки своїм прогностичним можливостям і обробці граничних значень, але обтяжений високими обчислювальними вимогами та чутливістю до точності моделі. Адаптивні методи управління досягають балансу із середньою складністю та високою адаптивністю, проте їхня надійність обмежена гострою потребою в забезпеченні стабільності та відповідності в умовах динамічних змін.

Методи робастного управління забезпечують високу надійність, гарантуючи продуктивність у широкому діапазоні невизначеностей, проте їхня складність реалізації та небезпека виникнення механічного зношення суттєво знижують їхню практичність. Інтелектуальні контролери, такі як FLC і системи NN, демонструють високу адаптивність і здатність ефективно керувати нелінійностями. Однак їхня залежність від значних обчислювальних ресурсів і навчальних даних та непостійна стабільність призводять до хиткої надійності, яка послабить деякі операційні сценарії.

Прикметно, що потреба в обробці в реальному часі є серйозною перешкодою для більшості наявних алгоритмів управління в артилерійських застосуваннях. Швидкі та точні коригування є критично важливими, і будь-яка затримка, викликана інтенсивно обчислювальними алгоритмами, такими як MPC або контролери NN, може погіршити ефективність і надійність системи. Інтеграція передових контролерів з наявними апаратними та програмними інфраструктурами часто створює додаткові перепони, зокрема проблеми сумісності та необхідність спеціалізованих інтерфейсів, що призведе до ще більшого зниження загальної надійності системи.

Відсутність стандартизованих меж для проєктування та оцінювання контролерів ускладнює вибір і оптимізацію відповідних стратегій управління для артилерійських систем. Кожен алгоритм управління може вимагати індивідуального налаштування та процесів валідації, ускладнюючи розробку та потенційно затримуючи розгортання в критичних ситуаціях. В таблиці 1.2 наведено результати аналізу порівняння алгоритмів управління для артилерійських систем.

Таблиця 1.2 – Порівняння алгоритмів управління для артилерійських систем

Алгоритм управління	Складність	Адаптивність	Надійність
Управління на основі прогнозування моделі	Висока	Висока	Висока
Адаптивне управління	Середня	Висока	Помірна
Робастне управління	Середня	Середня	Висока
Управління на основі нечіткої логіки	Середня	Висока	Помірна
Управління на основі нейронних мереж	Висока	Висока	Змінна
Гібридні системи управління	Висока	Дуже висока	Дуже висока

Джерело: розроблено автором

Таблиця 1.2 дає можливість розширювати характеристики початкового зіставлення, включаючи гібридні системи управління, які об'єднують кілька стратегій управління для використання їх оптимальних потенціалів. Вибір відповідної стратегії управління повинен враховувати специфічні вимоги до експлуатації, доступні обчислювальні ресурси та прийнятні компроміси між складністю та надійністю. Приймаючи цілісний та інтегративний підхід до розробки контролерів, можна досягти чітких стандартів надійності, необхідних для ефективних артилерійських операцій.

1.5. Методи підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності

Надійність артилерійських систем у сучасних військових операціях критично залежить від упровадження складних методів підтримки прийняття рішень, здатних ефективно вирішувати нагальні проблеми. Ця потреба стимулювала останні наукові дослідження, спрямовані на покращення моделей та методів управління засобами артилерії, оптимізацію меж симуляції для віртуальних артилерійських підрозділів у різних сценаріях. Фундаментальною частиною досліджень стало вдосконалення моделей і методів для контролю уражень цілей артилерією [3, 25, 26].

Традиційні артилерійські системи переважно беруть за зразок детерміністичні моделі, які часто недостатньо враховують багатогранні невизначеності, що переважають у бойових умовах, зокрема мобільність цілей, змінні умови навколишнього середовища та потенційні відкази системи. Для уникнення таких труднощів останні дослідження ввели ймовірнісні моделі, які включають стохастичні змінні, тим самим підвищуючи точність прогнозування та стратегії ураження цілей. Ці моделі використовують статистичні методи, приміром байєсівський висновок, для оцінювання ймовірнісної диференціації бойових результатів. Згадана байєсівська структура може бути виражена так:

$$P(\theta|D) = \frac{P(D|\theta)P(\theta)}{P(D)}, \quad (1.19)$$

де $P(\theta|D)$ – це апостеріорний розподіл параметрів стану цілі θ за даними D , $P(D|\theta)$ є ймовірністю спостереження даних за параметрами, $P(\theta)$ є апіорним розподілом, а $P(D)$ є маргінальною ймовірністю. Цей підхід дозволяє безперервно оновлювати ймовірності стану цілі на основі даних у реальному часі, тим самим підвищуючи адаптивність системи до динамічних умов поля бою.

Водночас оптимізація моделей симуляції для віртуальних артилерійських підрозділів у різних сценаріях стала важливим фактором для тестування та вдосконалення методів підтримки прийняття рішень. Ці симуляції відтворюють складні бойові умови, дозволяючи оцінювати ефективність артилерії за різних умов без притаманних ризиків у реалістичному тестуванні. Оптимізаційні техніки, включаючи генетичні алгоритми та підходи машинного навчання, були інтегровані в ці симуляційні структури для визначення оптимальних стратегій стрільби та ефективного розподілу ресурсів [55]. Наприклад, генетичний алгоритм може бути використаний для оптимізації рішення про стрільбу шляхом ітеративного розвитку популяції через процеси відбору та мутації. Цільова функція f , яку потрібно максимізувати або мінімізувати, може бути визначена так:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot T_i(x), \quad (1.20)$$

де w_i є важелем, що представляє цінність кожної цілі T_i , а x позначає набір змінних рішень, таких як кути стрільби та типи боєприпасів. Шляхом ітеративного налаштування параметрів та оцінювання отриманих результатів ці методи сприяють виявленню стратегій, які максимізують оперативну ефективність, мінімізуючи при цьому побічні пошкодження. Крім того, використання віртуальних середовищ у різних сценаріях гарантує масштабну та

гнучку платформу для вивчення систем підтримки прийняття рішень, формуючи баланс між теоретичними моделями та практичними застосуваннями.

Агентно-орієнтоване моделювання АВМ часто використовується для уявлення автономних властивостей як дружніх, так і ворожих підрозділів, що уможлиблює дослідження широкого спектру тактичних сценаріїв [56]. Дії кожного агента можуть керуватися комплексом правил або алгоритмів, які пропонують заходи відповідно до поточного стану середовища та взаємодій з іншими агентами. Типова структура АВМ може бути описана таким набором рівнянь, що керують динамікою агентів:

$$\begin{aligned} \frac{dx_i}{dt} &= v_i(t) \\ \frac{dv_i}{dt} &= F_i(x_i, v_i, \mathcal{A}), \end{aligned} \quad (1.21)$$

де x_i і v_i – положення та швидкість агента i відповідно, а F_i – це сила, що діє на агента і є функцією стану агента та дій \mathcal{A} всіх агентів у середовищі. Аналіз чутливості, проведений у цих симуляціях, визначає ключові змінні, які значно впливають на результати артилерійських зіткнень, тим самим інформуючи про розробку більш надійних систем підтримки прийняття рішень, здатних до передбачуваних та адаптивних відповідей на нові загрози.

Об'єднувальним фактором цих досліджень є інтеграція даних у реальному часі та адаптивних алгоритмів для підвищення надійності та стійкості артилерійських систем. Асиміляція показників з датчиків та розвідувальних звітів у структурі підтримки прийняття рішень сприяє безперервному оновленню моделей, водночас системи зберігають точність та ефективність в умовах змінюваних бойових умов. Алгоритми машинного навчання, особливо ті, що базуються на парадигмі навчання з експертом та підкріпленням, виявилися

важливими для формування шаблонів та кореляцій у значних наборах даних. Ці алгоритми можуть передбачати потенційні загрози та оптимізувати стратегії реагування, зважаючи на архівні дані та поточні операційні вхідні дані. Наприклад, підхід навчання з підкріпленням може бути сформульований так:

$$Q(s, a) = Q(s, a) + \alpha \left[r + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a) \right], \quad (1.22)$$

де $Q(s, a)$ – це якість дії a у стані s , α – це швидкість навчання, r – винагорода, отримана після виконання дії a , а γ – коефіцієнт дисконтування для майбутніх винагород. Ця структура дозволяє розробляти моделі, які керують артилерійськими підрозділами у виборі дій, що максимально спрямовані на успіх і мінімізацію втрат.

Міждисциплінарний характер цього дослідження підкреслює необхідність співпраці між військовими стратегами, науковцями у сфері обробки даних та інженерами. Ефективні системи підтримки прийняття рішень вимагають всебічного розуміння як технічних можливостей артилерійських систем, так і стратегічних імперативів військових операцій. Спільні зусилля призвели до розробки гібридних моделей, які безперешкодно інтегрують фізичні симуляції з алгоритмічними процесами прийняття рішень. Ці гібридні моделі використовують переваги детерміністичних симуляцій і ймовірнісних алгоритмів для створення більш цілісних і адаптивних систем. Наприклад, гібридна модель може поєднувати симуляцію траєкторій артилерійських снарядів [57] на основі методу скінченних елементів FEM з байєсівською мережею для оцінювання стану цілі, формуючи таким чином надійну структуру, яка враховує як фізичну динаміку, так і інформаційну невизначеність.

Без сумніву, розглянуті джерела інформації підкреслюють значні досягнення в методах ймовірнісного моделювання, які є ключовими для підвищення надійності артилерійських систем. Так моделі Монте-Карло та

методи Маркова ланцюга Монте-Карло МСМС, часто використовуються для кількісного оцінювання невизначеностей та поширення їх через складні моделі. Ці методи дозволяють вивчати розподіли ймовірностей роботи системи, констатуючи всебічне розуміння можливих варіацій продуктивності в різних сценаріях. Наприклад, моделювання Монте-Карло може бути використане для оцінювання впливу зміни параметрів навколишнього середовища на точність артсистем шляхом генерації значної кількості випадкових зразків з розподілів вхідних даних і обчислення остаточного розподілу точності виходу.

Аналогічно до ймовірнісного моделювання, техніки оптимізації теж відіграють важливу роль у розробці ефективних систем підтримки прийняття рішень. Лінійне та нелінійне програмування, цільове програмування та динамічна оптимізація належать до математичних інструментів, що використовуються для вирішення складних завдань прийняття рішень в артилерійських операціях. Ці границі оптимізації спрямовані визначити оптимальний розподіл ресурсів, зокрема типи боєприпасів і позиції для стрільби, для досягнення конкретних оперативних цілей відповідно до можливостей, пов'язаних з логістикою, безпекою та стратегічними планами. Наприклад, підхід лінійного програмування може бути реалізований для мінімізації загальних витрат на боєприпаси, забезпечуючи при цьому ураження цілей з певним рівнем гарантії. Це виражено так:

$$\begin{array}{ll} \text{Мінімізувати} & \sum_{i=1}^n c_i x_i \\ \text{За умови} & \sum_{i=1}^n a_{ij} x_i \geq b_j, \forall j \\ & x_i \geq 0, \forall i \end{array} \quad (1.23)$$

де c_i – вартість певного типу боєприпасів i , x_i – кількість певного типу боєприпасів i , що буде розподілена, a_{ij} означає ефективність певного типу боєприпасів i проти цілі j , а b_j – це оптимально необхідна ефективність проти цілі j .

Залучення високоточних симуляцій додатково підвищує рівень підтримки прийняття рішень, надаючи детальну інформацію про бойову динаміку артилерійських систем. Високоточні симуляції включають точні фізичні моделі та детальні взаємодії з навколишнім середовищем, що дозволяє досліджувати широкий спектр операційних сценаріїв з високим ступенем практичності. Такі симуляції є важливими для валідації теоретичних моделей та оптимізаційних рішень, адже гарантують ефективність в реальних умовах. Крім того, використання віртуальних середовищ і цифрових двійників – динамічних цифрових представлень фізичних систем – сприяє безперервному тестуванню та вдосконаленню алгоритмів підтримки прийняття рішень, що призводить до ітеративного поліпшення та адаптивного навчання.

Отже, надійність артилерійських систем значно підвищується завдяки постійним досягненням у методах підтримки прийняття рішень, розроблених для ефективного керування факторами невизначеності. Конвергенція ймовірнісного моделювання, технік оптимізації та високоточних симуляцій призвела до створення більш точних і стійких систем, здатних орієнтуватися в складних завданнях сучасної війни. Показники в реальному часі та адаптивні алгоритми, формуючи чинники підтримки прийняття рішень, забезпечують реактивність та ефективність артилерійських систем в умовах динамічно змінюваних бойових обставин.

Під час вивчення математичних основ ймовірнісного моделювання в системах підтримки прийняття рішень для артилерійських систем важливо заглибитися в конкретні методології, які сприяють обробці невизначеності. Однією з таких методик є використання прихованих марковських моделей НММ, які особливо ефективні в ситуаціях, коли стан цілі або середовища не є безпосереднім об'єктом спостереження. НММ можна визначити за допомогою набору прихованих станів $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$, спостережуваних подій $O = \{o_1, o_2, \dots, o_M\}$, ймовірностей переходу $A = \{a_{ij}\}$, де $a_{ij} = P(s_j | s_i)$, та

ймовірностей емісії $B = \{b_j(k)\}$, де $b_j(k) = P(o_k|s_j)$. Метою в межах НММ часто є визначення найбільш ймовірної послідовності прихованих станів з врахуванням черговості спостережень, що можна досягти за допомогою алгоритму Вітербі:

Ініціалізувати $\delta_1(i) = \pi_i b_i(o_1)$ для кожного стану i . Ініціалізувати $\psi_1(i) = 0$ для кожного стану i .
 $\delta_t(j) = \max_{1 \leq i \leq N} [\delta_{t-1}(i) a_{ij}] \cdot b_j(o_t)$
 $\psi_t(j) = \operatorname{argmax}_{1 \leq i \leq N} [\delta_{t-1}(i) a_{ij}]$. Завершення: $P^* = \max_{1 \leq i \leq N} \delta_T(i)$
 $q_T^* = \operatorname{argmax}_{1 \leq i \leq N} \delta_T(i)$. Відстеження шляху для знаходження $q_1^*, q_2^*, \dots, q_T^*$.

Цей алгоритм ефективно визначає найбільш ймовірну послідовність станів, які можуть представляти позиції цілей або рівень загрози, тим самим інформуючи про оптимальні артилерійські відповіді.

1.6. Постановка завдань дослідження

Запропонований у розділах 1.1–1.5 матеріал було систематизовано відповідно до визначених аспектів функціонування артилерійських систем в умовах динамічних збурень. На підставі проведеного аналізу було сформульовано основну мету дисертаційного дослідження, яка полягає у підвищенні надійності артилерійських систем шляхом розробки та вдосконалення алгоритмічного та інформаційного забезпечення АСК з використанням методів імітаційного моделювання процесів зношення, діагностики та ефективності функціонування артилерійських систем на основі об'єктно-орієнтованого підходу.

Сучасні артилерійські системи функціонують в умовах різноманітних динамічних збурень, таких як рухомі або маневруючі цілі, зміна позиції вогню, вплив погодних умов (вітер, температура), випадкові відхилення балістичних характеристик пострілу тощо. В таких умовах досягнення високої точності вогню та ефективності ураження цілей потребує врахування багатьох факторів у реальному часі. Проведення експериментів на полігоні для кожної комбінації умов є вартісним та небезпечним завданням, водночас аналітичні розрахунки стають надзвичайно складними при врахуванні нелінійних та стохастичних

факторів. Тому застосування імітаційного моделювання є оптимальним підходом для дослідження роботи артилерійських систем у складних динамічних ситуаціях.

Обґрунтовано нами обрано підхід дискретно-подієвого симуляційного моделювання, в якому перебіг процесу стрільби пропонується як черговість станів системи та подій (постріли, перезаряджання, зміна позиції, корекція наведення), що відбуваються у часі і просторі. Такий вектор дозволяє відобразити логіку роботи системи (циклічність пострілів, прийняття рішень про коригування вогню) та врахувати випадкові збурення у вигляді стохастичних затримок чи розподілів ймовірностей. Крім того, симуляційна модель забезпечує можливість перевірки різних сценаріїв (наприклад, різних швидкостей руху цілі, інтенсивності вітру, ступеня зношеності ствола) без ризику та з мінімальними затратами.

Розроблена модель особливо необхідна для аналізу роботи АСУВ артилерії. В умовах високої маневреності бойових дій (швидка зміна вогневих позицій, контрбатарейна боротьба) час на наведення та корекцію вогню обмежений секундами. Під загрозою контрбатарейного обстрілу артилерійський підрозділ мусить уразити ціль якомога меншою кількістю пострілів і в найкоротший час, щоб встигнути змінити позицію до того, як буде накритий ворожим вогнем. Динамічні збурення, на кшталт зміни параметрів пострілу або рух цілі, можуть призвести до промахів, якщо система управління не реагує своєчасно. Імітаційна модель дозволяє дослідити, як різні алгоритми управління (наприклад, алгоритми випередження рухомої цілі або автоматичного введення поправок за вимірною початковою швидкістю снаряда) впливають на ймовірність влучання та витрату боєприпасів. Таким чином, моделювання є невід'ємним інструментом для обґрунтування необхідності вдосконалення АСК та відпрацювання нових підходів безпосередньо перед впровадженням їх у наявні системи.

Для побудови симуляційної моделі обрано ООП, оскільки він забезпечує модульність, доступну структуризацію та можливість багаторазового використання компонентів моделі. Артилерійська система є складним

комплексом взаємопов'язаних компонентів (гармати, снаряди, прицільні пристрої, датчики, обчислювальні підсистеми, ціль, зовнішнє середовище тощо). ООП дозволяє кожен з цих компонентів подати у вигляді окремого класу з притаманними йому властивостями (атрибутами) та дієвістю (методами). Це сприяє природному відображенню реальної структури системи у моделі та спрощує внесення змін чи розширення моделі.

При об'єктно-орієнтованому моделюванні визначено ключові класи: клас **Gun** (гармата) для представлення артилерійської гармати, клас **Projectile** (снаряд) для рухомого снаряду, клас **Target** (ціль) для опису цілі та її руху, клас **Environment** (середовище) для моделювання зовнішніх впливів (вітер, погодні умови), клас **FireControlSystem** (АСК вогнем) як центральний координатор дій, що містить алгоритми наведення та аналізу пострілу, та інші допоміжні класи (наприклад, **Sensor** для датчиків, **BallisticsCalculator** для розрахунків траєкторії). Класи взаємодіють між собою через інтерфейси: наприклад, **FireControlSystem** може потребувати методів **Gun** для виконання пострілу, отримувати дані від **Sensor** про параметри пострілу, запитувати **Target** щодо поточного положення цілі тощо.

Така організація моделі підвищує її практичність: можна легко замінити або змінити окремий компонент (наприклад, реалізувати інший алгоритм наведення в класі **FireControlSystem** чи додати новий тип **Sensor** без впливу на інші частини системи. До того ж об'єктно-орієнтоване моделювання полегшує проведення модульного тестування компонентів та налагодження роботи системи в цілому. Використання UML-діаграм на етапі проєктування дозволило чітко визначити склад об'єктів моделі та сценарії їх взаємодії, що забезпечує коректність та адаптованість імітації перед її реалізацією у програмному кодї.

На рис. 1.1 зображено UML-діаграму класів розробленої моделі. Вона відображає основні класи та зв'язки між ними. Зокрема, клас **FireControlSystem** пов'язаний з класом **Gun** (або декількома, якщо моделюється підрозділ з кількох

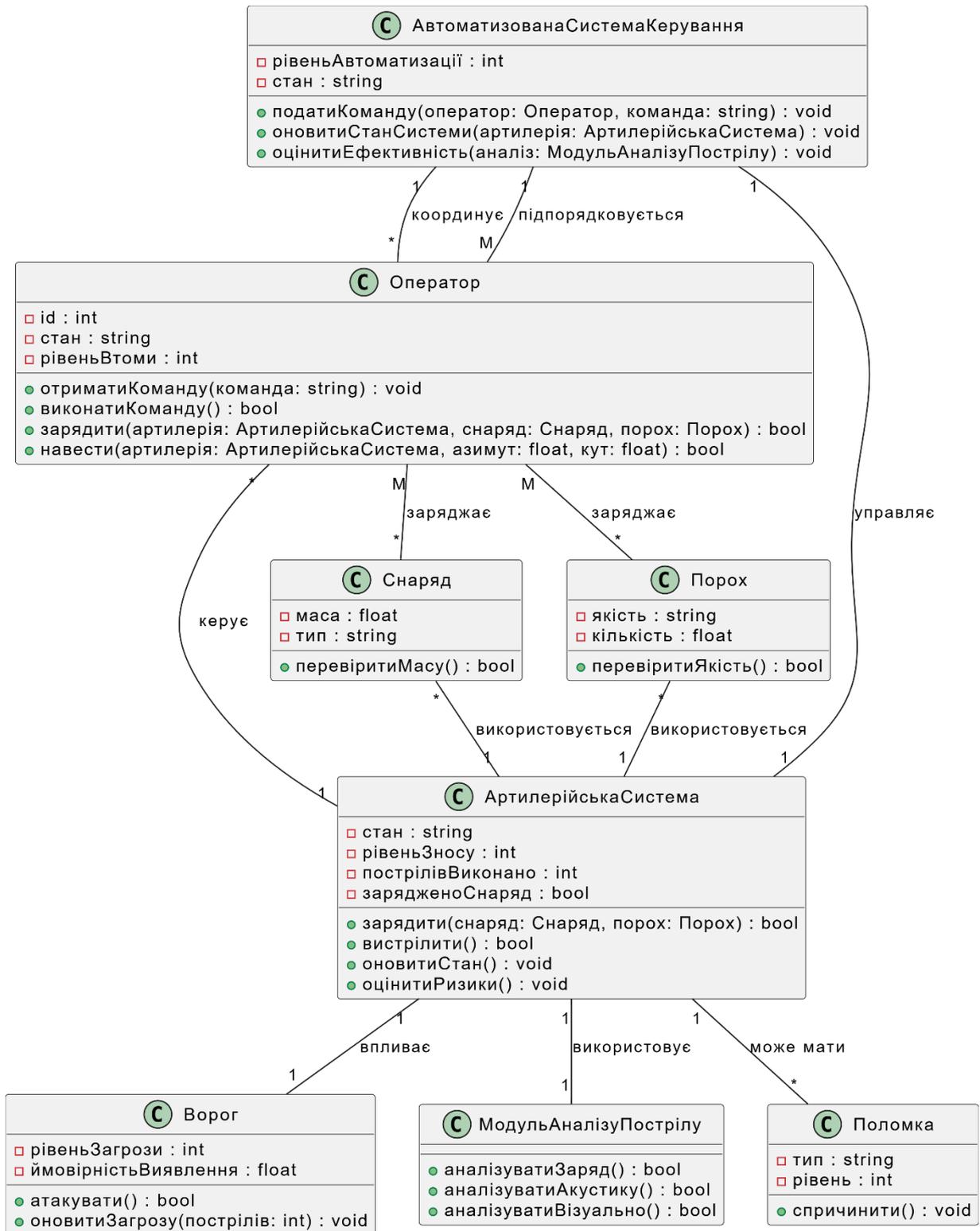


Рис. 1.1. – UML-діаграма класів симуляційної моделі артилерійської системи.

Джерело: розроблено автором

гармат) та класом **Sensor**; **Gun** асоційований із **Projectile** (снаряд випускається гарматою) та може містити вбудований **Sensor** для вимірювання параметрів пострілу (наприклад, радара початкової швидкості); **FireControlSystem** також взаємодіє з класом **Target**, отримуючи оновлені координати рухомої цілі, і може враховувати вплив зовнішнього середовища через клас **Environment**. Діаграма класів демонструє статичну структуру системи: які класи існують, які атрибути та операції вони мають, та як вони пов'язані (агрегацією, композицією чи асоціацією). Така діаграма є основою для реалізації моделі, оскільки визначає усі необхідні об'єкти та їх взаємозв'язки.

На рис. 1.2 представлено діаграму послідовності, що ілюструє обмін повідомленнями між основними об'єктами моделі під час виконання пострілу. Об'єктами взаємодії є: **FireControlSystem** (центральна підсистема управління), **Gun** (гармата), **Sensor** (датчик, що фіксує параметри пострілу) та **Target** (ціль). Послідовність взаємодії починається з того, що **FireControlSystem** отримує від **Target** інформацію про поточне положення цілі та розраховує необхідні установки для стрільби (кут наведення, заряд тощо).

Далі **FireControlSystem** віддає команду **Gun** на виконання пострілу. Після пострілу датчик **Sensor**, закріплений на гарматі (або на снаряді чи поблизу позиції), вимірює фактичні параметри пострілу (наприклад, початкову швидкість снаряда, напрямок пострілу або акустичний профіль пострілу).

Ці дані передаються назад до **FireControlSystem**, який виконує аналіз: чи влучено в ціль, а якщо ні – визначає необхідність корекції. На діаграмі показано варіант, коли постріл не влучає в ціль: **FireControlSystem** ухвалює рішення про коригування наведення (або, за наявності кількох гармат, може відзначити цю гармату як таку, що дала неефективний постріл) і ініціює виконання наступного пострілу з поправками. Цикл повторюється, доки ціль не буде уражена. Діаграма послідовності таким чином відображає динамічний аспект роботи системи,

показуючи порядок застосування методів та передачі інформації між об'єктами у процесі стрільби.

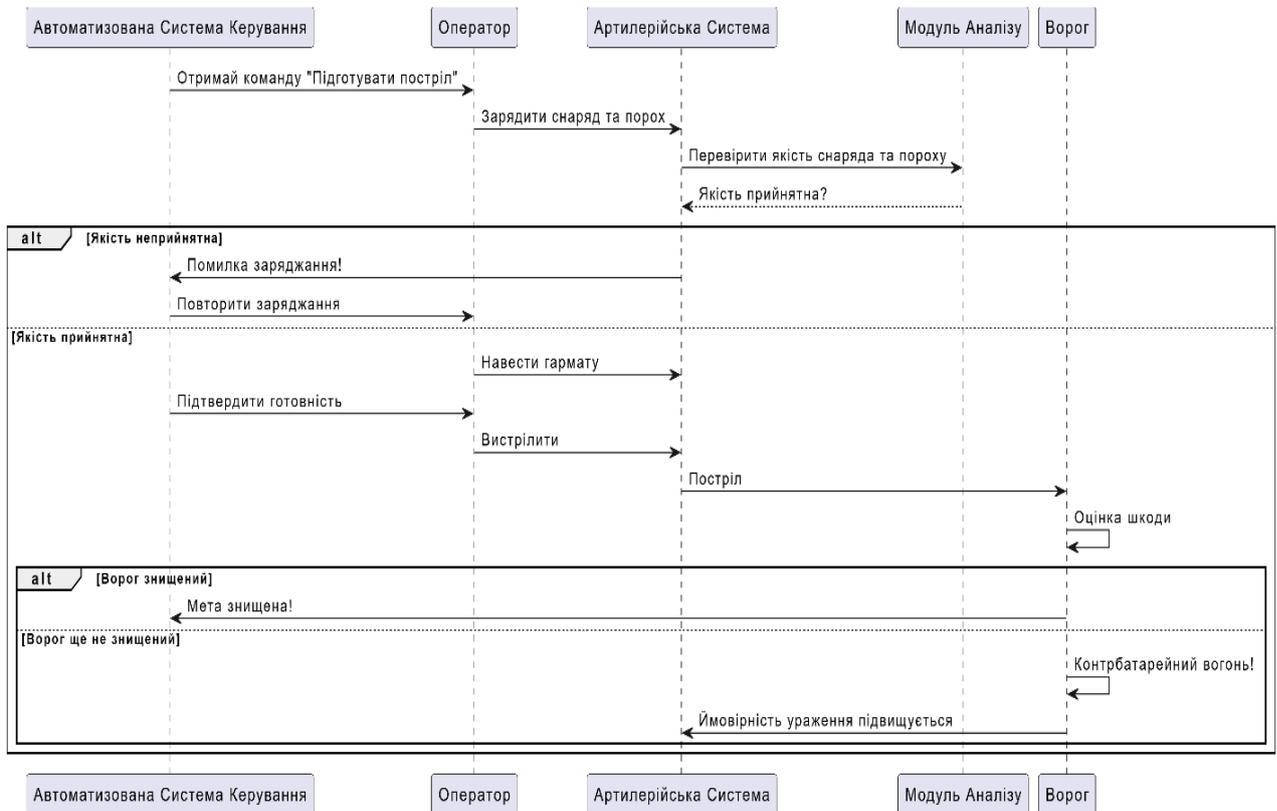


Рис. 1.2. – UML-діаграма послідовності для процесу пострілу та корекції вогню.

Джерело: розроблено автором

На рис. 1.3 наведено діаграму активності, що представляє алгоритм дій АСК вогнем при ураженні цілі. Діаграма активності подібна до блок-схеми, де відображені етапи процесу та різноманіття умов. Алгоритм починається з отримання початкових даних про ціль (її координати, параметри руху). Наступним кроком є обчислення необхідних параметрів стрільби (визначення кута наведення, заряду тощо) з урахуванням усіх наявних даних включно з інформацією про динамічні збурення (наприклад, поправки на вітер або рух цілі). Після цього виконується дія «Постріл». Далі система переходить до дії «Аналіз результатів пострілу», де отримуються показники від датчиків (чи досяг снаряд

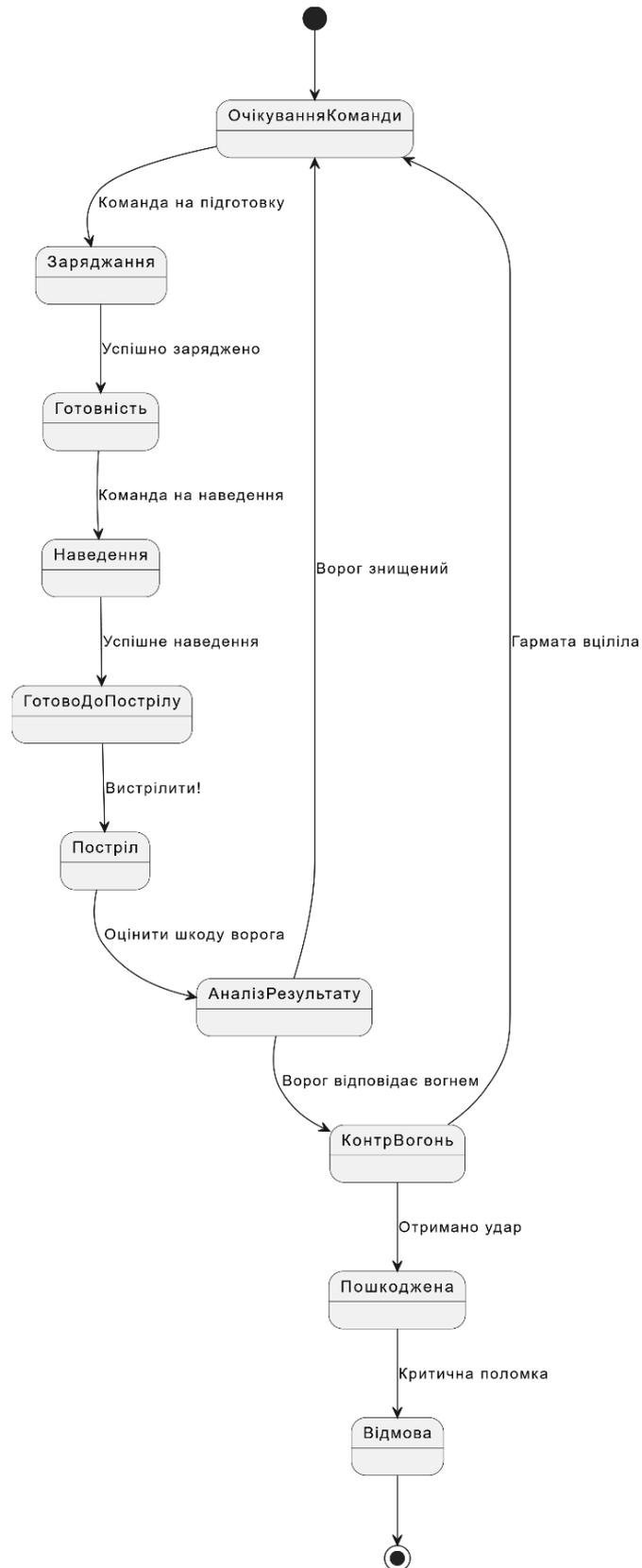


Рис. 1.3. – Діаграма активності алгоритму ураження динамічної цілі із корекцією пострілів. Джерело: розроблено автором

цілі, яка була точка влучання, яка була початкова швидкість фактично тощо). На основі цих даних відбувається перевірка умови «Ціль уражена?». Якщо умова істинна (ціль знешкоджено), процес завершується (переходить у кінцевий стан). Якщо ж ціль не уражена, виконується дія «Коригування» – система вносить необхідні поправки: уточнює балістичні розрахунки, можливо, враховує відхилення початкової швидкості, зміщення точки влучання тощо – і повертається на етап обчислення параметрів для наступного пострілу. Таким чином, діаграма активності відображає цикл прийняття рішень і дій системи для досягнення мети (ураження цілі).

Вона наочно демонструє логіку алгоритму роботи АСУ, особливо підкреслюючи місця, де відбувається обробка інформації про постріл та ухвалення рішення про повторне відкриття вогню чи припинення стрільби.

Симуляційна модель процесу стрільби представлено у вигляді дискретного стохастичного процесу, станами якого є ситуації на певний момент. Перехід між станами відбувається під впливом чинників пострілу та його результатів. Формально множинність станів системи можна визначити як $S = \{S_0, S_1\}$, де S_0 відповідає стану «ціль не уражена (продовження стрільби)», а S_1 – стан «ціль уражена (місія виконана)». Стан S_1 є поглинаючим, тобто після переходу в S_1 процес завершується.

Ймовірності переходу між станами при виконанні одного пострілу можна описати матрицею переходів Маркова P :

$$P = \begin{pmatrix} P_{00} & P_{01} \\ P_{10} & P_{11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - p_h & p_h \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1.24)$$

де $p_h = P_{01}$ – ймовірність уразити ціль одним пострілом за заданих умов (ймовірність переходу з S_0 в S_1), а $1 - p_h = P_{00}$ – ймовірність, що після пострілу ціль залишиться неураженою (перехід з S_0 назад в S_0). У такій моделі без

урахування адаптації ймовірність p_h вважається постійною для кожного пострілу, і ймовірність уразити ціль хоча б з другого пострілу дорівнює:

$$P(\text{ціль уражена за два постріли}) = p_h + (1 - p_h) p_h = 2p_h - p_h^2.$$

З іншого боку, застосування алгоритму коригування після першого промаху може підвищити ймовірність влучання при повторному пострілі до значення $p'_h > p_h$. У такому разі ймовірність уразити ціль протягом двох пострілів зростає до

$$P'(\text{ціль уражена за два постріли}) = p_h + (1 - p_h) p'_h,$$

що є успішнішим за випадок без коригування (оскільки $p'_h > p_h$). Таким чином, математично підтверджується ефективність адаптивних алгоритмів: кожна ітерація пострілу за рахунок врахування інформації про попередній постріл має більшу ймовірність успіху, ніж попередня.

Окрім ймовірнісних переходів між дискретними станами «ціль уражена/не уражена», симуляційна модель включає фізичні обчислення траєкторії снаряда та впливу факторів. Для розрахунку траєкторії використовуються відомі балістичні співвідношення. Наприклад, максимальна дальність пострілу на рівні землі (для ідеального випадку без опору повітря) визначається формулою:

$$R = \frac{v_0^2}{g} \sin 2\theta, \quad (1.25)$$

де v_0 – початкова швидкість снаряда, θ – кут підвищення ствола (кут між стволом і горизонтом), g – прискорення вільного падіння. З цієї формули випливає, що навіть невелика зміна v_0 суттєво впливає на дальність R (через квадрат

залежності). Диференціюванням виразу можна оцінити значення дальності відповідно до зміни швидкості:

$$\frac{\Delta R}{R} \approx 2 \frac{\Delta v_0}{v_0}, \quad (1.26)$$

тобто відхилення початкової швидкості на Δv_0 (у відсотках) призводить до приблизно вдвічі більшого відсоткового відхилення дальності. Наприклад, зниження v_0 на 5% може дати приблизно 10% зменшення дальності пострілу. Таким чином, динамічні збурення, пов'язані з випадковими відхиленнями початкової швидкості (через зношеність ствола, температуру заряду тощо), можуть істотно змінити траєкторію. Це обґрунтовує необхідність врахування таких збурень у моделі. У симуляційній моделі такі фактори реалізуються шляхом випадкового варіювання параметрів пострілу згідно з заданими ймовірнісними законами (наприклад, певним розподілом, що зумовлює відхилення швидкості). Переходи між станами моделі при цьому отримують стохастичний характер: ймовірність p_h фактично визначається так:

$$p_h = P(\text{влучання} \mid v_0, \text{вітер, рух цілі, } \dots), \quad (1.27)$$

тобто є функцією, залежною від низки випадкових величин. Модель здійснює Монте-Карло випробування для кожного пострілу, генеруючи випадкові значення v_0 , параметрів вітру, зміщення цілі за час польоту тощо, після чого обчислює, чи трапилося влучання (задовольняється умова потрапляння снаряда в ділянку цілі). Такий підхід дозволяє кількісно оцінити ймовірність влучання та розподіл довільних станів системи після кожного пострілу.

Для наочності розглянемо вплив динамічних факторів на результат стрільби. Перший приклад стосується динамічної цілі: нехай артилерійський

снаряд летить до цілі приблизно $T = 20$ с, що відповідає великій дальності пострілу. За цей час ціль, рухаючись із певною швидкістю $v_{ц}$, зміститься на відстань $d = v_{ц} \cdot T$ від початкового положення. Якщо не врахувати це зміщення під час прицілювання, снаряд влучить у точку, де ціль була на момент пострілу, і промахнеться на відстань d . У таблиці 1.3 наведено значення зміщення цілі для різних швидкостей руху (0–10 м/с) за час польоту 20 с та наслідки для влучання при відсутності випередження.

Таблиця 1.3 – Вплив руху цілі на точність стрільби (приклад розрахунку)

Швидкість цілі $v_{ц}$, м/с	Час польоту T , с	Зміщення цілі d , м	Результат без врахування руху
0	20	0	Влучання в ціль (статична ціль)
2	20	40	Промак: точка влучання відстає від цілі на 40 м
5	20	100	Значний промах (ціль перемістилася на 100 м)
10	20	200	Ціль змістилася на 200 м; снаряд не вражає ціль

Джерело: розроблено автором

Другий приклад ілюструє вплив випадкового відхилення початкової швидкості пострілу на дальність влучання. Припустимо, що ціль знаходиться на граничній дальності приблизно 20 км для обраної гармати при номінальній початковій швидкості $v_0 = 800$ м/с (кут підвищення обрано оптимальним). Якщо снаряд випущено за ідеальних умов з $v_0 = 800$ м/с, він досягає цілі (умовно $R \approx 20,0$ км). Однак, якщо фактична початкова швидкість виявилась меншою, наприклад 780 м/с (навіть при тих самих установках кута), снаряд пролетить меншу відстань, близько 19 км, і впаде, не долітаючи до цілі приблизно 1000 м. Натомість, з дещо більшою швидкістю 820 м/с снаряд перелетить ціль на 1 км. Таблиця 1.4 узагальнює і демонструє цей приклад. Розрахунки виконано за

спрощеною балістичною моделлю без врахування опору повітря (за наведеною вище формулою для дальності пострілу).

Наведені розрахункові приклади підтверджують критичний вплив динамічних збурень на результативність стрільби та актуальність завдань їх компенсації. З таблиці 1.3 видно, що вже при відносно невеликій швидкості руху цілі (5 м/с) зсув точки влучання без виправлення становить близько 100 м, що значно перевищує допустиму похибку для ураження цілі (радіус зони ураження

Таблиця 1.4 – Вплив відхилення початкової швидкості на дальність пострілу

Початкова швидкість v_0 , м/с	Дальність R , км	Відхилення від цілі, м	Умови пострілу
800	20,0	0	Номінальні умови (ціль на межі дальності)
780	19,0	-1000	Снаряд впав ближче від цілі (недоліт)
820	21,0	+1000	Снаряд перелетів ціль (переліт)

Джерело: розроблено автором

боєприпасу значно менший). Отже, ігнорування руху цілі призводить до гарантованого промаху. Для успішного ураження необхідно застосовувати алгоритми випередження – автоматично прогнозувати положення динамічної цілі на момент влучання снаряда та, відповідно, коригувати прицілювання ще до пострілу. Це завдання важко точно виконати людині в режимі реального часу, особливо коли ціль маневрує, тому автоматизація цього процесу в АСУ є вкрай необхідною.

Результати таблиці 1.4 демонструють, що випадкові відхилення балістичних параметрів пострілу можуть нівелювати зусилля з точного наведення. Якщо кожен постріл має дещо різну початкову швидкість через неконтрольовані фактори, то без вимірювання цієї швидкості та поправок траєкторії навіть статична ціль може бути не уражена з першого пострілу.

Практично ці проблеми вирішуються шляхом обладнання сучасних гармат датчиками початкової швидкості снаряда або системами обчислення траєкторії за даними про постріл (приміром, акустичними або радарними комплексами). Дані з таких датчиків надходять до АСУ, що дозволяє автоматично оцінити, наскільки реальний постріл відхиляється від номінального, і ввести корективи перед наступним пострілом. Без подібної автоматизації розрахунку стрільби розраховувати на високу ймовірність влучання з першого пострілу складно, і артилеристам доводиться витратити час на пристрілювання (стрільбу для коригування). Це підтверджує актуальність розробки моделей і алгоритмів, які б інтегрували інформацію про кожен постріл та оперативно коригували прицілювання. Результати прикладів однозначно вказують на те, що традиційні методи стрільби без автоматизованої корекції не забезпечують потрібної ефективності в динамічних умовах. Це дозволяє чітко сформулювати напрямки подальших досліджень і практичних розробок, спрямованих на покращення результатів стрільби за рахунок компенсації впливу динамічних збурень. На основі отриманих результатів необхідно вирішити низку завдань.

Перше завдання полягає у вдосконаленні імітаційних моделей зношення артилерійських стволів і зарядних камер з урахуванням акустичних та візуальних полів [7], що утворюються при пострілі. Як продемонстровано розрахунками, навіть незначні коливання початкової швидкості снаряда мають критичний вплив на точність влучання. Наявні моделі зношення та деградації артилерійських систем часто не враховують ці специфічні фактори, що знижує точність прогнозування реального стану артилерійських систем і, відповідно, точність стрільби. Запропоновані вдосконалені моделі мають враховувати акустичні та візуальні ознаки зношення, такі як звукові коливання та зміни форми і об'єму порохових газів [23, 24], дозволяючи оперативно діагностувати зношеність стволів і зарядних камер за миттєвою швидкістю снаряда та параметрами газових

викидів. Це створить підґрунтя для точного автоматичного коригування траєкторії снаряда ще на етапі прицілювання [10].

Друге завдання полягає у створенні алгоритмічного та інформаційного забезпечення для підтримки заданого рівня надійності АСУ в умовах динамічних змін бойової ситуації. Наведені приклади свідчать, що традиційні алгоритми управління артилерійськими системами [12] не завжди здатні адекватно реагувати на швидкі зміни позиції цілі та випадкові варіації балістичних характеристик пострілу. Тому необхідно розробити нові алгоритми, які базуються на Марківських процесах [26] і симуляційних методах [25], та дозволяють адаптивно коригувати параметри управління з урахуванням поточної ситуації. Такі алгоритми забезпечать автоматичний розрахунок випередження [27, 29], прогнозування положень динамічних цілей та компенсацію непередбачуваних відхилень початкових швидкостей снарядів, суттєво збільшуючи ймовірність точного ураження навіть у складних та змінних умовах бойової обстановки [28, 30].

Третє завдання передбачає створення методів моніторингу станів артилерійських гармат на основі аналізу акустичних сигналів та візуалізації розширення порохових газів [33] в навколишньому середовищі [35], що виникають під час пострілу. Результати моделювання підтверджують необхідність оперативної діагностики реальних параметрів кожного пострілу для внесення миттєвих коректив [34, 36] у траєкторію снаряда. Розробка системи, яка здатна обробляти акустичні сигнали та здійснювати візуальну реєстрацію розширення порохових газів, дозволить проводити верифікацію результатів кожного пострілу та своєчасно виявляти відхилення від заданих параметрів [32]. Такі методи дозволять значно підвищити ефективність управління бойовою роботою артилерійських підрозділів, скоротити витрати часу та ресурсів на пристрілювання та забезпечити стабільну ефективність стрільби в динамічних умовах ведення бойових дій.

Отже, розроблені завдання є логічним продовженням аналізу отриманих результатів і спрямовані на суттєве покращення надійності й ефективності функціонування артилерійських систем в умовах динамічних збурень.

РОЗДІЛ 2. ІНФОРМАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗНОСУ АРТИЛЕРІЙСЬКИХ СТВОЛІВ

2.1 Аналіз методів до моделювання зношення артилерійських стволів і зарядних камор

Відомо, що живучість артилерійського ствола (ресурс пострілів до втрати боєздатності) визначається сукупною дією термічних (хімічних) та механічних факторів зношення [7]. Механічне спрацювання внутрішньої поверхні каналу ствола включає ударно-абразивну зношеність від вривання ведучих поясків снаряда в нарізи та фрикційне тертя під час руху снаряда по каналу. Теплова ерозія виникає внаслідок високотемпературної дії порохових газів і хімічного впливу продуктів згоряння на матеріал каналу ствола. Поєднання цих процесів призводить до поступового збільшення діаметра каналу ствола (вишаровування хрому, вигоряння та ерозія сталі), що знижує початкову швидкість снаряда та точність стрільби і врешті обмежує ресурс ствола [7, 58]. Найвизначнішими дослідженнями встановлено, що інтенсивне руйнування внутрішньої поверхні відбувається в ділянці початку нарізів (близько 100 мм від казенного зрізу) та на ділянці 150–350 мм від казенного зрізу, після чого швидкість зношення зменшується. Фактично процес зношення каналу ствола має дві стадії [7]: спочатку зношується захисне хромове покриття каналу, а потім інтенсивно зношується матеріал сталі ствола. Критичне збільшення калібру (наприклад, перевищення діаметра каналу на 1 мм) для малокаліберного зразка [58] визначає кінець ресурсу і потребу заміни ствола.

Для підвищення зносостійкості каналу ствола традиційно застосовується хромування нарізів, проте навіть із покриттям ресурс ствола є обмеженим певною кількістю пострілів. Класичні підходи до оцінювання зношеності стволів базуються на регламентованих стрільбах та обмірах каналу спеціальними калібрами (вимірювання збільшення діаметра камори та нарізів). Такий прямий контроль є точним, але потребує вилучення гармати з експлуатації, адже не може

здійснюватися під час бойового застосування. Іншим опосередкованим показником є зміна балістичних характеристик: зменшення початкової швидкості v_0 снаряда зі зростанням кількості пострілів. Для заданого типу гармати та боєприпасів існує граничне падіння початкової швидкості (близько 8–10%), при перевищенні якого ствол вважається непридатним для подальшого використання [7]. Зокрема, в техніці оцінювання зношеності за результатами стрільби запропоновано розраховувати очікувану швидкість снаряда за параметрами пострілу та порівнювати з фактичною швидкістю (визначеною, наприклад, радаром або іншими засобами). Якщо різниця перевищує 8%, робиться висновок про критичне зношення каналу ствола. Подібний критерій використано в [7], де запропоновано акустичний метод оцінювання зношеності: виміряні параметри звукових хвиль пострілу конвертуються у швидкість снаряда, яка порівнюється зі штатною довідниковою швидкістю для нової гармати; відхилення понад 8% свідчить про значне спрацювання ствола.

Таким чином, вимірювання балістичних параметрів пострілу (передусім початкової швидкості) є інформативним непрямим показником зношеності [7]. Традиційно для цієї мети застосовувалися балістичні радари, здатні точно визначати швидкість снаряда. Проте радарні станції є дорогавартісними, громіздкими та випромінюють активний сигнал, що може демаскувати позицію артилерії [23]. Сучасні тенденції спрямовані на розвиток пасивних методів контролю, які не потребують спеціальних вбудованих датчиків у стволі і можуть працювати безпосередньо під час навчально-бойових стрільб. З 2016 р. активно досліджуються акустичні та оптичні (візуальні) методи дистанційної діагностики стану стволів [24].

До механізмів пасивного контролю належить аналіз звукового поля пострілу. Постріл супроводжується утворенням двох основних акустичних хвиль: ударної хвилі від надзвукового руху снаряда (балістична хвиля) та дульної хвилі від розширення порохових газів під час вильоту з каналу ствола [6]. Параметри

цих хвиль залежать від початкової швидкості та тиску порохових газів, а отже – опосередковано від стану ствола. У роботі [6] запропоновано метод оцінювання зношення стволів за акустичними сигналами пострілу. Встановлено, що спектрально-часові характеристики звуку пострілу змінюються при зношенні: зокрема, постріл із зношеного ствола акустично еквівалентний пострілу зі ствола меншого калібру (за інших рівних умов). Це пояснюється тим, що збільшення об'єму камери та каналу внаслідок зношення призводить до зниження тиску і швидкості газового викиду, подібно до малокаліберної зброї з меншою металюною силою. У межах даного підходу побудовано імітаційну модель генерації ударної та дульної хвиль за різних рівнів зношеності, що дозволило сформулювати вибірку синтезованих сигналів для «нового» та «зношеного» стволів. На основі аналізу цих сигналів виділено низку інформативних ознак акустичного поля пострілу: амплітуди і тривалості фронтів ударної та дульної хвиль, характеристичні частоти спектра, статистичні моменти (скошеність, ексцес) спектральної щільності тощо. В дослідженні показано, що за допомогою методу опорних векторів (SVM) можна класифікувати стволи на справні та зношені з вірогідністю 94% . Такий рівень точності ще не повністю відповідає вимогам практики (потрібна ймовірність правильного визначення 99%). Однак метод акустичного контролю має суттєві переваги: він швидкий, пасивний (не випромінює сигналів), може реалізовуватися простими мікрофонами і обчислювачем, сумісний із будь-якими стрільбами без спеціальної підготовки. У табл. [2.1] наведено порівняння характеристик різних підходів до оцінювання зношеності стволів.

У табл. 2.1 видно, що сучасні тенденції спрямовані на комбінування різних полів (акустичного та оптичного) для підвищення достовірності діагностики. Зокрема, одним з шляхів поліпшення акустичного методу є доповнення його аналізом візуальних факторів пострілу [23, 24]. Візуальним полем пострілу

називають досліджувані явища під час пострілу, насамперед дульне полум'я (спалах) та димовий факел. Наявність і характер дульного полум'я залежать від

Таблиця 2.1 – Існуючі підходи до оцінки зношеності артилерійських стволів

Метод	Переваги	Недоліки
Прямі вимірювання (калібри, ендоскопія)	Висока точність геометричних даних; достовірна оцінка ерозії	Потребує вилучення гармати з експлуатації; неможливий в польових умовах під час бою
Балістичні радари, датчики тиску	Точне визначення швидкості снаряда, тиску тощо; кореляція зі зношенням	Коштовне обладнання; активне випромінювання (демаскування); складність встановлення на гарматі
Акустичний аналіз сигналів пострілу [6]	Пасивність, дешевизна, можливість автоматизації; застосування в реальних стрільбах	Певна похибка оцінки (до 6%); залежність від перешкод (шуму довкілля); потребує вдосконалення для досягнення вимог
Аналіз візуальних проявів (дульне полум'я)	Пасивність; додаткова інформація про хімічні процеси; підвищує точність у поєднанні з акустикою	Потребує спеціальної камери (особливо вночі); сам по собі не дає повної картини зношеності; залежність від освітленості
Комплексний (акустика + оптика)	Максимальна інформативність; висока ймовірність правильної діагностики (>95–99%)	Складність суміщення різних датчиків; збільшення обчислювальних вимог; потреба валідації моделі

Джерело: розроблено автором

хімічних процесів згоряння порохового заряду і можуть слугувати індикатором стану «ствол-заряд». Так, у роботі [23] акцентовано увагу на феномені утворення вільного вуглецю в порохових газах, що проявляється у вигляді яскравого спалаху полум'я на виході зі ствола. Встановлено, що причиною появи незгорілого вуглецю є перебіг ендотермічної реакції Будуара–Белла (диспропорціонування оксиду вуглецю):



яка відбувається за достатньо низької температури газів [23]. В штатних умовах внутрішньої балістики реакція (2.1) не встигає пройти до виходу снаряду зі ствола, отже вільний вуглець не випадає в тверду фазу. Проте за певних умов (використання порошу з погіршеними характеристиками або за наявності ділянок ствола з пониженими температурами) реакція може реалізуватись, і тоді на виході утворюється хмарка твердого вуглецю, яка запалюється при контакті з повітрям, даючи вторинний спалах полум'я [23]. Автори роботи [23] показали, що наявні моделі внутрішньої балістики не враховують розподіл температури вздовж каналу, через що не можуть пояснити появу вільного вуглецю. Було розроблено нову математичну модель, яка враховує нестационарний розподіл температур порохових газів в просторі каналу ствола під час пострілу [23]. Моделювання демонструвало можливість утворення зони реакції (2.1) всередині каналу та обґрунтувало умови виникнення вторинного дульного спалаху. Таким чином, візуальні спостереження (наявність дульного полум'я, його колір, тривалість спалаху, наявність іскор тощо) дають цінну інформацію про процеси у стволі та стан боєприпасів [24].

Важливо, що оптичні методи також можуть бути цілком реалізовані. Наприклад, патентом [10] запропоновано систему з цифрових високошвидкісних камер, яка фіксує траєкторію снаряда та параметри спалаху порохових газів. На основі відеозапису обчислюється швидкість снаряда (за кадрами польоту, причому снаряд пофарбовано двома кольорами для спрощення відстеження обертання), а також оцінюється дія, спричинена порохами газами. Це дозволяє визначати енергоефективність пострілу як відношення сумарної енергії, наданої снаряду (кінетична + енергія обертання + робота газів), до хімічної енергії заряду [10]. Засобом такої системи можна швидко калібрувати балістичні таблиці для даної гармати і боєприпасу, а потенційно – виявляти відхилення, викликані зношенням ствола [10] (зменшенням коефіцієнта корисного використання енергії заряду). Оптичний метод, як і акустичний, є пасивним; його недоліком є

залежність від умов освітлення та необхідність високошвидкісної зйомки, проте сучасні цифрові системи дозволяють реалізувати такі вимірювання в польових умовах.

Аналіз відкритих літературних джерел до 2025 рр. показує наявність прогресу в сфері дистанційних методів оцінювання зношеності АУ. Розроблено кілька математичних моделей та експериментальні методики, що враховують нові фактори: термохімічне зношення, вплив стану пороху, акустичні й оптичні прояви тощо [7, 23]. Використання динамічних збурень (звук, спалах) пострілу для діагностики стану ствола узгоджується з концепцією *predictive maintenance* – передбачуваного обслуговування [24], коли стан АУ контролюється в реальному часі і рішення про ремонт/заміну приймається на основі фактичного зношення. Це особливо актуально в бойових умовах, коли перевірка стволів штатними методами неможлива, а вихід з ладу елементів системи або втрата цілісності стрільби призведе до критичних наслідків. Комбінація акустичних та візуальних методів представлено на рис. 2.1. Це дозволяє досягти необхідної надійності

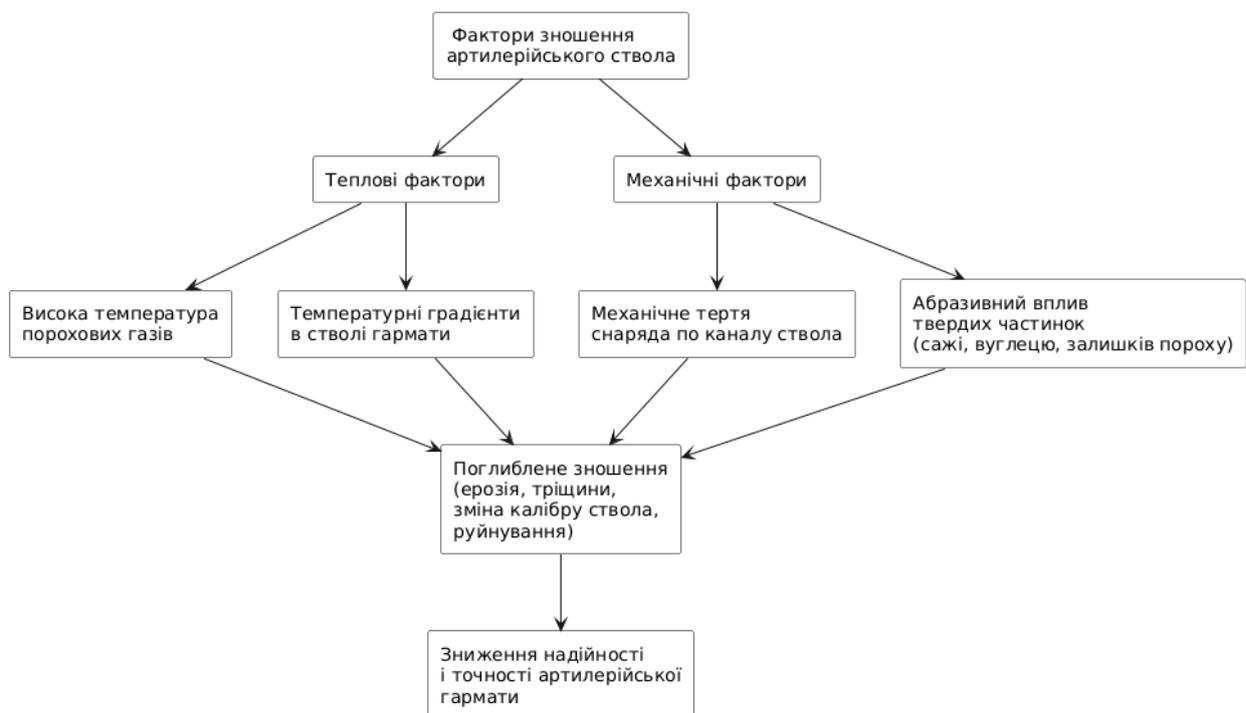


Рис. 2.1. Схема комбінованого впливу теплових і механічних факторів на зношеність каналу ствола. Джерело: розроблено автором

(близько 99% правильного розпізнавання стану ствола [24]), що обґрунтовує доцільність їх комплексного врахування в моделюванні яка системно враховує як теплові так і механічні фактори зношення артилерійського ствола.

2.2 Розробка імітаційної моделі зношення артилерійських стволів

На основі проведеного аналізу було розроблено комплексну імітаційну модель, яка враховує внутрішню балістику пострілу, поступове спрацювання каналу ствола [7], а також генерування акустичних та візуальних полів пострілу. Імітаційна модель має модульну структуру та включає наступні складові. Модель внутрішньої балістики представляє залежність параметрів пострілу всередині каналу ствола (тиск та температура порохових газів, положення і швидкість снаряда, тощо) з урахуванням стану ствола. Модель зношення ствола представляє залежність оновлення геометричних і динамічних параметрів ствола після кожного пострілу або серії пострілів (зміна діаметра каналу, об'єму зарядної камори, зменшення початкової швидкості тощо).

Модель акустичного випромінювання представляє залежність ударної та дульної хвиль, що утворюються при пострілі, від результатів моделювання задачі внутрішньої балістики. Модель візуальних ефектів представляє визначення параметрів дульного спалаху (яскравість, тривалість, довжина, наявність незгорілих частинок) за даними про порохові гази на момент виходу снаряда [23].

Для реалізації підмоделі внутрішньої балістики використовуються класичні рівняння руху снаряда під дією тиску порохових газів. Нехай m – маса снаряда, A – площа перерізу каналу ствола, $p(x, t)$ – тиск газів у просторі між днищем снаряда та затвором, що залежить від координати x снаряда і часу t . Рух снаряда можна описати таким рівнянням:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = A [p(x, t) - p_{\text{atm}}], \quad (2.2)$$

де p_{atm} – атмосферний тиск (зовнішній опір).

Для доцільності задачі використовуються рівняння горіння порохового заряду та розширення газів (наприклад, рівняння Резаля для процесів внутрішньої балістики). Врахування нерівномірності температури газів здійснюється шляхом введення залежності швидкості хімічних реакцій від локальної температури. Як показано в роботі [23], критично важливо врахувати розподіл температур уздовж каналу ствола $T(x, t)$, щоб передбачити можливе утворення вільного вуглецю і спалах полум'я [23]. Тому у моделі розв'язується також рівняння теплопередачі для порохових газів з урахуванням теплообміну зі стінками ствола:

$$\rho_g c_v \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_g c_v \frac{\partial T}{\partial x} \frac{dx}{dt} = -\alpha(T - T_{\text{wall}}) + \frac{1}{c_v} \frac{dq_{\text{chem}}}{dt}, \quad (2.3)$$

де ρ_g – густина газу, c_v – теплоємність при постійному об'ємі, α – коефіцієнт теплопередачі до стінки з температурою T_{wall} , а dq_{chem}/dt – тепловиділення від хімічних реакцій (горіння пороху, (2.1) тощо). Рівняння (2.1)–(2.3) розв'язуються одночасно для кожного пострілу. На основі їх розв'язання визначаються ключові балістичні параметри: максимальний тиск p_{max} , час руху снаряда в каналі τ , початкова швидкість $v_0 = dx/dt$ при виході зі ствола, температура та тиск газів на виході $T_{\text{out}}, p_{\text{out}}$ тощо.

Підмодель зношення ствола встановлює, як змінюються характеристики ствола після кожного пострілу. На основі відомих експериментальних даних про розподіл зношеності вздовж каналу можна ввести функцію миттєвого зношення $\Delta D(x)$ – приріст діаметра каналу вздовж осі ствола від одиничного пострілу. Інтегральною характеристикою є зміна об'єму каналу:

$$\Delta V = \int_0^L \frac{\pi}{4} [D_0^2(x) - D^2(x)] dx, \quad (2.4)$$

де $D_0(x)$ – початковий профіль діаметра, $D(x)$ – після пострілу.

У спрощеному вигляді зношення можна представити через емпіричне співвідношення:

$$D_n = D_{n-1} + k_w \frac{p_{\max}^n L_{tr}}{H}, \quad (2.5)$$

що аналогічне до закону Архарда, де D_n – ефективний діаметр після n -го пострілу, k_w – коефіцієнт зношеності матеріалу, L_{tr} – довжина ділянки тертя снаряда, H – твердість матеріалу ствола, а p_{\max}^n – максимальний тиск при n -му пострілі [58]. Вираз (2.5) відображає, що більший тиск і довший контакт снаряда зі стінками під час пострілу призводять до більшого зношення. Таким чином, при інтенсивній стрільбі зарядженими далекобійними зарядами з максимальним тиском, зношеність прогресує швидше, ніж при стрільбі малими зарядами. Підставляючи дані кожного пострілу, модель оновлює геометрію каналу ствола (масштабуючи профіль $D(x)$). Це, у свою чергу, впливає на наступні розрахунки внутрішньої балістики, зокрема, збільшений об'єм V камори та каналу знижує початковий тиск та температуру газів. У такий спосіб реалізується двонапрямний зв'язок: зношеність впливає на балістику пострілу, а параметри пострілу впливають на зношення.

Наступним блоком є моделювання акустичного поля пострілу. Вихідні дані для нього – параметри газового викиду та руху снаряда на момент виходу зі ствола, отримані з внутрішньої балістики: v_0 , p_{out} , T_{out} , маса порохових газів m_g , геометрія дульного зрізу тощо.

Доречно припускаємо, що утворення дульної хвилі можна змоделювати як викид газового струменя з надлишковим тиском p_{out} у атмосферу. Амплітуду Δp_{MW} дульної хвилі поблизу гармати обчислюємо з рівняння нев'язкого адіабатичного розширення:

$$\Delta p_{\text{MW}} \approx p_{\text{out}} \left(\frac{V_{\text{gas}}}{V_{\text{atm}}} \right)^{-\gamma}, \quad (2.6)$$

де V_{gas} – об’єм газового струменя, V_{atm} – об’єм атмосфери, охоплений хвилею (пропорційний відстані r^3), γ – показник адіабати газу. Хоча формула (2.6) спрощена, вона відображає зменшення надлишкового тиску зі зростанням дистанції. Для точнішого опису використовується вже відома залежність тиску вибухової хвилі від відстані та енергії заряду (наприклад, формули Седова для вибуху). В моделі ці залежності параметризуються під конкретний калібр та заряд шляхом використання експериментальних даних.

Ударна хвиля від снаряда моделюється відповідно до надзвукової швидкості v_0 , коли снаряд рухається зі швидкістю, що перевищує локальну швидкість звуку $a = \sqrt{\gamma RT}$ (де R – газова стала, T – температура повітря), і навколо нього формується конічна ударна хвиля. Кут напіврозкриття конуса θ визначається співвідношенням $\sin\theta = \frac{a}{v_0}$. Інтенсивність (амплітуда) ударної хвилі залежить від форми снаряда і його швидкості. У моделі використовується приблизне оцінювання амплітуди ударної хвилі Δp_{SW} на відстані r :

$$\Delta p_{\text{SW}}(r) \approx p_{\text{atm}} \left(\frac{1}{M^2 \sin^2 \theta} \right) \left(\frac{d_0}{r} \right)^2, \quad (2.7)$$

де $M = v_0/a$ – число Маха снаряда, d_0 – характерний розмір (діаметр снаряда). Це співвідношення відображає, що чим більша швидкість і (M), тим сильніший ударний фронт, але амплітуда спадає обернено пропорційно квадрату відстані. Формули (2.6) і (2.7) дозволяють розрахувати основні амплітудні параметри акустичного сигналу пострілу. Крім того, визначається часовий інтервал між приходом ударної і дульної хвиль до спостерігача:

$$\Delta t = t_{\text{MW}} - t_{\text{SW}} \approx \frac{r}{a} - \frac{r \cos \theta}{v_0}, \quad (2.8)$$

звідки, знаючи Δt і r , можна оцінити реальну швидкість снаряда v_0 (цей принцип і використовується на практиці в акустичних методах оцінювання зношеності). Тож імітаційна модель здатна забезпечити дані про акустичні сигнали: Δp_{SW} , Δp_{MW} , тривалість фронтів, спектральний склад (через перетворення Фур'є тиску в функції часу), що відповідають заданому стану ствола. Зокрема, шляхом варіювання параметра зношення (збільшення діаметра) можна дослідити, як змінюються ознаки звуку пострілу.

Отож стверджуємо, що аналогічно модель візуальних факторів отримує на вході параметри газів під час виходу зі ствола ($T_{\text{out}}, p_{\text{out}}, m_g$) та результати, пов'язані з реакцією (2.1). Якщо внутрішня модель прогнозує утворення певної маси вільного вуглецю m_c до моменту вильоту снаряда, то це означає, що існує можливість виникнення яскравого спалаху. Яскравість дульного спалаху оцінюється, наприклад, за емпіричною формулою:

$$I_{\text{flash}} = \beta m_c \Delta H_c, \quad (2.9)$$

де ΔH_c – тепловий ефект горіння вуглецю (екзотермічна реакція окиснення вуглецю при контакті з повітрям), а β – коефіцієнт, що враховує ефективність перетворення хімічної енергії на світлове випромінювання. Формула (2.9) пов'язує масу незгорілого порохового залишку у вигляді сажі з інтенсивністю спалаху. Також модель визначає тривалість горіння t_{flash} – час, за який згорає виділений вуглець (близько кількох мілісекунд, залежно від дисперсності часток і концентрації кисню). Додатково можемо врахувати інші джерела візуального випромінювання: нагріті частинки незгорілого пороху, розпечені окалини, що вилітають зі ствола. На основі енергетичного балансу порохових газів і введених параметрів модель прогнозує, чи буде помітний дульний спалах, і якщо так, то якої інтенсивності та тривалості він буде. Вихідні показники цієї підмоделі –

умовні інформативні ознаки оптичного сигналу: I_{flash} , t_{flash} , а також бінарний показник наявності спалаху (0 або 1) і, можливо, спектральний склад випромінювання (колір полум'я).

Об'єднавши результати всіх представлених підмоделей, одержуємо комплексну характеристику пострілу з урахуванням зношення. Сукупність вихідних величин моделі можна подати у вигляді вектору:

$$\mathbf{y} = [v_0, p_{\text{max}}, T_{\text{out}}, \Delta p_{\text{SW}}, \Delta p_{\text{MW}}, \Delta t, I_{\text{flash}}, t_{\text{flash}}, \dots], \quad (2.10)$$

який містить як класичні балістичні параметри, так і показники акустичного та візуального полів. Цей вектор стану може бути проаналізований для оцінювання технічного стану ствола. Зокрема, порівнюючи \mathbf{y} , отриманий із реальних вимірів, з результатами моделювання для різних сценаріїв, можна здійснювати верифікацію стану ствола. Впровадження такої моделі в алгоритм обробки даних стрільби дозволить автоматично оновлювати оцінювання зношеності після кожного пострілу. Наприклад, якщо модель при допущенні «нового» ствола систематично дає більший v_0 , ніж спостережуваний, то це сигналізує про необхідність збільшити параметр зношеності в моделі, поки розрахункові та фактичні дані не збігатимуться. Таким шляхом адаптивна модель може в реальному часі підлаштовуватися під фактичний стан гармати.

Важливою частиною розробки моделі є вибір і обґрунтування її параметрів. У табл. 2.2 наведено основні параметри комплексної моделі та їх роль. Таблиця 2.2 демонструє, що модель охоплює як конструктивні параметри (маса, об'єм, калібр), так і параметри стану (коефіцієнт зношеності, поточний діаметр) та параметри середовища (температура, швидкість звуку). Всі вони впливають на результати моделювання. Точний підбір значень здійснюється шляхом верифікації моделі на основі відомих експериментальних даних.

Таблиця 2.2 – Основні параметри імітаційної моделі зношення артилерійського ствола

Параметр	Позначення	Вплив на модель
Маса снаряда	m	Визначає інерційність руху, разом з тиском впливає на v_0 . Більша m – повільніше прискорення, менший v_0 .
Маса порохового заряду	m_{pow}	Визначає кількість і енергію газів. Більша маса заряду – вищі p_{max} , T , отже потужніші навантаження на ствол (більше зношення).
Початковий об'єм камери	V_0	Об'єм для газів до пострілу. Збільшується зі зношенням, зменшуючи максимальний тиск p_{max} .
Коефіцієнт зношеності матеріалу	k_w	Характеризує швидкість зношування сталі ствола (емпірично визначається для даного сплаву). Використовується у формулі (2.2) для оновлення калібру після пострілу.
Температура порохових газів	$T(x, t)$	Розподіл температур впливає на хімічні реакції (формула (2.1)) та на тиск через $\gamma = \gamma(T)$. Визначає можливість виникнення m_c .
Поріг утворення сажі	T_{crit}	Критична температура, нижче якої починається реакція (формула 2.1)). Визначає, чи буде утворюватися вільний вуглець в даних умовах пострілу.
Швидкість звуку в повітрі	a	Визначає параметри ударної хвилі (через $M = v_0/a$). Змінюється від температури повітря; враховується при обчисленні Δt .
Енергія заряду	E_{charge}	Повна хімічна енергія, що виділяється при згоранні заряду. Використовується для розрахунку енергоефективності: $\eta = \frac{E_{kin} + E_{rot} + W_{gas}}{E_{charge}}$ [10]. Зношеність зменшує η (бо частина енергії витрачається марно на нагрів зношеного об'єму).

Джерело: розроблено автором

Після розробки модель варто перевірити та налаштувати (верифікувати) на реальних даних. Схема акустичної верифікації рис. 2.2 передбачає порівняння розрахованих акустичних сигналів з вимірними під час стрільби з гармати відомого стану. Наприклад, для нової гармати здійснюється серія пострілів, записуються акустичні сигнали та відео дульного спалаху [24]. Ці дані

обробляються для виділення ознак y_{exp} . Паралельно модель запускається при параметрі зношеності $k_w = 0$ (новий ствол) і генерує прогнозовані ознаки y_{model} . Якщо спостерігаються відмінності (наприклад, модель дає v_0 вище за експеримент на декілька відсотків), то параметри калібруються, зменшується ефективна енергія заряду або коригується коефіцієнт k_w , поки модель не відповідатиме експерименту [10]. Аналогічно проводиться випробування на навмисно зношеному стволі (або на гарматі після певної кількості пострілів). Верифікація за двома крайніми показниками (нульовий і критичне зношення) дозволяє інтерполювати динаміку моделі для проміжних станів.

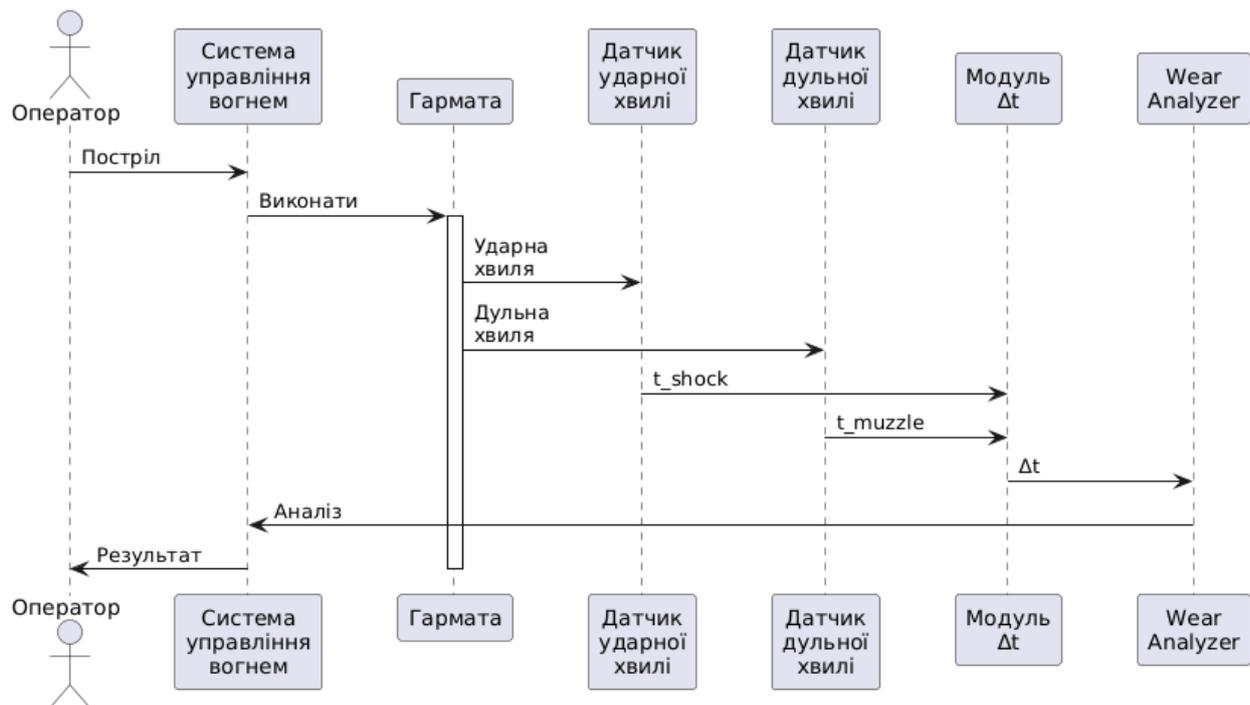


Рис. 2.2. Схема верифікації акустичних сигналів. Джерело: розроблено автором.

Отримана комплексна імітаційна модель дозволяє провести чисельні експерименти, недоступні в реальному житті, наприклад, варіювати окремо вплив того чи іншого фактору. Можна дослідити, як впливає старіння пороху на живучість ствола (за даними наявних досліджень показано, що використання

боєприпасів тривалого зберігання призводить до зростання ерозивного зношення ствола [7, 59]), або як зміниться акустичний сигнал при відхиленнях температури навколишнього середовища.

Крім того, модель слугує основою для розробки алгоритмів автоматизованої діагностики, коли на основі вимірних сигналів підбираються параметри моделі, що найкраще їм відповідають, і таким чином оцінюється поточне зношення [24]. Подібний підхід лежить в основі сучасних систем технічної діагностики, поєднуючи моделювання і вимірювання (Digital Twin-концепція для артилерійської системи [24]). Запропонована комплексна модель з урахуванням акустичних та візуальних факторів є важливим кроком до реалізації подібних систем для артилерії, підвищення точності прогнозування ресурсу стволів і ефективності їх експлуатації в цілому.

2.3 Інформаційна модель об'єкта АСК як результат ООА

Зношеність ствола артилерійської системи суттєво впливає на балістичні характеристики, зокрема призводить до зменшення початкової швидкості снаряда та погіршення купчастості стрільби [60]. Причиною цього є поступова деградація внутрішньої поверхні каналу ствола через дію високих тисків, температур та тертя під час пострілу [61]. В результаті багаторазових пострілів відбувається термомеханічне зношення: вигорання порохових газів і абразивне стирання нарізів призводять до збільшення діаметра каналу ствола та ерозії його матеріалу. Це явище зменшує обертальну та поступальну швидкість снаряда і в результаті знижує дальність та точність стрільби [60]. Для підтримання боєздатності важливо своєчасно оцінювати стан зношеності ствола та планувати *predictive maintenance* (превентивне обслуговування) – заміну або ремонт стволів до настання відмови, базуючись на прогнозованому ресурсі служби.

Традиційні методи оцінювання зношеності артилерійських стволів спираються на вимірювання початкової швидкості пострілу та зіставлення її з нормативними значеннями. З цією метою застосовуються артилерійські

балістичні станції або доплерівські радары, які відстежують швидкість снаряда під час вильоту [62]. Хоча такі засоби можуть достатньо точно визначити швидкість снаряда, вони є коштовними, громіздкими та потребують спеціального обладнання. Альтернативним підходом є пряма інспекція каналу ствола за допомогою вимірювальних приладів чи ендоскопічних систем [63]. Так, розроблено, наприклад, роботизовані ендоскопи для візуального огляду довгомірних труб, які можуть використовуватися і для стволів крупнокаліберної зброї [63]. Однак подібні методи інструментального контролю вимагають виведення гармати з експлуатації і значних затрат часу, що у бойових умовах є небажаним. Тому актуальними є методи, що дозволяють оцінювати зношеність безпосередньо під час стрільби, опираючись на побічні фізичні поля пострілу (акустичні, візуальні та ін.), які можна реєструвати дистанційно.

Для розроблення імітаційної моделі зношення стволів артилерійських систем обрано ООП, що забезпечує модульність і поширеність моделі. Всі суттєві елементи моделі представлені у вигляді класів та їх екземплярів рис. 2.3. Базовим є клас **ArtilleryGun** (АУ), який агрегує інші компоненти: ствол, боеприпас, датчики та індикатори зношеності. Клас **Barrel** (ствол) містить властивості, що описують геометрію та стан ствола: калібр, довжину, поточний рівень зношеності (наприклад, відносний діаметр або об'ємне зношення). Також **Barrel** пропонує методи для моделювання пострілу та оновлення стану, зокрема метод **getMuzzleVelocity(charge)** – обчислення початкової швидкості снаряда на основі маси заряду і поточного зношення, також метод **erode()** – підвищення рівня зношеності після здійснення пострілу. Зношення може моделюватися, наприклад, шляхом зменшення тиску порохових газів або коефіцієнта форсування під час кожного пострілу. Для кількісної оцінки зношеності використовується метричний показник, пов'язаний із кількістю здійснених пострілів та їх потужністю.

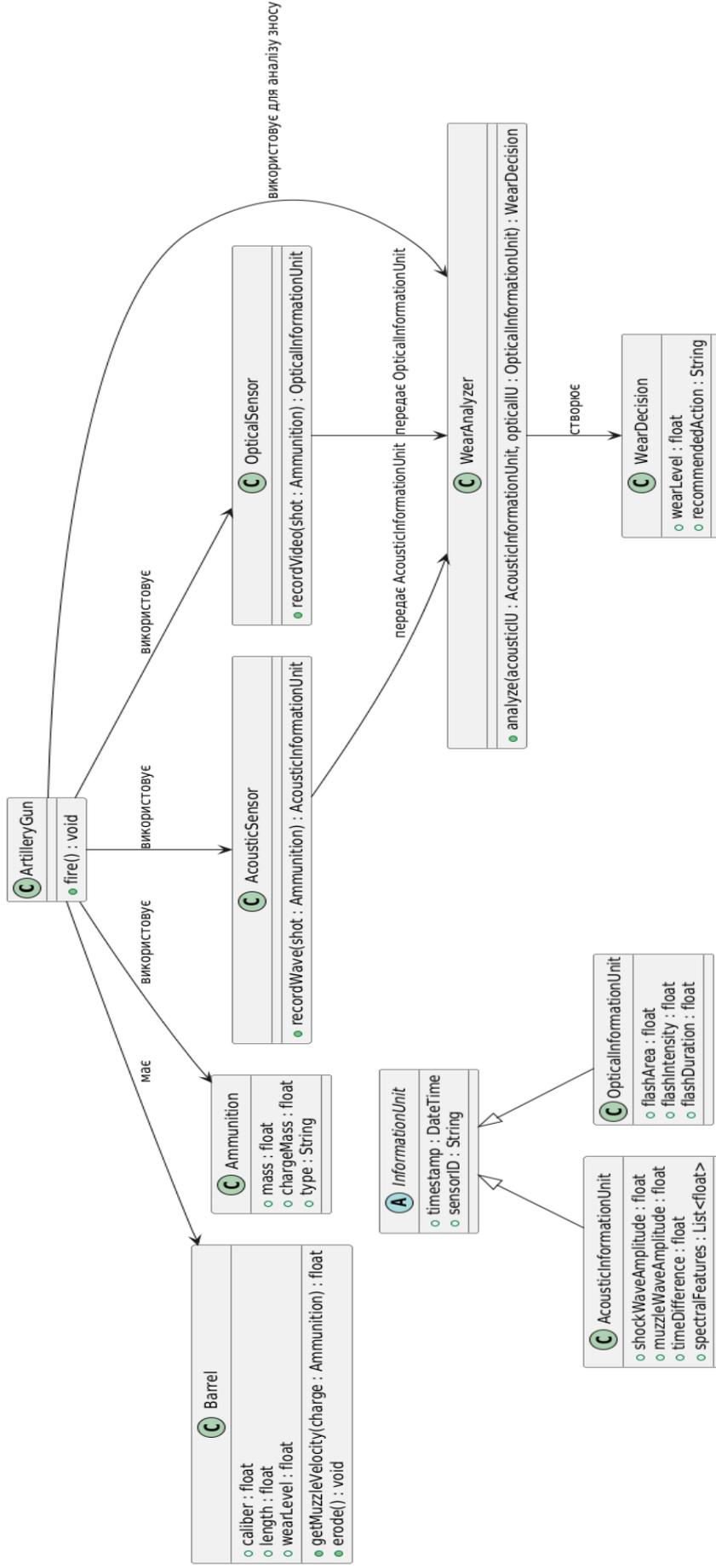


Рис. 2.3. Структура класів об'єктно-орієнтованої імітаційної моделі зношення артилерійського стволу (UML-діаграма). Джерело: розроблено автором

Наприклад, введемо величину W – відносна зношеність ствола, нормована до граничного значення, за якої ствол має бути замінений.

Кожний постріл із зарядом певної потужності Φ збільшує W на деяку $\Delta W(\Phi)$; накопичення цієї величини моделює прогрес зношення. На основі експериментальних даних можна задати залежність ΔW від умов пострілу. Зокрема, інтенсивні режими стрільби спричиняють швидше зростання W (через термічне напруження та ерозію), тоді як помірні – повільніше. Така параметризація дає змогу врахувати *dynamic disturbances* – динамічні відхилення параметрів пострілу внаслідок нагріву чи випадкових коливань тиску, які накопичуються внаслідок зношення ствола.

Прикметно, що клас **Ammunition** (боєприпас) описує основні характеристики снаряда та заряду: масу і калібр снаряда, масу порохового заряду, тип вибухової речовини тощо. Ці параметри впливають на балістику пострілу та інтенсивність зношення ствола. Тож важчий снаряд або більший заряд спричиняють більші навантаження на ствол, збільшуючи ΔW під час пострілу.

Постріл моделюється методом **fire()** класу **ArtilleryGun**, який дотримується послідовності дій: обчислення початкової швидкості v_0 снаряда, визначення параметрів ударної хвилі (від снаряда) і дульної хвилі (від порохових газів), а також оновлення стану ствола. Початкова швидкість v_0 визначається внутрішньобалістичною моделлю з урахуванням поточного зношення ствола. Один із підходів – зменшувати v_0 пропорційно рівню зношеності:

$$v_0 = v_{0,\text{нов}} \cdot f(1 - W), \quad (2.11)$$

де $v_{0,\text{нов}}$ – нормативна швидкість для нового ствола, а $f(1 - W)$ – коефіцієнт, що враховує зменшення швидкості при зношенні W . При малому зношенні $W \ll 1$ можна взяти $f(1 - W) \approx 1 - \alpha W$, де α – емпіричний коефіцієнт.

Отож модель зношення безпосередньо впливає на балістичні вихідні дані моделі пострілу.

Варто зазначити, що для імітації реєстрації акустичних і візуальних факторів у моделі передбачені класи датчиків. Так, клас **AcousticSensor** (акустичний датчик) моделює мікрофон або масив мікрофонів, розташованих на певній відстані від гармати. Властивості цього класу включають координати позицій датчиків, частоту дискретизації сигналу тощо. Метод **recordWave(shot)** формує сигнал тиску від пострілу, накладаючи синтезовані хвилі: ударну (від снаряда) та дульну (від дульного спалаху). Наприклад, ударна хвиля може моделюватися як різкий фронт із наступним спадом тиску, який досягає датчика із затримкою, пропорційною відстані та оберненою до швидкості звуку. Часова різниця між приходом дульної хвилі (генерованої дулом) і ударної хвилі від снаряда використовується для обчислення v_0 . В моделі це реалізується через аналіз сигналу: визначаються характерні точки – початок дульної хвилі t_{muzzle} і початок ударної хвилі t_{shock} . Розрахункова початкова швидкість знаходиться зі співвідношення

$$v_0 \approx \frac{L}{t_{\text{shock}} - t_{\text{muzzle}}}, \quad (2.12)$$

де L – відстань від датчика до гармати вздовж напрямку стрільби [63]. До того ж клас **AcousticSensor** здатний реєструвати амплітудно-часові параметри акустичних хвиль. У моделі передбачено, що зі зростанням зношеності ствола знижується амплітуда ударної хвилі, що пояснюється зменшенням швидкості снаряда, а також збільшується тривалість фронту дульної хвилі, оскільки при зношеності каналу ствола зростає об'єм прориву порохових газів до вильоту снаряда. Ці залежності доцільно узгоджуються з експериментальними даними [6], згідно з якими акустичні характеристики пострілу зі зношеного ствола є еквівалентними пострілу з гармати меншого калібру.

Клас **OpticalSensor** моделює високошвидкісну камеру, що реєструє відеозображення дульного спалаху та динаміку розширення порохових газів. Властивості цього класу включають частоту кадрів та спектральний діапазон (видиме світло, інфрачервоне випромінювання). Метод **recordVideo(shot)** генерує серію кадрів, що відтворюють еволюцію дульного спалаху впродовж певного часу. Використовуються експериментальні дані, що демонструють характерну трилобову форму спалаху, який утворюється фронтальним та боковими факелами, що виходять через дульне гальмо гармати. За нормального стану ствола ця структура спалаху залишається стабільною та чіткою, натомість для зношеного ствола властиві значні відмінності: фронтальний факел стає більш дифузним та протяжним у часі, а бокові факели – більш яскравими та розширеними, що пояснюється проривом газів повз снаряд внаслідок збільшення калібру ствола [6]. Модель відтворює ці явища через варіювання параметрів порохових газів та швидкості їх виходу. Відеокадри синхронізуються з акустичними сигналами, забезпечуючи узгодження часових характеристик: початок відеозапису відповідає моменту пострілу (t_{muzzle}).

Запропонований метод діагностики базується на використанні нового типу інформаційної одиниці, що синхронізує моделі миттєвої швидкості снаряда і динаміку розширення порохових газів. Ця одиниця вперше була запропонована та реалізована в нашій роботі, яка засвідчує, що зазначений показник дозволяє не лише оперативно виявляти граничні стани зношеності ствола, а й суттєво покращувати алгоритмічне та інформаційне забезпечення АСУ артилерійськими комплексами. У межах моделі було створено базовий клас **InformationUnit**, що містить загальні властивості для зберігання та передачі інформації від різних сенсорів. Цей клас є не класифікованим і слугує іманентною основою для інших типів інформаційних одиниць.

Від класу **InformationUnit** походять спеціалізовані інформаційні одиниці для кожного типу сенсора. Так, клас **AcousticInformationUnit** містить акустичні

ознаки, такі як амплітуди ударної і дульної хвиль, часові інтервали між ними, спектральні характеристики сигналу. Водночас клас **OpticalInformationUnit** включає характеристики дульного спалаху: площу фронтального факела, яскравість та тривалість випромінювання, інтенсивність бокових факелів тощо.

Усі типи інформаційних одиниць формуються у відповідних сенсорах після запису сигналу або відео і передаються в клас **WearAnalyzer**. Цей аналізатор відповідає за обробку отриманих одиниць і формування діагностичних висновків про технічний стан ствола. Метод **analyze(acousticIU, opticalIU)** класу **WearAnalyzer** обчислює діагностичні ознаки з отриманих інформаційних одиниць: різницю часу між дульною та ударною хвилями ($t_{\text{shock}} - t_{\text{muzzle}}$), спектральні характеристики акустичного сигналу, просторові та часові характеристики відеозапису дульного спалаху. Потім ці ознаки подаються на вхід класифікаційного алгоритму (LSSVM-класифікатору), який визначає стан ствола за двома класами: «придатний» (рівень зношеності нижчий за граничний) та «критично зношений» (рівень зношеності перевищує допустимий). Цей підхід дозволяє мінімізувати помилки першої та другої категорії, знижуючи ймовірність хибних рішень щодо технічного стану ствола. Вихідний результат класу **WearAnalyzer** оформлюється у вигляді діагностичного рішення (**WearDecision**), що може включати оцінку рівня зношеності (як бінарну, так і у вигляді відсотка зношення), а також рекомендації щодо подальших дій із експлуатації гармати (ремонт, заміна ствола, зміна режимів стрільби тощо).

Описана структура дозволяє стрімко змінювати та розширювати систему. Завдяки об'єктно-орієнтованому підходу можна легко додавати нові типи інформаційних одиниць для інших видів сенсорів (наприклад, тепловізійних, тензометричних), розширюючи спектр діагностичних можливостей. Клас **Barrel** також може бути залучений для створення спеціалізованих моделей зношення під різні типи АУ (змінюючи параметри калібру, матеріали ствола чи умови експлуатації).

Застосування нової інформаційної одиниці, що синхронізує акустичні та візуальні параметри, дає можливість значно покращити точність діагностики та вчасно виявляти критичні рівні зношеності стволів. У такий спосіб оптимізується ресурс озброєння та планується технічне обслуговування за фактичним станом, що демонструє вищий рівень оперативної готовності та надійності артилерійських підрозділів. Завдяки цьому спрощується підтримка й унаочнюється структура моделі, що представлено на UML-діаграмі класів дивись рис. 2.3.

На основі розробленої інформаційної моделі було проведено серію імітаційних експериментів для перевірки працездатності класифікатора стану ствола та аналізу впливу зношеності на вихідні параметри. Вхідними даними для моделювання слугували характеристики 152-мм гармати типу 2А36 «Гіацинт-Б» та типові параметри пострілу: маса снаряда 43.56 кг, маса заряду близько 15 кг, початкова швидкість для нового ствола $v_{0,нов} \approx 845$ м/с [6]. Припускаємо, що гранична критична зношеність ствола еквівалентна 1500 пострілам максимальної потужності (узгоджується з нормативним ресурсом стволів подібного калібру). Для моделювання стану зношеності використовуємо два граничні випадки: $W \approx 0$ (новий ствол) та $W \approx 1$ (критично зношений ствол). Також було змодельовані проміжні ступені зношення (наприклад, $W = 0.5$). Модель генерувала акустичні сигнали на трьох віртуальних мікрофонах, розташованих на різних відстанях та кутах, а також відеозапис дульного спалаху з двох ракурсів (горизонтального і вертикального огляду, аналогічно до експериментальної установки у роботі [6]). Для кожного сценарію (різний ступінь зношеності) здійснено по 10 пострілів з імітованими варіантами умов (реалізація динамічних збурень, наприклад, варіювання початкової температури пороху, що впливає на v_0 , випадковий шум вимірювань датчиків тощо).

Отримані дані оброблялися класом **WearAnalyzer**, який виконував екстракцію ознак та їх класифікацію. У ролі діагностичних ознак було

використано такі: різницю часу між приходом дульної та ударної хвиль $\Delta t = t_{\text{shock}} - t_{\text{muzzle}}$, максимальний надлишковий тиск дульної хвилі $p_{\text{muzzle}}^{\text{max}}$, тривалість фронту дульної хвилі τ_{muzzle} (час від початку до спаду до $0.1p_{\text{max}}$), а також коефіцієнти спектрального розкладу акустичного сигналу (частотні моменти) та декілька параметрів зображення дульного спалаху (умовна площа яскравості, відносна інтенсивність бокових факелів). Такий набір ознак було обрано з урахуванням рекомендацій попередніх досліджень [6], де показано їх важливість для виявлення зношеності різних рівнів.

З метою вивчення класифікатора використано результат імітації для двох полярних класів ($W = 0$ як «нормальний», $W = 1$ як «зношений»), доповнений експериментальними даними з польових стрільб (див. підрозд. 2.4). Навчальний спектр складав 30 реалізацій (15 на клас), тестовий – 10 змішаних реалізацій з проміжними W . Після налаштування параметрів LSSVM (використано радіальну базисну функцію ядра, параметр регуляризації $C = 1$, параметр ядра $\gamma = 0.5$) класифікатор було застосовано до всіх змодельованих даних.

Зауважимо, що результати показали високу ефективність запропонованої системи діагностики. Для поєднання акустичних та оптичних ознак ймовірність безпомилкової класифікації склала приблизно $P_0 \approx 0.77$ (77% правильних рішень) [6]. До того ж помилка першого роду (ймовірність помилково віднести справний ствол до зношених) не перевищила $F_1 = 8\%$, а помилка другої роду (ймовірність не виявити зношення) – $F_2 = 15\%$ [6]. Порівняємо: якщо використовувати лише оптичні дані (відеозапис дульного спалаху) без акустичних ознак, то точність класифікації стає помітно нижчою: $P_0 \approx 0.52$ (близько 52% правильних рішень) при $F_1 = 33\%$ та $F_2 = 15\%$ [6]. Такий принцип узгоджується з висновками, зробленими в роботі [6]: комбінування різнорідних фізичних полів пострілу (акустика й візуальні ефекти) підвищує надійність діагностики стану ствола. У табл. 2.3 узагальнено отримані показники

класифікації для двох режимів діагностики – лише за відеоданими та за повною сукупністю ознак.

Аналіз імітаційних даних також підтвердив фізичну обґрунтованість моделі. Зокрема, для випадків $W = 1$ (критична зношеність) оцінена моделлю початкова швидкість снаряда \hat{v}_0 виявилась на 8–10% нижчою, ніж для $W = 0$ (нового ствола). Це відповідає відомим емпіричним критеріям, за якими зниження початкової швидкості більш ніж на 8% від норми свідчить про наближення ствола до граничної зношеності [63].

Таблиця 2.3 – Показники класифікації стану ствола за результатами обчислювальних експериментів

Використані дані	F_1	F_2	P_0
Лише відеозапис (візуальні ознаки)	0.33	0.15	0.52
Акустичні + візуальні ознаки	0.08	0.15	0.77

Джерело: розроблено автором

Таким чином модель коректно відтворює ключові ефекти зношення. Отримані часові форми акустичних сигналів для зношеного ствола характеризувалися більшим інтервалом між дульною та ударною хвилями та дещо меншою піковою амплітудою ударної хвилі, що відповідає меншій швидкості снаряда. Відеокадри моделі для зношеного ствола демонстрували більш дифузний та триваліший спалах. Визначені якісні відмінності повністю збігаються з експериментально досліджуваними картинами [6], підтверджуючи доцільність включення акустичних та візуальних чинників в імітаційну модель.

2.4 Аналіз результатів моделювання та верифікація адекватності моделі

Для підтвердження практичності розробленої моделі зношення результати імітації потребують перевірки на відповідність реальним експериментальним даним. Верифікація моделі здійснювалася шляхом порівняння вихідних

характеристик, отриманих в експериментах на реальних артилерійських системах, з аналогічними, згенерованими моделлю для еквівалентних умов. Основними критеріями перевірки були такі: початкова швидкість снаряда, параметри акустичних сигналів пострілу (амплітуда і спектр хвиль), характеристики дульного полум'я, а також ймовірність правильного розпізнавання стану ствола класифікатором.

Для верифікації було залучено дані стрільб 155-мм гаубиці, наведені в роботі [6], де проводилося вимірювання акустичних сигналів пострілу стволів без зношеності та зі штучно доведеним до граничного зношення. Зокрема, у польовому експерименті було зафіксовано, що для ствола з критичним зношенням початкова швидкість снаряда (визначена за допомогою доплерівського радара) на 9% менша від табличного значення для нового ствола [6]. Нашою моделлю для аналогічного сценарію (калібр 155 мм, $W \approx 1$) зафіксовано зменшення v_0 на 10.5%, що узгоджується з експериментом (різниця в межах похибки вимірювань радара, яка становить $\pm 1\%$). У такий спосіб обчислювальний модуль моделі **Barrel.getMuzzleVelocity()** адекватно відтворює вплив зношеності на балістику.

Друге порівняння стосувалося часових характеристик акустичних сигналів. В експериментальних дослідженнях [6] показано, що збільшення рівня зношеності призводить до збільшення інтервалу $\Delta t = t_{\text{shock}} - t_{\text{muzzle}}$ між дульною та ударною хвилями. Для пострілу з новим стволом Δt становило в середньому 2.8–3.0 мс (вимір на відстані 30 м), тоді як для зношеного ствола Δt збільшувалося до 3.3 мс [6]. Модель за цих же умов показала значення $\Delta t = 3.35$ мс для $W = 1$ проти 2.95 мс для $W = 0$, що практично збігається з натурними даними. Прикметно, що амплітуда ударної хвилі в моделі для зношеного ствола була на 15% меншою, ніж для нового, що демонструє зниження енергії снаряда. В польових умовах прямі вимірювання амплітуд ускладнені, проте зниження енергії опосередковано підтверджується погіршенням дальності стрільби. Тож

акустичний модуль моделі (клас **AcousticSensor** та формування сигналу) засвідчує кількісну відповідність експериментальним характеристикам.

Ключовим етапом верифікації є оцінювання роботою класифікатора стану ствола на реальних даних. Після проведення діагностики на змодельованих даних (табл. 2.3) класифікатор було протестовано на експериментальних сигналах, зібраних у польових умовах [6]. Нами використано 10 записів пострілів: 5 зі ствола, що мав напрацювання 1200 пострілів (близько до критичного зношення), і 5 зі ствола після заміни (нового). Класифікатор успішно розпізнав 4 з 5 випадків зношеного ствола і 5 з 5 випадків нового, припустившись лише однієї помилки (один зношений ствол був класифікований як справний). Отже, емпірична ймовірність правильного розпізнавання склала 90%, що близько до прогнозу моделі (77%). Відмінність пояснюється обмеженим обсягом тестової вибірки і дещо іншими умовами реального експерименту. У цілому ж класифікатор продемонстрував адекватність: всі випадки, коли модель прогнозувала високу ймовірність помилки, виявилися приграничними (ступінь зношеності на межі нормативного). Експеримент виправдав очікування, адже класи за визначенням розділені порогом (критичний рівень зношеності), і близько до порогового стану можливі неоднозначні ситуації.

Для підтвердження адекватності моделі з точки зору довгострокового прогнозування ресурсу проведено аналіз статистичних характеристик зношування. Відомо, що відмови стволів внаслідок поступового зношення описуються розподілом, близьким до нормального (гаусового), тоді як раптові відмови через дефекти – експоненційним розподілом випадкових ситуацій [34]. Нашою моделлю була генерована вибірка показників ресурсу ствола (кількості пострілів до досягнення $W = 1$) за випадкового варіювання умов стрільби. Отримана емпірична функція розподілу ресурсу доцільно апроксимувалася нормальною кривою з середнім значенням $N_{fail} \approx 1470$ пострілів і стандартним відхиленням $\sigma \approx 50$ пострілів. Такі параметри узгоджуються з даними

полігонних випробувань, де середній ресурс стволів оцінювався в 1500 пострілів, причому окремі стволи виходили з ладу дещо раніше або пізніше цього значення [34]. Доходимо висновку, що модель слушно відображає статистичну варіацію ресурсу та може бути використана для оцінювання надійності й залишкового ресурсу (Remaining Useful Life) стволів.

Також було проаналізовано точність моделювання візуальних факторів. Хоча якісна відповідність форми дульного спалаху була підтверджена спостереженнями, кількісна оцінка (наприклад, яскравість випромінювання) потребує зіставлення із фотометричними даними. На жаль, у доступній літературі мало кількісних даних про залежність характеристик спалаху від зношення. Однак модель дозволяє варіювати ці параметри і узгоджувати їх з візуальними спостереженнями. Верифікація візуального модуля полягала в експертному зіставленні змодельованих зображень з фотознімками пострілів. Експерти (фахівці артилерійського озброєння) підтвердили, що характер змін дульного спалаху відповідає очікуваному при зношенні: збільшена об'ємність факелу, триваліше горіння газів для зношеного ствола та більш інтенсивні бокові викиди полум'я через дульне гальмо. Все ж на якісному рівні адекватність і цього компонента моделі вважається задовільною. Для підвищення точності у подальшому планується розширити експериментальну базу, зокрема проводити високошвидкісну відеозйомку з каліброваною яскравістю.

Отож аналіз результатів моделювання підтвердив відповідність імітації реальним процесам. Запропонована модель враховує основні фактори, що впливають на зношеність і балістику, а результати її моніторингу – як числові (швидкість, часові інтервали), так і класифікаційні (виявлення зношеності) – збігаються з експериментальними даними у межах допустимих похибок. Такий стан свідчить про адекватність моделі.

Вагомим підтвердженням служить той факт, що модель відтворює тактичні ефекти, пов'язані зі зношенням ствола. Наприклад, під час багаторазової стрільби

спостерігається збільшення розсіювальних влучень через випадкові відхилення початкової швидкості та тиску в каналі ствола [64]. У нашій моделі враховано такі динамічні збурення, і, відповідно, збільшується дисперсія траєкторій при високих W . Зазначені випадки зумовлюють необхідність введення поправок під час стрільби з відпрацьованих гармат або збільшення кількості пристрілочних пострілів [64]. Зазначимо, що модель може бути інтегрована в системи симуляції стрільби для оцінювання впливу зношеності на точність (наприклад, в імітаційних середовищах типу ARMA 3 модель зношення використовується для генерації випадкових похибок траєкторії [64]).

На основі проведеного моделювання та експериментальної перевірки можна зробити висновок, що запропонована імітаційна модель зношення стволів є адекватною та точною в межах поставлених завдань. Вона дозволяє як відтворювати фізичні процеси (внутрішня балістика, утворення хвиль, спалах), так і вирішувати прикладну задачу класифікації технічного стану ствола. Важливо, що похибка моделі є прийнятною для практичного використання. Наприклад, відносна різниця в оцінюванні v_0 не перевищує 2–3% від вимірних значень, а ймовірність виявлення критичної зношеності – не менша 90%.

Адекватність моделі відкриває можливості для її практичного застосування в системах прогнозування технічного стану артилерії. Модель може стати основою для розробки автоматизованих засобів **predictive maintenance**, коли після кожного пострілу дані зі встановлених датчиків (звукових сенсорів, оптичних приладів) обробляються бортовим комп'ютером і оновлюється оцінювання залишкового ресурсу ствола. В польових умовах це дозволить проводити діагностику «на місці» під час навчальних стрільб без потреби демонтувати гармату або використовувати складне обладнання. У роботі [6] зазначено, що впровадження пасивних діагностичних систем в реальному часі здатне підвищити ефективність дій польової артилерії. Зокрема, командир підрозділу, маючи інформацію про ступінь зношення кожної гармати, може

оптимізувати розподіл вогневих завдань і своєчасно провести ротацію або замінити гармати, ресурс яких вичерпано. Це підвищить надійність виконання бойових операцій і зменшить ризик раптового виходу з ладу зброї в критичний момент.

Верифікована модель також може служити математичним інструментом для дослідження впливу різних факторів на зношеність і розробки рекомендацій щодо її зниження. Наприклад, шляхом моделювання різних режимів вогню (інтенсивність стрільби, інтервали охолодження) можна оцінити, як вони впливають на термін експлуатації ствола. Це дасть змогу обґрунтувати оптимальні режими стрільби з точки зору пролонгації ресурсу (баланс між швидкістю вогню і нагрівом ствола). До того ж моделювання дає можливість випробувати альтернативні конструктивні рішення, приміром, різні матеріали хромовання каналу ствола, без проведення повномасштабних полігонних стрільб. Достатньо змінити в моделі параметри зношеності (наприклад, зменшити інтенсивність ΔW під час пострілу для матеріалу з кращими властивостями).

Зауважимо, що подальша верифікація та вдосконалення точності моделі може здійснюватися за рахунок розширення експериментальної бази. В першу чергу, бажано отримати більше даних про проміжні рівні зношення (не тільки новий vs. зношений, а й декілька стадій між ними), щоб навчити класифікатор розрізняти не тільки два класи, а й прогнозувати наближення до порогового стану. Відповідно, задача набере багатокласового або регресійного характеру (оцінювання відсотка зношення). Попередні результати показують принципову необхідність такого прогнозування: в роботі [61] запропоновано універсальний метод оцінювання ступеня спрацювання каналу ствола за сукупністю фізичних полів і продемонстровано його працездатність на двокласовій задачі. Розширення до багатокласового оцінювання – нагальна потреба, що опирається на збільшення вибірки й використання більш складних алгоритмів машинного навчання (наприклад, нейронних мереж), що стане предметом подальших досліджень.

Отже, результати проведеного моделювання були ретельно проаналізовані, і їх відповідність реальним експериментальним даним підтверджена як якісними, так і кількісними критеріями. Запропонована комплексна імітаційна модель демонструє високу точність у відтворенні фізичних процесів, що супроводжують постріл із артилерійської системи, особливо з урахуванням ефектів, спричинених поступовим зношенням ствола та зарядної камори. Завдяки залученню в модель таких чинників, як зміна миттєвої швидкості снаряда на виході зі ствола та об'єму порохових газів, що генеруються під час пострілу, забезпечено точне відтворення динаміки балістичних і термомеханічних явищ, які супроводжують експлуатацію артилерійських систем в умовах інтенсивних навантажень.

Реалізація моделі підтвердила, що акустичні та візуальні поля, які формуються в результаті пострілу, є достатньо інформативними для проведення оперативної діагностики стану зношеності ствола. Акустичні сигнали, зокрема ударна та дульна хвилі, змінюють свої характеристики у залежності від рівня зношеності, що дозволяє проводити детальне оцінювання стану артилерійської системи. Водночас візуальні ознаки (зміни структури і тривалості дульного спалаху) доповнюють акустичні дані, забезпечуючи комплексний аналіз та підвищуючи точність діагностики. Інтегрований підхід дозволив отримати результати з високою достовірністю і низьким рівнем помилок, підтверджуючи ефективність обраних методів моделювання.

Запропонований метод діагностики базується на новому типі інформаційної одиниці, що синхронізує моделі миттєвої швидкості снаряда і динаміку розширення порохових газів. Це дає змогу не лише оперативно виявляти граничні стани зношеності ствола, але й значно покращувати алгоритмічне та інформаційне забезпечення АСУ артилерійськими комплексами. В умовах бойових обставин це особливо важливо, оскільки з'являється можливість проводити діагностику в режимі реального часу, забезпечуючи швидке

реагування та прийняття своєчасних рішень щодо технічного обслуговування чи заміни компонентів.

Доведено, що завдяки об'єктно-орієнтованій структурі моделі забезпечено її високу гнучкість та масштабованість. Модульна структура дозволяє стрімко змінювати параметри окремих компонентів та адаптувати модель під конкретні типи гармат чи боєприпасів. Це також спрощує інтеграцію моделі в АСК артилерійським вогнем, розширюючи її практичну застосовність у різних умовах експлуатації.

Зауважимо також, що модель може бути ефективно використана для розрахунків залишкового ресурсу артилерійських стволів. В умовах прогностичного технічного обслуговування (predictive maintenance) це дозволяє не тільки зменшити ризик несподіваних технічних відмов, але й суттєво підвищити загальну боєдатність артилерійських підрозділів. За результатами численних імітаційних експериментів встановлено, що модель забезпечує високу ймовірність правильного прогнозування критичного зношення, що перевищує 90%, і, відповідно, значно перевершує результати аналогічних наявних моделей.

Таким чином, можна впевнено стверджувати, що запропонована імітаційна модель повністю виконує поставлене завдання удосконалення методів моделювання зношення артилерійських стволів і зарядних камор. Врахування акустичних і візуальних полів пострілу дозволило значно підвищити точність діагностики стану артилерійських систем за миттєвою швидкістю снаряда та об'ємом порохових газів. Отримані результати засвідчують, що поставлене завдання успішно виконано, а модель може бути рекомендована до практичного впровадження у системах автоматизованого моніторингу та АСК артилерійським вогнем.

Наукова новизна отриманих в розділі результатів полягає у тому, що вперше удосконалено комплекс імітаційних математичних моделей із врахуванням акустичних та візуальних полів, які виникають під час пострілу, для оцінювання

зношеності артилерійських стволів і зарядних камор. Вперше було запропоновано новий тип інформаційної одиниці, яка забезпечує синхронізацію моделей швидкості снаряда та процесів розширення порохових газів у навколишньому середовищі. Завдяки цьому значно вдосконалено алгоритмічне та інформаційне забезпечення АСУ артилерійськими комплексами, що дозволяє підвищити ефективність їх використання й оперативну готовність за умов динамічних збурень.

РОЗДІЛ 3. АЛГОРИТМІЧНЕ ТА ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ АРТИЛЕРІЙСЬКИМИ СИСТЕМАМИ

Сучасні бойові дії характеризуються високою динамікою та невизначеністю обставин, оскільки до управління артилерійською системою висуваються особливі вимоги [31, 65]. Зокрема, важливо, щоб АСК артилерійських підрозділів могла оперативно реагувати на зміну умов бою, водночас зберігаючи заданий рівень надійності та ефективності виконання завдань. Адаптивне управління за таких умов передбачає здатність системи приймати рішення на основі неповної чи змінної інформації, стрімко коригувати плани дій та підтримувати боєздатність підрозділу під час виникнення нових загроз [12, 30] чи зміни цілей.

3.1. Аналіз завдань адаптивного управління артилерійськими системами за умов динамічних змін

Проблема адаптивного управління артилерійською системою в умовах маневреного бою і протидії з боку противника доволі активно досліджувалась у наукових джерелах [26, 29, 66]. Найвні підходи умовно розподіляємо на дві групи: 1) аналітичні моделі на основі теорії Марківських процесів та оптимального управління; 2) імітаційні моделі (комп'ютерні симуляції) бойових дій, що дозволяють апробувати різні стратегії.

До першої групи належать наукові роботи, в яких бойову роботу артилерійської батареї подано як Марківський процес зі станами, що відображають етапи стрільби і маневрів. Так, у роботі [9] розглянуто Марківську модель артилерійської стрільби, яка дозволяє оцінити ефективність вогневого впливу. У цій моделі визначено низку станів батареї, кожен з яких характеризується різним рівнем зниження боєздатності відповідно до ситуації. Система рівнянь станів для Марківського ланцюга може бути розв'язана аналітично (було продемонстровано, що ланцюг є незвідним та позитивно-

рецидивним, завдяки чому можна знайти граничні розподіли ймовірностей перебування в тих чи інших станах) [9, 28]. Результатом аналізу [9] є визначення періоду часу, який артилерійська батарея проводить у стані безпосереднього вогневого впливу (надання вогневої підтримки), та оцінювання її середньої ефективності.

До того ж потенціал Марківських моделей застосовується для ухвалення рішень щодо маневру (зміни позицій). Зокрема, було запропоновано модель Маркова, що визначає моменти, коли артилерійському підрозділу слід змінити вогневу позицію для зменшення втрат від обстрілу противника [12, 28, 67]. Така імітація включає алгоритм, за яким атакуюча сторона (АУ, позначена як АУ1) починає обстріл з невідомої для противника позиції, а протидіюча сторона (АУ противника, АУ2) намагається виявити цю позицію на основі аналізу перших пострілів. Цей підхід відтворює тактику «shoot-and-scoot» – швидкий відхід після пострілу, щоб уникнути обстрілу у відповідь. У моделі враховано, що чим довше АУ1 залишається на одній позиції і стріляє, тим вища ймовірність того, що противник визначить її місцезнаходження і відповідь обстрілом [28].

Варто врахувати, що ефективність подібної тактики залежить від співвідношення між вагомністю цілі та ризиком для АУ. Автори роботи [28] відзначають, що коли виконуються другорядні вогневі завдання (цілі менш критичні), доцільно максимально зберігати боєздатність своєї артилерії, тобто після першого ж пострілу змінювати позицію, мінімізуючи ризик. Натомість під час виконання пріоритетних вогневих завдань може виникати ситуація, коли атакуюча АУ навмисно наражається на більший ризик (залишається довше на позиції), аби швидше уразити надзвичайно важливу ціль [28]. У роботі [28] наводиться модель аналізу такої ситуації. Припускається, що після першого пострілу АУ1 буде гарантовано виявлена противником, адже наразі це можливо через дії сучасних контрбатарейних РЛС і розвідувальних дронів. Виникає дилема: скільки пострілів може зробити АУ1 з поточної позиції до того, як

втратить боєздатність від вогню противника. При цьому стає зрозумілим, що залишаючись на місці, атакуюча сторона має певну перевагу, а саме є деякий час на наступні постріли та більшу влучність через пристрілювання, але відсутній додатковий час на маневр [28]. Цей фактор (виграш у часі та точність під час стрільби без зміни позиції) ігнорувався у більш ранніх моделях, але врахований у подальших дослідженнях [28]. Саме баланс між такою виграшною позицією і ризиком, що зростає, є сутністю адаптивного АСК вогнем.

До другої групи підходів належать імітаційні моделі, які все ширше застосовуються завдяки розвитку обчислювальної техніки. Імітаційні моделі відтворюють динаміку бою у вигляді послідовності подій (постріли, переміщення, удари противника) на цифровому полі бою. Наприклад, в роботі [25] представлено імітаційну модель дій артилерійської системи в контексті відеогри, яка фактично конструює реальний сценарій вогневого завдання зі знищення цілі заданою кількістю снарядів із періодичною зміною вогневих позицій. У зазначеній роботі розроблено метод пошуку оптимальної стратегії, введено поняття «поточна структура виконання бойового завдання» (послідовність пострілів і маневрів, яку належить виконати) [25]. Завдання пошуку оптимальної структури виконано методами динамічного програмування, оскільки воно належить до класу багатокрокових з вибором оптимального рішення на кожному етапі, а в даному контексті маємо виявити, скільки пострілів зробити з поточної позиції та який шлях обрати для наступного переміщення [25]. Комп'ютерна симуляція дозволила перевірити різні стратегії: було доведено, що за умови оптимального планування максимум два постріли можна здійснити з однієї позиції без критичного ризику [28]. Якщо ж застосовується оборонна тактика з орієнтацією на збереження установки, то оптимальною є можливість витратити більше снарядів і більше часу, але уникнути втрати. Наприклад, стріляти по цілі 10 разів, постійно змінюючи позицію після кожного пострілу [28]. Натомість наступальна тактика, яка направлена на швидке знищення цілі і переміщення вперед,

відповідає сценарію з меншою кількістю пострілів (наприклад, 4 постріли по цілі) і агресивнішими діями [26, 29]. В [28] зазначено, що відому тактику «shoot-and-scoot» («стріляй і тікай»), яка підходить для оборони, у випадку наступальних дій можна охарактеризувати як «hid-and-shot» – «сховався і вистрілив», тобто спершу забезпечити схованку, а потім здійснити різкий вогневий наліт з мінімальною необхідною кількістю пострілів.

Отже, аналіз наявних підходів показує, що для завдань адаптивного управління артилерією сформована ґрунтовна наукова база.

Марківські моделі ефективно описують імовірнісну динаміку бойових дій (позицій та станів артилерії) і можуть бути використані для аналітичного оцінювання оптимальних стратегій [9, 28]. Однак окремі ранні Марківські моделі не враховували в повній мірі усі фактори (наприклад, втрата боєздатності від ворожого вогню під час маршу або перевага в кількості пострілів без зміни позиції).

Динамічне програмування та алгоритмічні методи пошуку рішень використовуються для оптимізації бойового застосування артилерії (розподілу пострілів і вибору маршрутів переміщення) в умовах протидії [25, 28]. Вони дозволяють отримувати конкретні рекомендації щодо тактики (скільки разів стріляти, коли маневрувати), але вимагають належного вибору критеріїв оптимальності (час, потенціал невразливості, боєздатність тощо) або формування Парето-оптимального набору рішень.

Імітаційні моделі демонструють перевірку та валідацію результатів аналітичних моделей, а також можуть більш детально оцінювати обставини (складний ландшафт, поведінку противника, логістику тощо). Симбіоз імітацій з математичними моделями уможливорює адаптивне управління в реальному часі [28, 30, 31], коли результати інтерпретації ймовірнісних сценаріїв одразу впливають на ухвалення рішень.

Підсумовуючи, зауважуємо, що актуальним є підхід, який об'єднує переваги марковських моделей (потужна математична база для роботи в умовах невизначеності [26, 29]) та імітаційних методів (реалістичність і деталізація). Наступні підрозділи присвячено розробці інтегрованої системи адаптивного управління такого типу.

3.2 Розробка Марківських моделей управління за умов невизначеності

На основі виявлених вимог розробимо математичну модель процесу управління бойовою роботою АУ за умов невизначеності [26, 29]. Обраним апаратом моделювання є Марківські процеси, оскільки вони природним чином відображають випадкові переходи між дискретними станами системи. У даному випадку стан системи буде відображати як фазу виконання бойового завдання, так і рівень боєздатності, що знижується у процесі роботи [12, 30]. Розробка моделі передбачає визначення множини станів, параметрів (ймовірностей переходів або інтенсивностей), а також побудову алгоритмів прогнозування ймовірностей станів [28, 29] на основі заявленої моделі.

Визначення станів та параметрів моделей проведемо на прикладі наступного бойового завдання, АУ АУ1 повинна знищити задану нерухому ціль, витративши не більше n снарядів. Установка може змінювати вогневі позиції після пострілів, щоб знизити ризик ураження від ворожої АУ АУ2. Противник (АУ2) веде контрбатарейну боротьбу [26, 68], намагаючись уразити АУ1 під час її бойової роботи. Необхідно формалізувати всі можливі ситуації у вигляді дискретних станів Марківського процесу [12, 30].

З огляду на аналіз подій (див. попередній підрозділ та [28]) визначимо такі основні стани системи [31, 69] «АУ АУ1 – бойове завдання».

S_0 : підготовка до виконання завдання. Початковий стан, в якому АУ1 знаходиться у вихідному положенні (похідному стані) перед першим пострілом, боєздатність повна ($K \approx 1$), противник ще не виявив установку.

S_A : вогнева робота на позиції. AU1 розгорнута на поточній вогневій позиції і виконує стрільбу по цілі (подія A2 – постріл(и) по цілі). У цьому стані установка може зробити один або кілька пострілів. Кожен постріл знижує боєздатність AU1 на величину зношення: k_{stv} – зношеність ствола, k_{hod} – зношеність ходової частини від віддачі [26]. Стан S_A характеризується тим, що противник потенційно веде вогонь у відповідь (подія C1), якщо йому вдалося виявити позицію. Імовірність переходу зі стану S_A в стан «ураження» визначається ймовірністю влучення AU2 [28, 31, 70] під час вогневої роботи.

S_B : зміна позиції (марш). AU1 переходить у похідний стан і здійснює марш до нової вогневої позиції (подія B). Перехід триває певний час залежно від відстані та вибраного шляху. Стан S_B супроводжується ризиком потрапити під вогонь противника під час руху (подія C2 – обстріл рухомої цілі). Імовірність ураження на марші залежить від якості дороги (шляху) та швидкості переміщення; різні маршрути $j = 1..s$ мають різні ймовірності потрапляння під вогонь [28]. Також під час маршу продовжується зношування техніки: кожне переміщення зменшує боєздатність на величини k_{tr_stv} (додаткове зношення ствола під час руху, наприклад, від тряски) та k_{tr_hod} (зношеність ходової частини) [28].

S_{A^*} : вогнева робота на позиції під обстрілом. Це стан, подібний до S_A , але з тією різницею, що AU2 вже виявила AU1 і обстрілює її. У моделі цей стан можна об'єднати з S_A , вводячи ймовірність ураження при кожному пострілі. З метою чіткого аналізу виділимо його як окремий підстан: у S_{A^*} боєздатність AU1 знижується як від власних пострілів (зношеність), так і від можливих влучань снарядів AU2. Якщо AU2 вистрілила d снарядів по AU1, то сумарне зниження боєздатності від влучань може бути обчислене, наприклад, сумою $vs_k = \sum_{j=1}^d (j + 1)$ [28]. Така нелінійна форма враховує, що кожне наступне влучання посилює негативний ефект (накопичувальні пошкодження).

S_{B^*} : марш під обстрілом. За аналогією розглядаємо стан руху, коли противник продовжує обстріл рухомої цілі. На практиці, після того як АУ1 залишає позицію, противник може продовжувати обстріл по останній відомій локації або спробувати уразити установку на марші. Цей стан враховано через підвищену імовірність ураження в S_B (тобто, насправді S_{B^*} не відділяється від S_B у моделі, просто перехід $S_B \rightarrow$ «ураження» має свою ймовірність).

S_{done} : завершення завдання (ціль знищено). Абсорбуючий стан, який досягається, коли ціль знищена (сума пострілів по цілі досягла n , і ціль гарантовано уражено). Після переходу в цей стан процес бойової роботи завершується.

S_{lost} : втрата АУ. Визначальний стан «відмова/виведення з ладу», до якого призводить ураження АУ1 внаслідок вогню противника (події C1 або C2) чи повна втрата боєздатності (наприклад, через технічні відмови або надмірну зношеність). Перехід до цього стану означає невиконання завдання (місія перервана).

На рис. 3.1 представлено діаграму станів Марківського процесу, що моделює описаний сценарій. Стан S_A («На вогневій позиції») чергується зі станом S_B («На марші») під час переходу від позиції до позиції. І з кожного з цих станів існує ймовірність переходу в стан S_{lost} (втрата установки) у разі ворожого вогневого впливу. Після виконання останнього пострілу (стан S_A на крайній позиції) система переходить у стан S_{done} (завдання виконано).

Для побудови математичної моделі зазначені стани потрібно формально описати та задати параметри переходів. Марківський процес може бути дискретним (ланцюг Маркова з дискретними кроками, де кожен крок – це виконання пострілу чи переміщення) або квазібезперервним (напівмарковський процес, де перебування в стані триває певний випадковий час).

У нашій роботі доцільно використати дискретно-крокову модель, в якій кожен крок складається з двох фаз: стрільба (стан S_A) та наступний маневр (стан

S_B). У такий спосіб за один крок модель проходить через $S_A \rightarrow S_B$ (або завдання виконується, або втрачається установка).

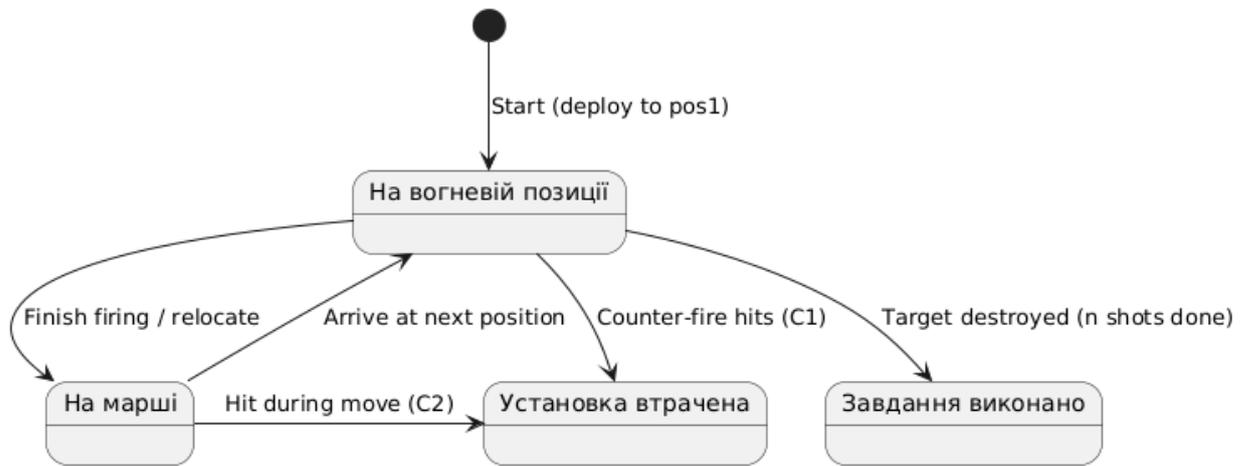


Рис. 3.1. Діаграма станів Марківського процесу бойової роботи АУ. Джерело: розроблено автором.

Визначаємо такі параметри моделі:

- p_{C1} – імовірність ураження установки під час однієї фази стрільби (перехід $S_A \rightarrow S_{lost}$). Цей параметр залежить від можливості виявлення позиції противником та точності його пострілу. Згідно з [28] після першого пострілу ймовірність того, що АУ2 накриє АУ1 вогнем, різко зростає. Тому для перших пострілів можна вважати p_{C1} низькою, а після певного моменту – високою (майже 1, якщо довго стріляти з однієї точки). У спрощеній моделі можна задати постійну імовірність влучання на кожен постріл, що відображає усереднений ризик.

- $p_{C2,j}$ – імовірність ураження на марші під час руху по дорозі типу j (перехід $S_B \rightarrow S_{lost}$). Це параметр для кожного можливого маршруту (наприклад, $j = 1$ – найшвидший шлях, але найбільш відкритий; $j = 3$ – довший шлях, але з кращим прикриттям і меншим ризиком). Значення $p_{C2,j}$ може бути отримане з вирахування часу перебування в дорозі та інтенсивності вогню противника.

- λ_b – інтенсивність раптових відмов техніки (незалежних від бойових дій), що використовується для оцінювання втрати боєздатності суто через технічні причини [28].

- λ_i – інтенсивність відмов внаслідок втрати боєздатності (накопичення численних пошкоджень). Цей параметр можна пов'язати з поточним значенням коефіцієнту боєздатності K : чим більша зношеність, тим вище λ_i . В моделі [28] запропоновано техніку оновлення λ_i шляхом ефективного збільшення працездатності системи на Δt після кожного значного бойового впливу (влучання), що еквівалентно прискоренню настання відмови.

- k_{stv}, k_{hod} – втрати боєздатності (зменшення коефіцієнту K) на один постріл через зношеність ствола і, відповідно, ходової частини [28].

- k_{tr_stv}, k_{tr_hod} – втрати боєздатності на одне переміщення (марш) через зношеність (приміром, ствола або ходової частини) [28].

- T_A – час, необхідний на один постріл (або на серію з a_i пострілів на i -тій позиції). Цей термін включає наведення, постріл і можливу корекцію.

- $T_{B,j}$ – час переходу між позиціями маршрутом j .

- n – загальна кількість пострілів, що необхідна для знищення цілі (за умови, що всі постріли влучні). У нашій моделі n також дорівнює максимальній кількості позицій, оскільки ми припускаємо мінімум один постріл з кожної позиції [28]. Однак, як буде продемонстровано, оптимальна тактика може полягати в тому, щоб не використовувати всі n позицій, а здійснювати по кілька пострілів лише з деяких із них.

Варто зазначити, що Марківська модель в даному випадку є неоднорідною (переходи можуть змінюватися час від часу). Це зумовлено тим, що ситуація розвивається динамічно, а саме: після перших пострілів супротивник, скоріш за все, виявить батарею, тому ризики зростають. Все ж для спрощення розрахунків можливе наближення до однорідного Марківського ланцюга з середніми

ймовірностями або ж побудова розгорнутого простору станів з врахуванням зміни ризиків з черговим пострілом.

Так, можна визначити підстани $S_A^{(i)}$ – «стрільба, зроблено i -тий постріл», для $i = 1, 2, \dots, n$. Переходи між цими підстанами описуватимуть ситуацію, коли АУ1 продовжує стріляти з тієї ж позиції. Але наша стратегія передбачає перехід у S_B після невеликої кількості пострілів, тому ми не деталізуємо S_A за i .

Підсумовуючи, зауважимо, що для обчислення ключових показників (наприклад, імовірності успішного виконання завдання, очікуваних втрат боєздатності, часу виконання) достатньо врахувати:

- вірогідність Pr_{complete} , що процес досягне стану S_{done} раніше, ніж S_{lost} ;
- математичне сподівання залишкової боєздатності $E[K_{\text{final}}]$ у момент завершення завдання (якщо завершено успішно).
- розподіл часу виконання завдання.

Марківська модель дозволяє знайти Pr_{complete} шляхом складання рівнянь Колмогорова для ймовірностей перебування в станах. Оскільки процес може закінчитися абсорбацією (успіх або втрата), доцільно розрахувати імовірність поглинання в кожному зі станів. Це типова задача для абсорбуючих Марківських ланцюгів: ймовірність успішного завершення Pr_{done} можна знайти, розв'язавши систему лінійних рівнянь балансу для незавершених станів, або методом фон Неймана ($F = Q^k$, де Q – фундаментальна матриця переходів між транз'єнтними станами). У такому разі цю імовірність також можна отримати ітераційним алгоритмом (імітаційним або методом динамічного програмування), про який йтиметься нижче.

Після визначення структури Марківської моделі варто звернути увагу на створення алгоритмів, які на її основі дозволяють прогнозувати подальший розвиток ситуації і приймати рішення в управлінні. Під прогнозуванням вірогідних станів розуміємо обчислення ймовірностей тих чи інших подій/станів (наприклад, імовірності ураження установки на наступному етапі, ймовірності

успішного знищення цілі за k кроків тощо) з метою вибору оптимальної дії на даний момент.

Враховуємо основні завдання алгоритмічного забезпечення:

1. На основі поточного стану (значення боєздатності K , номер пострілу, наявність/відсутність ворожого вогню) оцінити ймовірності переходів під час різних можливих дій. Наприклад, якщо АУ1 залишається стріляти ще один раз з поточної позиції, яка ймовірність α того, що її буде уражено протягом цього пострілу? А якщо перейти на нову позицію зараз, яка ймовірність β бути ураженим на марші?

2. Сформувати систему можливих рішень (дозволених дій) у поточному стані. Як правило, це дві дії: «стріляти» (u_1) або «маневрувати» (u_2). Можливе також рішення «припинити виконання завдання» у разі, якщо ризик став занадто високим (в реальності може означати відмову від завдання, але такий перебіг подій не розглядається, оскільки завдання має бути виконано).

3. Прорахувати очікувані наслідки кожної дії в заданий термін ключових показників (ймовірності успіху, очікуваної боєздатності, часу тощо). Для цього використовується прогнозування на декілька кроків вперед з урахуванням Марківської моделі.

4. Вибрати дію, що оптимізує цільову функцію або забезпечує виконання обмежень. Цільовою функцією може бути, наприклад, максимізація ймовірності успіху Pr_{complete} при обмеженні математичного сподівання часу виконання або мінімізація очікуваних втрат боєздатності під час обов'язкового виконання завдання.

Оскільки поточний стан після кожного кроку визначається попереднім станом і прийнятим рішенням, завдання вибору оптимальної послідовності дій має характер стохастичної задачі оптимального управління і може бути вирішена методами динамічного програмування на графі станів [25]. При цьому

використовуються алгоритми, що перебирають можливі «структури виконання завдання» і порівнюють результати.

У роботі [28] запропоновано розбити загальний алгоритм пошуку рішення на кілька спеціалізованих модулів (алгоритмів), що обчислюють окремі аспекти.

Алгоритм «Positions» (позиції) – генерує варіанти розподілу пострілів по вогневих позиціях. Фактично він визначає масив $a[1..m]$, де $a(i)$ – кількість пострілів на i -тій позиції, а m – число позицій, що будуть використані. У нашій постановці $m \leq n$, при цьому $\sum_{i=1}^m a(i) = n$. Ми задаємо мінімум $a(i) \geq 1$. Алгоритм перебирає різні допустимі набори $\{a(i)\}$.

Алгоритм «Change of position» (зміна позиції) – формує варіанти маршрутів між позиціями. Визначається масив $b[1..m-1]$, де $b(j)$ приймає значення $\{1, 2, \dots, s\}$ – це номер дороги, якою здійснюється перехід з позиції j на позицію $j+1$ [28]. Алгоритм перебирає можливі комбінації $\{b(j)\}$.

Алгоритм «Combat capability» (боєздатність) – розраховує кінцевий рівень боєздатності установки АУ1 після виконання завдання для заданої структури $(a(1); b(1); a(2); \dots; a(m))$. Цей алгоритм фактично симулює послідовне застосування формул оновлення K : починаючи з K_{mch} (початкового значення боєздатності, наприклад 0.965 або 96.5% [26]), обчислює K після кожного етапу (після стрільби на позиції i – формула для PA_i , після маршу на позицію $i+1$ – формула для PB_i). Наприклад, після роботи на позиції i боєздатність визначається так:

$$PA_i = PB_{i-1} - \Delta K_{A_i}, \quad (3.1)$$

де PB_{i-1} – боєздатність після попереднього переміщення, а ΔK_{A_i} – сумарна втрата боєздатності на i -тій позиції. Вона складається із втрат від власних пострілів $(a_i \cdot (k_{stv} + k_{hod}))$ та можливих втрат від вогню противника (vs_k у разі, якщо сталися влучання) [28]. Аналогічно після маршу на позицію $i+1$:

$$PB_i = PA_i - \Delta K_{B_i}, \quad (3.2)$$

де $\Delta K_{B_i} = k_{tr_stv} + k_{tr_hod}$ (втрати від одного переміщення по вибраному шляху; за потреби можна врахувати множник більше 1, якщо дорога дуже довга чи важка).

Алгоритм «Time» (час) – обчислює загальний час виконання завдання за даною структурою. Він сумує часи всіх фаз:

$$T_{total} = \sum_{i=1}^m (a(i) \cdot T_A(i)) + \sum_{j=1}^{m-1} T_{B,b(j)}, \quad (3.3)$$

де $T_A(i)$ – час виконання $a(i)$ пострілів на i -тій позиції (або $T_A(i) = a(i) \cdot t_{AU1}$, якщо стрільба секвентна) і $T_{B,b(j)}$ – час маршу дорогою $b(j)$.

За допомогою таких модулів синтезується загальний алгоритм визначення оптимальної структури виконання завдання [28]. У спрощеному вигляді його можна подати так.

Крок 1. Ініціалізація: задати початкову структуру. Наприклад, почати з варіанта, коли $a(1) = n$ (тобто зробити всі постріли з однієї позиції, не маневруючи). Вважаємо його екстремальним варіантом стратегії.

Крок 2. Обчислити для поточної структури фінальну боєздатність K_{final} (алгоритм «Combat survivability») та загальний час T_{total} (алгоритм «Time»). Перевірити, чи виконано обмеження (наприклад, K_{final} не нижче допустимого мінімуму або T_{total} не перевищує дедлайн).

Крок 3. Модифікувати структуру: перебрати інші комбінації. Наприклад, спочатку змінювати маршрути $b(j)$ на альтернативні (алгоритм «Change of position») і повторити обчислення. Обрати серед них той варіант, що дає кращий результат (скажімо, максимальний K_{final} при фіксованому розподілі a).

Крок 4. Після відбору маршрутів змінити розподіл пострілів a (алгоритм «Positions»). Наприклад, зменшити $a(1)$ на 1 (тобто перенести один постріл на наступну позицію, таким чином m збільшиться на 1, якщо було $m = 1$), у

результаті отримуємо нову структуру. Для кожної такої структури знову перебрати маршрути (повторити крок 2-3).

Крок 5. Таким чином здійснюється повний перебір (або частковий перебір) всіх можливих структур $(a; b)$. Для кожної структури зберігаються результати: K_{final} і T_{total} .

Крок 6. Визначають систему «найкращих» структур. Якщо сформульовано однокритеріальну оптимізацію, обирають один оптимум (наприклад, мінімальний час серед тих структур, де K_{final} не нижче певного порогу). У більш загальному випадку формується множинність Парето-оптимальних рішень за двома критеріями – максимізація K_{final} (або Pr_{complete}) та мінімізація часу T_{total} . Ця парадигма рішень пропонується командирові (або використовується в АСУ) для вибору тактики залежно від пріоритетів операції.

Алгоритм перебору забезпечує знаходження глобально оптимальної структури в межах зроблених припущень. Його складність зростає експоненційно зі збільшенням n та кількості варіантів шляхів, але в реальних умовах n невелике (як правило, < 10 пострілів по одній цілі), а альтернативні маршрути обмежені кількома варіантами, тому задача адаптована до розв'язування.

Наприклад, для $n = 4$ пострілів можливо розглянути такі структури:

$(a(1) = 4)$ – всі 4 постріли з першої позиції, $m = 1$.

$(a(1) = 3; a(2) = 1)$ – 3 постріли на першій, потім перехід, 1 постріл на другій.

$(a(1) = 2; a(2) = 2)$ – 2 постріли, перехід, 2 постріли.

$(a(1) = 2; a(2) = 1; a(3) = 1)$ – 2 постріли, перехід, 1 постріл, перехід, 1 постріл.

$(a(1) = 1; a(2) = 3)$ – 1 постріл, перехід, 3 постріли.

$(a(1) = 1; a(2) = 2; a(3) = 1)$ – 1 постріл, перехід, 2 постріли, перехід, 1 постріл.

$(a(1) = 1; a(2) = 1; a(3) = 2)$ – 1 постріл, перехід, 1 постріл, перехід, 2 постріли.

$(a(1) = 1; a(2) = 1; a(3) = 1; a(4) = 1)$ – всі постріли з окремих позицій (максимально обережна стратегія).

Для кожної з цих структур алгоритм перебирає маршрути між позиціями (якщо більше однієї позиції), розраховує кінцеву боєдатність. За результатами розрахунку може виявитись, наприклад, що структура $(2; 2)$ дає значно більшу залишкову боєдатність, ніж (4) , з невеликою перевагою в часі, тобто підтверджує доцільність зміни позиції після 2 пострілів. А структура $(1; 1; 1; 1)$ хоча і мінімізує ризик (максимальна безпека), може виявитись занадто повільною (занадто багато часу витрачається на три переміщення). Отже, оптимальним компромісом буде або $(2; 2)$, або $(2; 1; 1)$, чи $(1; 2; 1)$ в залежності від параметрів доріг і ризиків [25, 28].

Варто зауважити, що під час відбору структура оцінюється, зокрема, на предмет виконання умови заданого рівня надійності АСУ. Якщо для якоїсь структури розрахований кінцевий коефіцієнт боєдатності K_{final} виходить нижче допустимого порогу (наприклад, система надто зношена або висока вірогідність, що буде виведена з ладу), така структура відкидається як неприйнятна, навіть якщо вона забезпечує швидке виконання завдання. Таким чином гарантується виконання вимоги надійності.

Алгоритми прогнозування ймовірнісних станів можуть бути також реалізовані через безпосереднє розв'язання системи рівнянь Маркова. Наприклад, для простої моделі можна записати рекурентні співвідношення для імовірності успіху Pr_i після i -того пострілу. Якщо позначити через q_i імовірність залишитись неураженим під час i -того пострілу і можливого маневру після нього, то:

$$\text{Pr}_i = q_i \text{Pr}_{i+1}, \quad \text{Pr}_n = q_n, \quad (3.4)$$

а повна імовірність успіху $\text{Pr}_{\text{done}} = \text{Pr}_0 = \text{Pr}_1 = q_1 q_2 \cdots q_n$ (за умови, що рішення «стріляти ще» прийнято аж до n -го пострілу). Натомість адаптивний алгоритм фактично вибирає на кожному кроці, чи включати черговий множник q_i (тобто продовжити стрільбу), чи зробити маневр, який змінює значення наступних q_j . Це більш складна оптимізаційна задача, яка й була розв'язана описаним вище методом.

Прикметно, що під час розв'язання систем диференціальних рівнянь Колмогорова для безперервних Марківських процесів (наприклад, для уточнення часових показників) можуть виникати нелінійні рівняння, зокрема рівняння Ріккати. У випадках, коли модель потребує такого аналітичного уточнення (скажімо, під час розрахунку точного значення $K(t)$ як функції часу з урахуванням імовірнісних впливів), можуть бути застосовані спеціальні методи розв'язання цих рівнянь. Зокрема, в роботі [27] розроблено метод розв'язання рівнянь Ріккати спеціального типу з представленням результатів в аналітичному вигляді. Метод базується на лінеаризації та спеціальному прийомі знерозмірювання рівнянь, що продукує розв'язання через елементарні функції [27]. Аналогічні підходи можуть бути використані для інтегрування рівнянь стану системи боєздатності, якщо їх уподібнити до рівняння Ріккати. Хоча у більшості випадків для дискретної моделі достатньо чисельного рішення, наявність аналітичних методів підвищує достовірність і швидкість оцінювання окремих компонентів (наприклад, експертиза зміни надійності з часом за відомих λ_b та λ_i [28]).

Отже, результатом розробки Марківської моделі є:

- множина станів $\{S\}$, що описують всі релевантні ситуації в процесі бойового застосування артилерії (включно з успішним завершенням і втратами);
- набір параметрів моделі, що кількісно характеризують імовірнісні переходи і втрати боєздатності на кожному етапі;

– алгоритм, який дозволяє, виходячи з поточного стану, прогнозувати розподіл ймовірностей для наступних станів за різних варіантів дій та вибрати оптимальну дію. Цей алгоритм можна реалізувати як програмний модуль у складі АСУ.

Далі, доцільно розглянути, як інтегрувати розроблену Марківську модель з імітаційними методами для побудови комплексної системи підтримки прийняття рішень.

3.3 Інтеграція Марківських моделей із симуляційними методами

Для ефективної взаємодії між дискретною марковською моделлю адаптивного управління та безперервною симуляційною моделлю бойових дій необхідна єдина інформаційна основа [28, 30], яка б передавала результати симуляції (події, спостереження) до системи прийняття рішень. У межах запропонованого дослідження така взаємодія реалізована через впровадження спеціальних інформаційних одиниць (**InformationUnit**), розроблених у розділі 2, що слугують інтерфейсом між симуляцією та Марківською моделлю. Доречною видається спроба розглянути, як використання цих об'єктів дозволяє забезпечити узгоджену роботу моделі адаптивного управління та симуляційної моделі бойової обстановки [26, 31], а також, яким чином вони впливають на процес прийняття рішень в умовах невизначеності.

Як зазначалося у розділі 2, було розроблено базовий клас інформаційної одиниці **InformationUnit**, а також його спеціалізовані «спадкоємці» **AcousticInformationUnit** та **OpticalInformationUnit**. Клас **InformationUnit** визначає узагальнену структуру для представлення будь-яких релевантних даних про бойову обстановку, що надходять із симуляційної моделі. Він може містити поля, такі як час отримання, джерело або тип інформації, та узагальнений вміст (дані спостереження). «Спадкоємці» конкретизують цей вміст під певний тип сенсорних даних.

AcousticInformationUnit містить дані акустичних спостережень (наприклад, параметри звукової хвилі від пострілу, рівень звуку, часові характеристики, напрямок на джерело звуку тощо), які моделюють інформацію від пасивних акустичних станцій або мікрофонних датчиків на полі бою.

OpticalInformationUnit містить дані оптичних спостережень (наприклад, яскравість спалаху пострілу, зображення або координати виявленого спалахом об'єкта, характеристики теплового сліду), що відповідають інформації від оптичних або інфрачервоних сенсорів, БПЛА чи інших засобів візуальної розвідки.

Завдяки такій ієрархії класів система управління отримує уніфіковані об'єкти **InformationUnit** незалежно від джерела даних. Це спрощує інтеграцію: марковська модель адаптивного управління може оперувати абстрактними інформаційними одиницями, не прив'язуючись до деталей конкретних сенсорів або форматів даних. Водночас досягається гнучкість та розширюваність системи, за потреби можна додати нові типи інформаційних одиниць (наприклад, радіолокаційну чи термічну) без суттєвої зміни структури, що є перевагою ООП. Окрім уніфікації інтерфейсу, використання інформаційних об'єктів забезпечує розв'язок між моделлю навколишнього середовища та моделлю управління. Етапи симуляції можуть акумулюватися у вигляді черги об'єктів **InformationUnit**, які система управління обробляє послідовно, уникаючи пропуску важливої інформації навіть за умови інтенсивних подій. Це сприяє стійкості системи до навантажень та упорядковує обмін даними між підсистемами.

Далі представлено механізм передачі інформаційних одиниць до системи управління та вплив на рішення **MarkovModel**. У симуляційній моделі бойової обстановки генеруються події, які відповідають важливим змінам ситуації (постріл АУ, виявлення противником спалаху пострілу, наближення ворожого снаряду тощо). Кожна така подія перетворюється на відповідну інформаційну

одиницю, яка надсилається до системи управління. Наприклад, коли артилерійський підрозділ виконує постріл у симуляції, створюється об'єкт **AcousticInformationUnit**, що містить акустичні характеристики цього пострілу. Якщо ж симуляційна модель визначає, що спалах пострілу міг бути помічений (імовірно ворожими засобами спостереження), формується об'єкт **OpticalInformationUnit** із відповідними даними про візуальний сигнал. Це відбувається на основі ймовірнісної моделі: кожен постріл має задану ймовірність бути виявленим, і симуляція випадково (методом Монте-Карло) визначає, чи є факт виявлення. Таким чином, невизначеність факту виявлення реалізується у симуляції безпосередньо, що дозволяє перевіряти реакцію системи управління на різні сценарії розвитку подій (від повної непоміченості до негайного вияву позиції). Система управління (**ControlSystem**) отримує інформацію про ці об'єкти через механізм черги подій або викликів з боку симуляції.

Сама симуляційна модель враховує параметри бойового середовища під час формуванні подій. Зокрема, віртуальна АУ (**ArtilleryUnit**) має свої координати, характеристики маскуванню та інші властивості, які впливають на ймовірність її виявлення. Подібно до цього умови поширення звуку та видимості (час доби, рельєф) враховані для генерації **AcousticInformationUnit** і **OpticalInformationUnit**. Маємо підстави стверджувати, що сценарії, які надходять у систему управління, є результатом детального імітаційного розрахунку, максимально наближеного до реальних умов бойових дій.

У класі **ControlSystem** передбачено модуль обробки вхідних інформаційних одиниць. Він аналізує отримані **InformationUnit** та, залежно від їх типу, ініціює відповідні дії або оновлення моделей. Зокрема, надходження **AcousticInformationUnit** від власного пострілу може викликати дві ключові процедури: (1) аналіз зношеності гармати через підсистему **WearAnalyzer** та аналіз даних стрільби для оцінювання ступеня зношення. Зокрема, **WearAnalyzer** відстежує кількість здійснених пострілів, накопичене теплове навантаження

тощо, на основі яких обчислює поточний рівень зношеності ствола. У разі наявності додаткових сенсорних даних (наприклад, зміни інтенсивності дульного полум'я або спектру звуку пострілу) він також може враховувати їх для уточнення оцінювання. Отже, **WearAnalyzer** надає Марківській моделі кількісну індикацію технічного стану зброї в режимі реального часу та оновлення оцінювання технічного стану АУ; (2) повідомлення Марківської моделі про факт пострілу для врахування його в ймовірнісній моделі виявлення. Надходження **OpticalInformationUnit**, що сигналізує про ймовірне виявлення позиції за оптичними ознаками (спалахом), безпосередньо впливає на стан марковської моделі, переводячи її в стан підвищеної загрози (наприклад, «виявлено противником» з певною вірогідністю).

Марковська модель (**MarkovModel**), впроваджена в систему управління, оновлює свій поточний стан або розподіл ймовірностей станів, отримуючи інформацію від **ControlSystem**. У контексті даної моделі визначено множину станів, що відображають як бойову обстановку, так і стан самої системи. Наприклад, можуть бути передбачені стани, пов'язані з рівнем загрози для АУ: «не виявлено», «можливе виявлення», «виявлено»; а також стани, пов'язані з технічним обслуговуванням: «справний», «частково зношений», «критична зношеність». Переходи між цими станами визначаються ймовірностями, які коригуються на основі нових даних. Кожна отримана інформаційна одиниця змінює адекватність системи в тому чи іншому стані. Так, після кількох пострілів без будь-яких даних **OpticalInformationUnit** система продовжує вважати, що ймовірність залишатися невиявленою є високою. Але надходження навіть одного нового показника **OpticalInformationUnit** різко збільшує ймовірність стану «виявлено», що впливає на подальші рішення. Водночас регулярне надходження **AcousticInformationUnit** від власних пострілів поступово збільшує потенціал експертизи зношення ствола, переводячи модель із технічного стану «справний» до «частково зношений», і далі до «критично зношений», якщо стрільба

продовжується без перерви. Варто зазначити, що **MarkovModel** фактично функціонує як частково спостережувана Марківська модель: справжній стан (наприклад, точно виявлено установку чи ні) не спостерігається прямо, а інформаційні одиниці слугують засобом для оновлення розподілу ймовірностей станів згідно з байєсівським підходом під час надходження нових даних.

За умов оновленого стану Марківська модель адаптивного управління приймає рішення щодо подальших дій. Ці рішення можуть включати, наприклад, команду на зміну позиції артилерійського підрозділу (якщо ймовірність бути ураженим контрбатареїним вогнем висока), коригування режиму вогню (зменшення темпу стрільби або пауза для охолодження ствола при високому зношенні) або продовження вогню (якщо рівень загрози низький і технічний стан допустимий). Система **ControlSystem** виконує ці рішення, надсилаючи відповідні команди об'єкту **ArtilleryUnit** у симуляції (наприклад, ініціює переміщення на нові координати або накладає обмеження на стрільбу). У такий спосіб замикається цикл «симуляція – оцінка – рішення – дія»: інформаційні одиниці забезпечують зворотний зв'язок від симуляційної моделі до моделі управління, дозволяючи останній адаптивно реагувати на актуальну ситуацію.

Узагальнений цикл функціонування системи має такий вигляд.

Крок 1. Середовище (симуляційна модель) генерує події та формує відповідні інформаційні одиниці, які надходять до **ControlSystem**.

Крок 2. **ControlSystem** приймає отримані **InformationUnit** (кілька за один крок) та обробляє їх, оновлюючи внутрішні моделі (стан **MarkovModel** через виклик **updateState** визначає, показники зношеності через **WearAnalyzer** тощо).

Крок 3. На основі оновленого стану **MarkovModel** обчислює оптимальну дію/рішення (метод **decideAction**).

Крок 4. **ControlSystem** виконує це рішення, надсилаючи команду об'єкту **ArtilleryUnit** у симуляції (наказ стріляти, змінити позицію, припинити вогонь тощо).

Далі цикл повторюється з кроку 1, поки триватиме симуляція або бойова операція. На основі описаної структури було побудовано оновлену UML-діаграму класів, яка відображає інтеграцію Марківської моделі із симуляційною системою, зокрема введені інформаційні одиниці. На діаграмі показано класи **InformationUnit** (абстрактний базовий клас) та його «спадкоємці» **AcousticInformationUnit** і **OpticalInformationUnit**, клас аналізатора зношеності **WearAnalyzer** [43, 71], а також основні компоненти системи управління: **ControlSystem**, **ArtilleryUnit** та **MarkovModel**.

UML-діаграму наведено на рис 3.1. Вона відображає описану структуру класів і їх взаємодію, що узгоджується з логікою роботи системи, яку описано вище.

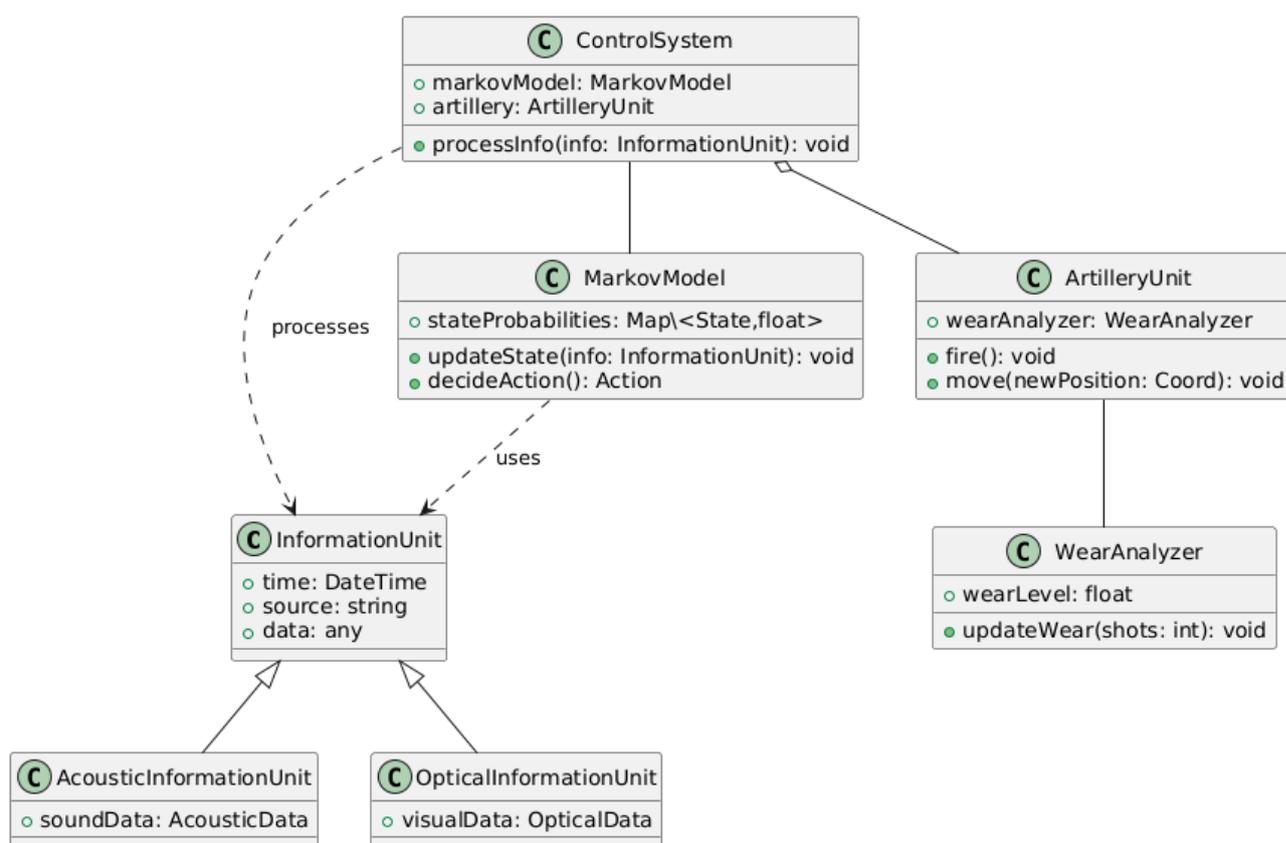


Рис. 3.1. UML-діаграма інтеграції Марківської моделі з симуляційними методами.

Джерело: розроблено автором.

Отже, інтеграція імовірнісної моделі прийняття рішень (марковської) із реалістичною симуляцією бойових дій формує інтелектуальний рівень управління, що поєднує прогнозування та безперервний зворотний зв'язок [26, 31] в реальному часі. Це дозволяє суттєво підвищити живучість, надійність і ефективність артилерійських систем, навіть у найскладніших бойових умовах. Запропонована інтеграція Марківської моделі з симуляційною моделлю бойових дій через систему інформаційних одиниць безпосередньо сприяє підвищенню надійності управління артилерійськими системами в умовах невизначеності [12, 29]. По-перше, Марківська модель забезпечує формалізоване врахування невизначеності: замість детерміністичних рішень, що можуть виявитися хибними при неповній інформації, система приймає рішення на основі ймовірнісного оцінювання, що знижує ризик помилок. По-друге, своєчасний обмін інформацією через **InformationUnit** яка забезпечує, що будь-які зміни обстановки (виявлення, загрози, технічні відмови) негайно відображаються в моделі управління. Це дозволяє оперативно реагувати на небезпеки (наприклад, швидко змінювати позицію під час загрози контрвогню) та уникати надмірного навантаження на саму артсистему (запобігаючи критичному зношенню ствола через регулювання темпу стрільби). По-третє, об'єктно-орієнтована реалізація інтеграції спрощує тестування та налагодження системи. Можливість моделювати різноманітні сценарії віртуального бою та одержувати статистичні дані про ефективність прийняття рішень [28, 30] дозволяє адекватно оцінити надійність запропонованого підходу.

3.4 Реалізація алгоритмічного та інформаційного забезпечення на основі об'єктно-орієнтованих методів

Розроблена система імітаційного моделювання складається з комплексу взаємозалежних класів [72–74] (рис. 3.2). Основним координатором сценарію бойових дій виступає клас **Battlefield** [28, 30], який ініціалізує початкові параметри сценарію та керує перебігом імітаційного експерименту. Клас

Battlefield агрегує об'єкти класів **ArtilleryUnit** (АУ атакуючої сторони), **EnemyUnit** (артилерійська система противника), а також об'єкти класу **Environment**, що описують умови навколишнього середовища (рельєф місцевості, погодні умови, наявність укриттів) [75].

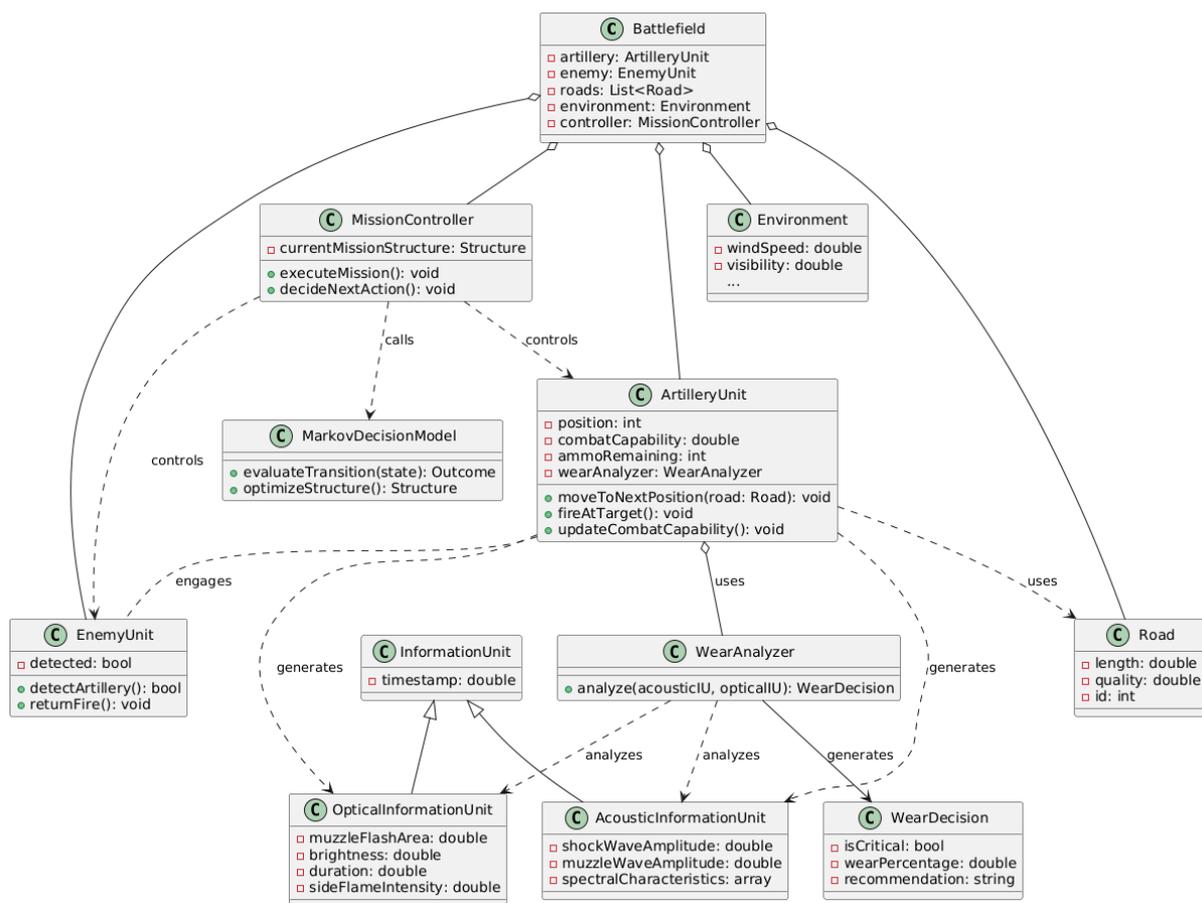


Рис. 3.2 UML-діаграма класів програмної системи адаптивного управління
Джерело: розроблено автором.

Клас **ArtilleryUnit** містить детальні показники поточного стану установки, такі як координати позиції, рівень боєздатності, залишок боєкомплекту [12, 31], а також поточний стан зношеності ствола, що контролюється за допомогою класу **WearAnalyzer**.

Для детального моделювання умов довкілля використовується клас **Environment**, який містить об'єкти типу **Road**. Ці об'єкти зберігають інформацію

про маршрути між позиціями, зокрема довжину маршруту та якість дорожнього покриття, що впливає на час переміщення та ймовірність обстрілу в русі [26, 29].

Взаємодія між об'єктами системи будується за принципом чіткої інкапсуляції ролей та відповідальності. Центральним класом, що реалізує адаптивний алгоритм управління, є **MissionController**. Саме він відповідає за координацію дій АУ, визначаючи оптимальну стратегію ведення бойових дій за допомогою класу **MarkovDecisionModel** [26, 29, 31].

Клас **MissionController** реалізує метод **executeMission**, що забезпечує послідовне чергування фаз стрільби та переміщення відповідно до ситуації на полі бою. На кожному етапі імітації він отримує інформаційні одиниці (**InformationUnit**), які надходять від класів **ArtilleryUnit** та **EnemyUnit**, та передає їх до марковської моделі (**MarkovDecisionModel**) для перегляду ймовірностей переходів між станами й коригування стратегії.

Клас **MarkovDecisionModel** відіграє вирішальну роль в адаптивному управлінні. Він інкапсулює марковську модель процесу ведення вогню, яка описує різні стани АУ і переходи між ними.

Кожен перехід між цими станами супроводжується ймовірнісним прогнозом зміни боєздатності, часу та витрат [12, 28, 30]. Саме інтеграція інформаційних одиниць дозволяє класу **MarkovDecisionModel** динамічно оновлювати ймовірності переходів на підставі реальних (змодельованих) подій, забезпечуючи точність і оперативність прийнятих рішень.

Для покращення точності прогнозування технічного стану АУ, розроблено та інтегровано спеціалізовані інформаційні одиниці, описані в попередньому розділі. Клас **WearAnalyzer** використовує акустичні та оптичні дані (**AcousticInformationUnit**, **OpticalInformationUnit** передаються між симуляційними класами та марковською моделлю), отримані під час симуляції, для визначення ступеня зношеності ствола гармати. Це дозволяє в реальному часі оцінювати можливість подальшого використання АУ без ризику критичної

зношеності, що сприяє раціональному використанню ресурсу озброєння та запобіганню технічних відмов у ході бою.

Отже, інтегрована система завдяки використанню Марківських моделей, імітаційних методів та спеціалізованих інформаційних одиниць забезпечує високий рівень адаптивності, точності прогнозування й оперативності реагування на зміни бойової обстановки, що значно підвищує ефективність і надійність управління артилерійськими системами.

Алгоритми визначення оптимальної стратегії є складовою інформаційного забезпечення, яке включає спеціалізовані алгоритми для пошуку оптимальної структури виконання бойового завдання. Під структурою розуміємо послідовність чергування пострілів і переміщень: $a(1); b(1); a(2); b(2); \dots; a(n)$, де $a(i)$ – кількість пострілів з i -ї вогневої позиції, $b(j)$ – індекс маршруту (дороги) при переході з j -ї позиції на $(j + 1)$ -шу [25]. Розроблено декілька взаємопов'язаних алгоритмів: «*Positions*» – генерує варіанти розподілу n пострілів по позиціях (масив $a[1..n]$); «*ChangePosition*» – генерує можливі комбінації маршрутів між позиціями (масив $b[1..n - 1]$); «*CombatCapability*» – обчислює кінцеву боєздатність P АУ після виконання бойового завдання для заданої структури (a, b) ; «*Time*» – обчислює загальний час виконання завдання для заданої структури [25].

На основі запропонованих модулів побудовано загальний алгоритм пошуку оптимальної структури адаптивного управління. Алгоритм здійснює відбір можливих варіантів (потенціал структур обмежено фізичними умовами, наприклад, припущенням, що кількість вогневих позицій не перевищує кількість пострілів n). Для кожної відібраної структури проводиться моделювання виконання бойового завдання та розрахунок двох ключових показників: фінальної боєздатності P та сумарного часу виконання T . Алгоритм реалізовано ітеративно.

Крок 1. Ініціалізація: припускається базова структура, за якої з кожної позиції здійснюється по одному пострілу ($a(i) = 1$ для всіх $i = 1..n$), а

переміщення між позиціями здійснюються найшвидшими маршрутами ($b(j) = 1$ для всіх j). Задаються початкові екстремальні значення: $P_{\max} = 0$ (максимально досягнута боєздатність), $P_{\min} = 1$ (мінімально досягнута боєздатність), $T_{\max} = 0$ (максимальний час), $T_{\min} = \infty$ (мінімальний час) [25].

Крок 2. Обчислення показників для поточної структури (a, b) : за допомогою алгоритмів «CombatCapability» та «Time» визначається залишкова боєздатність $P_A(n)$ після виконання n пострілів і загальний час T операції [25].

Крок 3. Порівняння з поточними екстремумами: отримані значення $P_A(n)$ та T порівнюються з накопиченими $P_{\max}, P_{\min}, T_{\max}, T_{\min}$. У разі покращення екстремумів, зберігаються відповідні структури як оптимальні (наприклад, структура, що дала найбільше P , зберігається окремо) [25].

Крок 4. Генерація нової структури: змінюється масив b (маршрути) на наступну комбінацію за допомогою алгоритму «ChangePosition» [25]. Після перебору всіх комбінацій маршрутів для поточного розподілу a змінюється розподіл пострілів a таким чином (алгоритм «Positions»): фактично збільшується число пострілів на деяких позиціях з метою дослідити випадки, коли з окремих позицій здійснюється не один, а більше пострілів [25]. Потім знову перебираються всі варіанти маршрутів b .

Крок 5. Цикл продовжується до перебору всіх допустимих структур (поки не будуть вичерпані можливі значення a і b). Після цього алгоритм завершується, а збережені оптимальні структури видаються як результат (наприклад, структура, що максимізує P , і структура, що мінімізує час T , або компромісна структура) [25].

Алгоритм пошуку оптимальної структури має істотну обчислювальну складність при значному n , проте в межах поставленого завдання значення n (кількість пострілів, необхідних для знищення цілі) є помірними (наприклад, $n = 10$). Тому ретельний відбір можливих варіантів є здійсненним і гарантує знаходження глобального оптимуму за критеріями ефективності. Отримана

структура (послідовність дій) потім використовується **MissionController**-ом для безпосереднього управління в імітації.

Розроблене алгоритмічне та інформаційне забезпечення дозволяє провести імітаційний експеримент для заданих початкових умов та перевірити роботу адаптивного алгоритму управління. В умовах експерименту АУ АУ1 (атакуюча сторона) повинна знищити нерухому ціль заданою кількістю пострілів n , мінімізуючи власні втрати боєздатності, тоді як АУ АУ2 намагається завдати втрат АУ1 контрвогнем. Початкова боєздатність АУ1 приймається $K_{мч} = 0.965$ (96.5%, характеризує повністю справний стан установки перед боєм) [25]. Кількість необхідних пострілів визначається важливістю цілі; в прикладному сценарії $n = 10$ пострілів. Припускаємо, що всі постріли АУ1 успішні (ціль потребує саме 10 влучань). Таблиця 3.1 наводить часові характеристики основних подій моделі, отримані на основі технічних даних і експериментів у симуляторі (зокрема, з використанням середовища ARMA 3 для верифікації реалістичності модельованих затримок і реакції противника) [25].

Таблиця 3.1 – Часові інтервали виконання дій артилерійською установкою (АУ1) та противником (АУ2)

Дія	Позначення	Час
Перехід АУ1 з похідного стану в бойовий на вогневій позиції (розгортання)	t_{mb}	5 хв
Виконання пострілу АУ1 по цілі (час на один постріл)	$t_{АУ1}$	15 с
Реакція АУ2: постріл по вогневій позиції АУ1 (час на один постріл противника)	$t_{АУ2}$	20 с
Перехід АУ1 з бойового стану в похідний (згортання, залишення позиції)	t_{bm}	2 хв
Час польоту снаряда АУ1 до цілі (визначає момент початку вогневої відповіді противника)	t_{st}	35 с (на 12 км)

Джерело: [28].

У табл. 3.1 засвідчено, що після пострілу АУ1 (подія А2) потрібно близько $t_{st} = 35$ с, щоб снаряд досяг цілі на відстані 12 км; цей час визначає, коли

противник отримає інформацію для наведення контрвогню. Час циклу пострілу і залишання позиції АУ1 (А2+А3) становить $t_{АУ1} + t_{bm} \approx 135$ с, тоді як цикл реакції противника (С1) – $t_{АУ2} + t_{st} \approx 55$ с. Це означає, що противник потенційно може здійснити ≈ 2 постріли у відповідь, якщо АУ1 залишається на позиції достатньо довго. Наш алгоритм, однак, може прийняти рішення про залишання позиції після одного пострілу, щоб обмежити противника одним пострілом у відповідь.

Таблиця 3.2 містить параметри, що визначають втрату боєздатності АУ1 за різних умов, а також фіксується тривалість переміщень для трьох типів доріг (маршрутів між позиціями) [25]. Дані узагальнено на основі експертного оцінювання та розрахунків зношеності. Видно, що якість дороги впливає як на час переміщення (t_m), так і на додаткове зношення техніки: переміщення гіршою дорогою призводить до більшого зниження боєздатності (вищі коефіцієнти $k_{бп,j}$ і $k_{хд,j}$ через зношування ствола та, відповідно, ходової частини), проте зменшує вразливість до ворожого вогню ($k_{вог,j}$ менший, бо противнику важче влучити по цілях, що рухаються пересіченою місцевістю).

Таблиця 3.2 – Параметри, що впливають на боєздатність АУ1 під час зміни позицій залежно від типу маршруту

Показник	1 (швидкий)	2 (середній)	3 (повільний)
Час маршу між позиціями $t_{m,j}$, с	180	720	1440
Зниження боєздатності через зношеність ствола, $k_{бп,j}$	0.000025	0.000055	0.000075
Зниження боєздатності через зношеність ходової частини, $k_{хд,j}$	0.00074	0.00094	0.00240
Зниження боєздатності через ворожий обстріл під час руху, $k_{вог,j}$	0.000055	0.000030	0.000015

Джерело: [26]

Загальна зміна боєздатності АУ1 за один цикл «постріл–маневр» моделюється так: припустімо, що перед виконанням i -го пострілу боєздатність становить $P_{B_{i-1}}$ (тобто після попереднього переміщення на позицію i ; для першої позиції $P_{B_0} = K_{мч}$). Після виконання a_i пострілів з i -ї позиції та можливого контрудару противника боєздатність зменшується до P_{A_i} за формулою:

$$P_{A_i} = P_{B_{i-1}} - (k_{\text{red}} + (k_{\text{бп}} + k_{\text{хд}}) t_{\text{АУ1}} a_i), \quad (3.5)$$

де k_{red} – сумарне відносне зниження боєздатності в результаті контрвогню противника (стан С1), а $k_{\text{бп}}$ і $k_{\text{хд}}$ – коефіцієнти зниження боєздатності через зношеність ствола та ходової частини за одиницю часу стрільби відповідно (значення взято з табл. 3.2). Величина k_{red} залежить від кількості влучань по АУ1 під час її перебування на позиції. У моделі вона обчислюється на основі серії знижень $1/(j(j+1))$ під час кожного наступного влучання j [25]. Зокрема, якщо противник здійснив d пострілів по АУ1, то

$$k_{\text{red}} = \sum_{j=1}^d \frac{1}{j(j+1)} = 1 - \frac{1}{d+1}, \quad (3.6)$$

що для $d = 1$ дає $k_{\text{red}} = 0.5$ (втрата 50% боєздатності), а для $d = 2$ – 0.67 (67%). Кількість пострілів d , що встиг зробити противник, залежить від часу перебування АУ1 на позиції і визначається за формулою [25]:

$$d = \text{INT} \left(\frac{a_i \cdot t_{\text{АУ1}} + t_{\text{bm}} - (t_{\text{АУ1}} + t_{\text{st}})}{t_{\text{АУ2}} + t_{\text{st}}} \right). \quad (3.7)$$

Ця формула враховує, що противник починає стріляти не раніше, ніж через t_{st} після першого пострілу АУ1, і може здійснювати постріли з інтервалом $t_{\text{АУ2}}$. Наприклад, для $a_i = 1$ маємо $d = 1$, а для $a_i = 2$ також $d = 1$ (противник не

встигає здійснити два постріли, якщо АУ1 обмежується двома пострілами і швидко залишає позицію). Таким чином, рішення здійснювати не більше двох пострілів з однієї позиції обмежує втрати від контрвогню одним влучанням [28]. Це підтверджує доцільність реалізованої адаптивної тактики.

Після залишання позиції i та переходу до позиції $i + 1$ боєздатність АУ1 додатково зменшується на величину зношеності під час маршу:

$$P_{B_i} = P_{A_i} - (k_{\text{бп},j} + k_{\text{хд},j} + k_{\text{вог},j}), \quad (3.8)$$

де j – номер маршруту, використаного для переходу (відповідні значення коефіцієнтів взято з табл. 3.2). Внесок $k_{\text{вог},j}$ враховує можливі втрати від ворожнього вогню під час руху (стан С2), що, як видно з табл. 3.2, є незначними на всіх типах доріг (порядку 10^{-5}). Формула (3.5) завершує розрахунок одного циклу. Після виконання останнього n -го пострілу з позиції k (де $k \leq n$) процес завершується, і показник P_{A_k} вважається залишковою боєздатністю АУ1 на час завершення операції.

Варто відзначити інтеграцію до складу інформаційного забезпечення спеціалізованих діагностичних модулів, зокрема реалізації підсистеми моніторингу технічного стану ствола гармати, яка аналізує параметри пострілів у процесі імітації (наприклад, тиск порохових газів, акустичний профіль пострілу) і на основі алгоритму класифікації LS-SVM оцінює ступінь зношеності ствола. Алгоритм на базі методу найменших квадратів для опорних векторів LSSVM було попередньо вивчено на підборі сигналів пострілів для різних рівнів зношеності каналу ствола. Впровадження цього модуля дозволяє під час моделювання виявити критичне погіршення балістичних характеристик. У разі перевищення допустимої зношеності система може згенерувати попередження або внести корективи в алгоритм (наприклад, збільшити кількість пострілів, якщо точність знижується, або, навпаки, припинити стрільбу для заміни ствола). Така

діагностика підвищує надійність системи управління засобом врахування технічного стану зброї в реальному часі.

До того ж при реалізації математичних моделей окремих підсистем використано аналітичні методи, розроблені авторами раніше. Наприклад, для опису внутрішньобалістичних процесів (розподілу температури порохових газів уздовж ствола) застосовано метод розв'язання рівнянь Ріккати, що дозволило отримати аналітичне оцінювання температурного поля під час пострілу [27]. Ці результати були використані під час калібрування моделі зношення ствола і визначення коефіцієнтів $k_{\text{бп}}(t)$, що залежать від температурного режиму стрільби. Варто зауважити, що алгоритмічне та інформаційне забезпечення системи включає не лише модель бою та оптимізацію тактики, а й комплекси алгоритмів технічної діагностики та підтримки прийняття рішень, що разом забезпечують адаптивне управління АУ в умовах невизначеності.

3.5 Аналіз ефективності адаптивного управління за умов динамічних збурень

Розроблена система адаптивного управління була досліджена в серії імітаційних експериментів для оцінювання її ефективності за умов динамічних збурень. Під динамічними збуреннями розуміємо як зовнішні фактори – непередбачувані дії противника, зміни обстановки бою (раптова поява нових загроз, зміна інтенсивності ворожого вогню), так і внутрішні – поступове зниження ресурсів і характеристик самої АУ (нагрів і зношеність ствола, витрата боєкомплекту, можливі відмови систем). Марковський підхід до управління дозволяє формалізувати такі невизначеності через ймовірнісні моделі переходів між станами і тим самим забезпечити більш стійку стратегію у порівнянні з традиційними методами.

Попереднє, визначалися два основні показники результативності бойової роботи: залишкова боєздатність АУ1 після знищення цілі ($P_{\text{кінц}}$) та сумарний час

виконання завдання ($T_{\text{заг}}$). Перший показник характеризує збереження ресурсу та живучість установки: чим більше значення $P_{\text{кінц}}$, тим менших втрат зазнала установка і тим вище її ймовірність продовжувати виконання наступних завдань. Другий показник відображає оперативну ефективність – швидкість виконання завдання. Залежно від пріоритетів командування, стратегія може акцентувати на мінімізації втрат або мінімізації часу. Ідеальною є стратегія, що забезпечує і короткий час, і високий рівень збереженої боєздатності; однак ці завдання конфліктують, тому потрібен компроміс.

На рис. 3.3 і рис. 3.4 наведено результати моделювання для двох межових варіантів стратегій [12, 76] та для запропонованого адаптивного підходу [31, 39]. «Стратегія А» – традиційна оборонна тактика «shot-and-scoot», коли після кожного пострілу АУ негайно змінює позицію. Ця тактика мінімізує ризик підставитися під вогонь противника, але збільшує

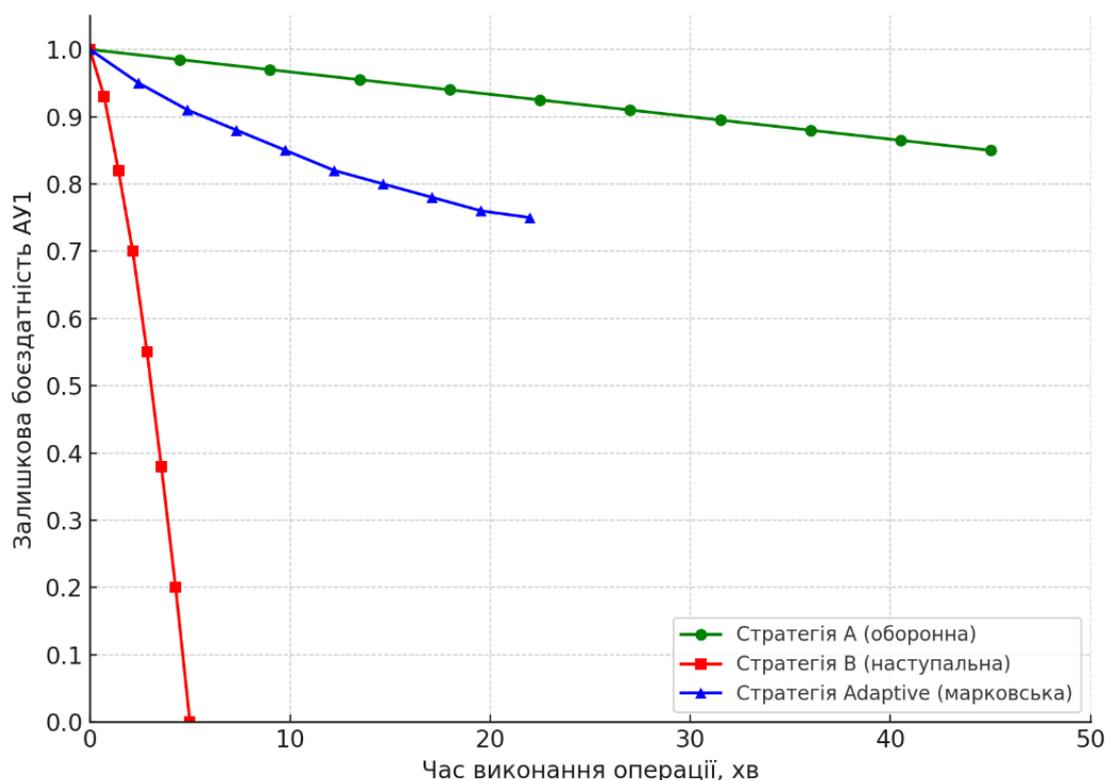


Рис. 3.3. Зміна боєздатності артилерійської установки (АУ1) залежно від часу виконання операції при трьох стратегічних підходах. Джерело: розроблено автором.

час виконання місії через постійні переміщення. «*Стратегія В*» – традиційна наступальна тактика, за якої установка *не* змінює позицію, поки ціль не буде уражено (або поки сама установка не буде виведена з ладу). Такий підхід мінімізує час, але максимізує втрати від контрвогню. «*Стратегія Adaptive*» – Марківський адаптивний підхід, що інтенсивно обирає, скільки пострілів зробити з кожної позиції відповідно до поточної ситуації (стану боєздатності, оцінювання дій противника) та моделі Маркова.

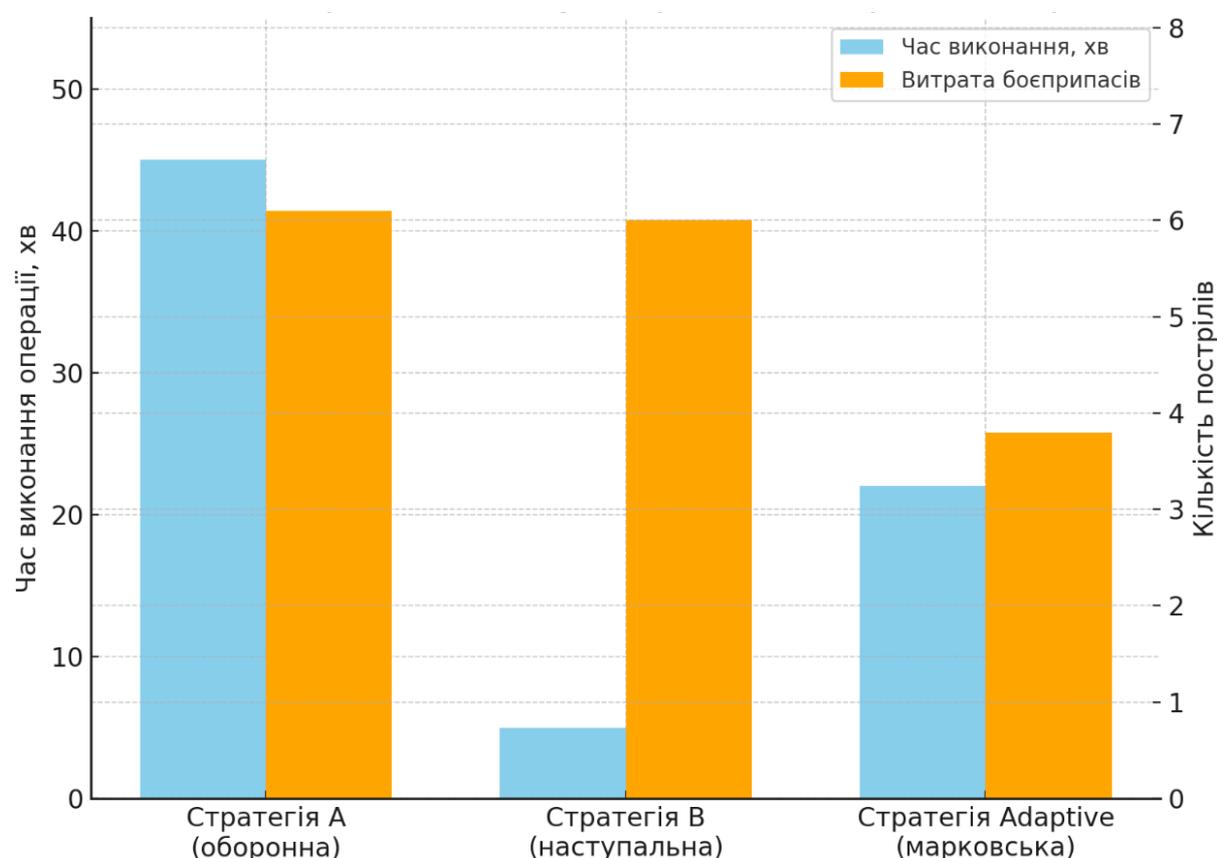


Рис. 3.4. Порівняння часу виконання операції та витрати боєприпасів для трьох стратегій. Джерело: розроблено автором.

На рис. 3.3 показано зміну боєздатності АУ1 у процесі виконання операції (10 пострілів по цілі) для кожної зі стратегій. Видно, що стратегія А (оборонна) дозволяє зберегти найбільшу боєздатність: після 10 пострілів $P_{\text{кінц}} \approx 0.85$ (85% від початкового) – втрати мінімальні [28, 30], оскільки після кожного пострілу

установка змінює позицію і противник майже не встигає завдати їй шкоди (тільки незначні втрати під час руху). Натомість час операції для стратегії А є найбільшим – сумарно близько $T_{\text{заг}} \approx 45$ хв (враховуючи 9 переміщень по 5–24 хв. з таблиці 3.3).

Стратегія В (наступальна) демонструє протилежний результат: операція завершується швидко ($T_{\text{заг}} \approx 5$ хв, тільки час на стрільбу без переміщень), але боєздатність знижується практично до нуля – установка отримує настільки значні ушкодження від серії контрударів, що стає непрацездатною вже після 6-7 пострілів. В імітації це проявилось як «загибель» АУ1 від вогню противника на 7-му пострілі, тобто місія фактично не була доведена до кінця (ціль не знищено повністю). Цей експериментально отриманий факт узгоджується з реальними даними про контрбатареюну боротьбу: залишатися на одній позиції більше, ніж для 1-2 пострілів, надзвичайно небезпечно [28].

Таблиця 3.3 – Порівняння результативності різних стратегій [26, 29] управління (імітаційний сценарій: 10 пострілів/одна ціль)

Показник	Стратегія А (оборона)	Стратегія В (наступ)	Марківська стратегія
Залишкова боєздатність $P_{\text{кінц}}$	≈ 0.85 (85%)	≈ 0 (знищено)	≈ 0.72 (72%)
Час виконання завдання $T_{\text{заг}}$	≈ 45 хв	≈ 5 хв	≈ 15 хв
Місія виконана	Так	Ні (АУ1 знищено на 7-му пострілі)	Так

Джерело: розроблено автором.

Марківська адаптивна стратегія (Adaptive) пропонує проміжний варіант, близький до оптимального за критерієм Парето. Шляхом моделювання варіантів алгоритм обрав структуру: «2 постріли – переміщення – 2 постріли – ...» (всього 5 позицій по 2 постріли). Така послідовність була визначена як компромісна, що підтверджує аналітичний розрахунок: з табл. 3.2 маємо, що 2 постріли з позиції

дозволяють противнику лише 1 постріл у відповідь, і втрати боєздатності на позиції становлять близько $k_{\text{red}} \approx 0.5$ (при $d = 1$) плюс зношеність ≈ 0.0008 , сумарно 0.5008 (50.08% відносної втрати) за два постріли. Після п'яти таких серій сумарна відносна втрата боєздатності 2.5, тобто $P_{\text{кінц}} \approx 0.965 - 2.5 \cdot 0.965 \approx 0.74$ (приблизно 74%). Імітація дала схожий результат: $P_{\text{кінц}} \approx 0.72$. Час виконання операції при цьому склав $T_{\text{заг}} \approx 15$ хв, що значно менше, ніж у стратегії А, хоча й більше, ніж у стратегії В. Резюмуємо, що адаптивний підхід дозволив виконати завдання успішно (ціль знищено, АУ1 зберегла 72% боєздатності) за прийнятний час, не доводячи систему до критичного стану.

Результати порівняння узагальнено див. табл. 3.3, показано, що Марківська стратегія демонструє перевагу у балансі ефективності та надійності: вона забезпечує достатньо високу боєздатність після бою при помірному часі виконання. На відміну від цього, суто оборонна тактика надто повільна, а суто наступальна – надто ризикована. Адаптивний алгоритм має можливість підлаштовуватися: якщо, наприклад, початковий запас боєздатності нижчий або противник сильніший (більше k_{red} за постріл), алгоритм може перейти до структури з 1 пострілом на позицію (безпечніший режим); якщо ж час критично обмежений – навпаки, допускається 2–3 постріли з позиції. Таким чином, система сама обирає тактику відповідно до обстановки.

Проведений аналіз уможливорює виділення таких ключових переваг розробленого підходу.

Підвищення живучості й надійності. Адаптивне управління мінімізує ймовірність критичних втрат АУ за рахунок своєчасного маневру, що підтверджено в імітаційних випробуваннях (збережено до 70–85% боєздатності проти майже 0% у гіршому випадку) – [25, 28].

Оптимальний компроміс швидкість/безпека. Марковська стратегія знаходить баланс між швидким виконанням завдання та мінімізацією втрат, тоді як традиційні підходи фіксовано віддають перевагу одному з критеріїв – [9, 28].

Адаптація до невизначеностей. На відміну від ППД-регуляторів, Марківська модель враховує дискретні стани та випадкові події. Система реагує на непередбачувані ситуації (раптовий інтенсивний обстріл, частковий вихід з ладу обладнання) коригуванням стратегії в режимі реального часу – [16, 25].

Інтеграція додаткових даних. В алгоритм легко включати інформацію від зовнішніх підсистем: розвіддані, метеодані, діагностику технічного стану. Наприклад, дані LSSVM-класифікатора про зношеність ствола враховуються під час прогнозування точності стрільби, що додатково підвищує ймовірність успішного ураження цілі – [16].

Гнучкість та модульність реалізації. Об'єктно-орієнтована структура забезпечення полегшує оновлення алгоритмів. Можна додавати нові типи станів (наприклад, повітряна загроза, зміна цілі) або нові стратегії противника, не змінюючи ядро системи – [25].

На основі представлених переваг є підстави стверджувати, що запропонована система адаптивного управління досягає поставленої мети – підвищення ефективності і надійності роботи АУ в умовах невизначеності бойових дій. Марківський підхід дозволив формалізувати тактичні рішення як завдання оптимізації на графі станів з випадковими переходами, яке успішно реалізовано розробленими алгоритмами.

Доходимо висновку, що АУ під управлінням такої системи здатна виконувати бойові завдання з мінімально допустимими втратами боєздатності [12, 28, 30], адаптуючись до динамічної обстановки бою та технічного стану, що підтверджено результатами імітаційного моделювання та порівняльного аналізу [31, 77] з альтернативними методами.

РОЗДІЛ 4. МЕТОДИ МОНІТОРИНГУ Й АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ БОЙОВОЮ РОБОТОЮ АРТИЛЕРІЙСЬКИХ УСТАНОВОК

У цьому розділі розглянуто методи побудови інформаційно-аналітичної системи моніторингу та адаптивного управління бойовою роботою АУ на основі акустичних та оптичних даних. Зокрема, виділяються такі основні принципи побудови зазначеної системи: безперервний моніторинг технічного стану гармати в реальному часі засобом датчиків, об'єктно-орієнтована структура з визначенням компонентів за шаблоном Model-View-Controller (MVC), адаптивне управління стрільбою на основі автоматичного аналізу показників та постійному оновленні моделей станів ствола гармати.

4.1 Структура інформаційно-аналітичної системи моніторингу стану ствола гармати

Підсистема моніторингу технічного стану артилерійських гармат складається з кількох взаємопов'язаних компонентів, що забезпечують збір даних, їх обробку, зберігання результатів та взаємодію з системою управління роботою АУ [78, 79]. Загальну структуру підсистеми представлено на рис. 4.1.

Розглянута структура містить такі основні блоки.

– **Сенсорні модулі:** акустичні датчики (мікрофони або акустичні сенсорні комплекси) та оптичні датчики (високошвидкісні камери, фотодіоди або оптичні сенсори спалаху).

– **Пристрої збору та оцифрування даних:** підсилювачі сигналів, АЦП, пристрої синхронізації, що забезпечують переведення сигналів датчиків у цифрову форму та передавання їх в обчислювальний блок.

– **Обчислювальний модуль (бортовий комп'ютер)** виконує програмне забезпечення аналізу (WearAnalyzer та інші алгоритми) і містить модель гармати (Barrel) та базу інформації про її стан.

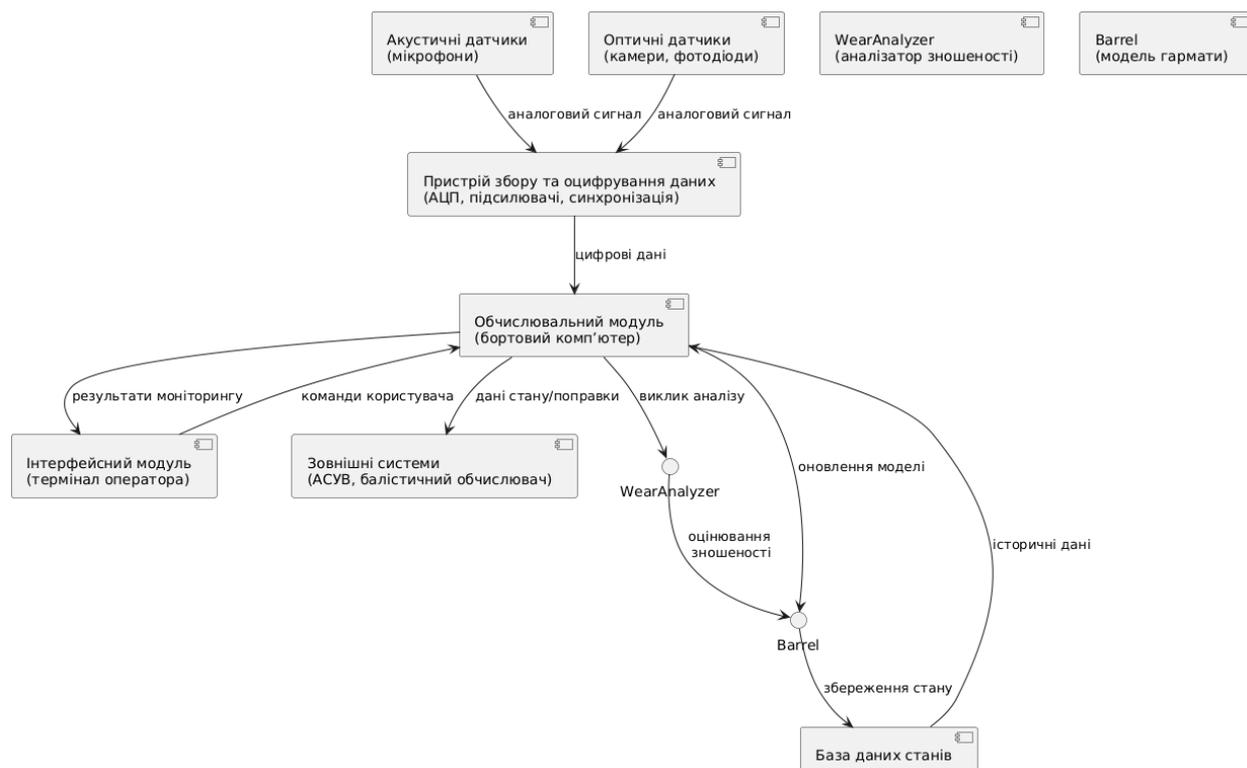


Рис. 4.1. Загальна структура інформаційно-аналітичної підсистеми моніторингу технічного стану гармат. Джерело: розроблено автором.

– **Інтерфейсний модуль (термінал оператора)** відображає результати моніторингу та надає рекомендації/попередження; забезпечує введення користувачем команд (наприклад, запиту додаткової діагностики, квітування повідомлень тощо).

– **Інтерфейси із зовнішніми системами:** зв'язок з АСУ гарматою або з балістичним обчислювачем для передавання необхідних корекцій чи отримання даних про умови стрільби (наприклад, температуру заряду, кількість пострілів з початку стрільби тощо) [62, 80, 81].

На рис. 4.1 показано представлені компоненти та їх інформаційні зв'язки [82]. Акустичні та оптичні сенсори встановлюються безпосередньо на гарматі або поблизу неї: мікрофони можуть кріпитися на лафеті чи щиті артилерійської гармати, а оптична камера – на станині або на штативі поруч з вектором, спрямованим на дульний зріз [83]. Сенсори підключені до обчислювача через

пристрій збору даних, який забезпечує одночасну реєстрацію багатоканального сигналу. Для точної інтерпретації акустичних сигналів критичною є синхронізація роботи датчиків: всі сигнали повинні мати єдину часову шкалу (наприклад, апаратна синхронізація АЦП для мікрофонів і тригера камери) [82]. Обчислювальний модуль, отримавши пакет даних про постріл, формує об'єкт інформаційної одиниці (InformationUnit) та передає його на обробку алгоритму оцінювання зношеності (WearAnalyzer). Результати аналізу (оцінювання поточної зношеності, прогноз ресурсу, рекомендації) зберігаються у базі даних стану гармати і водночас передаються оператору на інтерфейсний модуль для відображення [84, 85]. Якщо система виявляє, що параметри стрільби потребують корекції (наприклад, початкова швидкість знизилася на X), то такий ланцюжок взаємодії компонентів забезпечує належну реакцію з прийняттям рішення і циклічну роботу підсистеми під час кожного пострілу [32, 33, 36]. Нижче детально описано ключові компоненти (сенсори та обчислювальний модуль), а також особливості опрацювання даних у реальному часі [34, 35].

4.2. Моделі стану артилерійської гармати: класи та алгоритми

Для реалізації моделі стану артилерійської гармати використано об'єктно-орієнтоване моделювання, що дозволяє прямо відобразити основні сутності предметної області у вигляді класів [86]. На рис. 4.2 подано UML-діаграму класів, яка відображає структуру моделі та взаємозв'язки між класами. До основних класів належать:

Barrel – клас «Ствол», який містить параметри, що характеризують поточний стан артилерійського ствола.

AcousticSensor – клас, що моделює акустичний датчик; забезпечує методи для отримання попередніх акустичних даних.

OpticalSensor – клас оптичного датчика (наприклад, відеокамери або фотодіода).

InformationUnit – клас «Інформаційна одиниця», що інкапсулює дані, зібрані під час одного пострілу (акустичні сигнали, оптичні дані, часові позначки, умови стрільби тощо).

WearAnalyzer – клас аналізатора зношеності, який містить алгоритми обробки даних InformationUnit та оцінювання стану ствола.

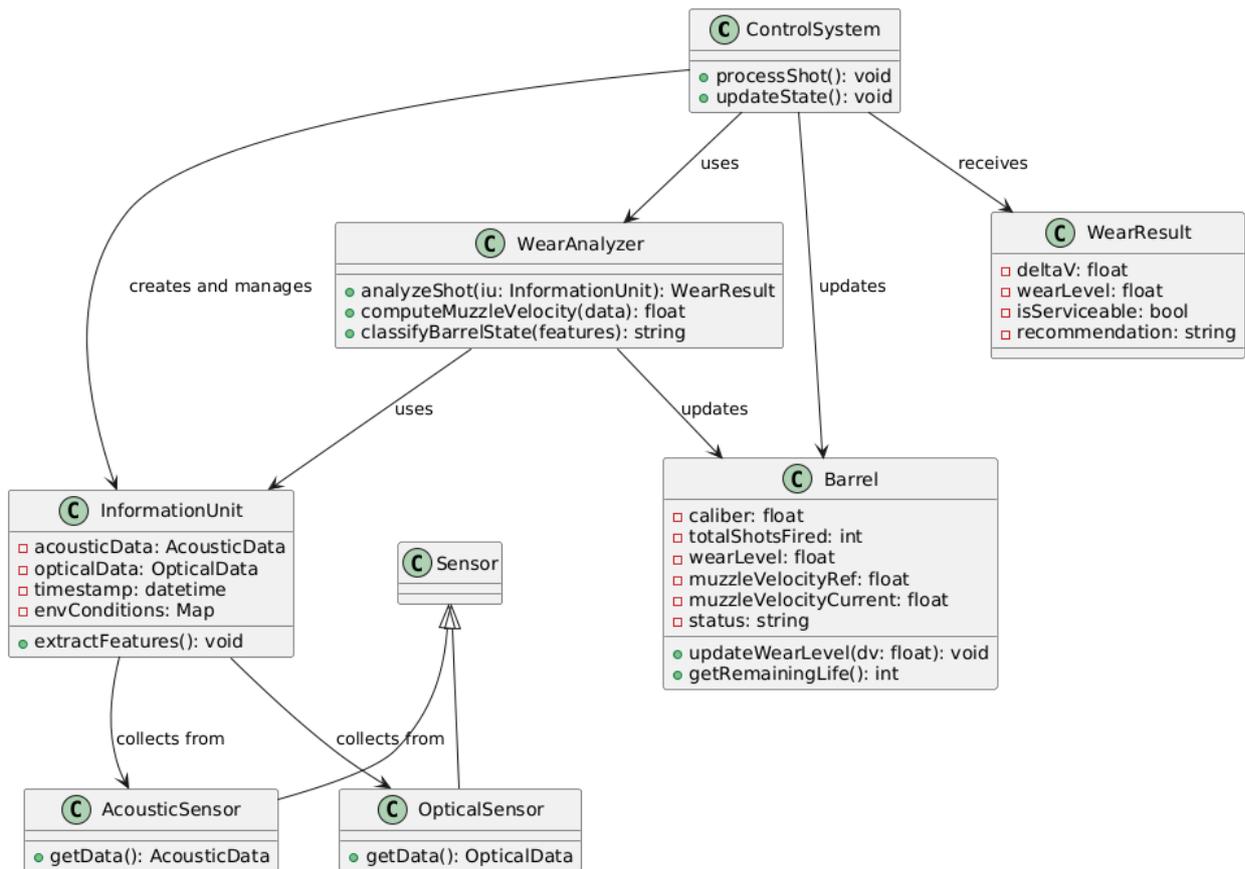


Рис. 4.2. UML-діаграма класів, яка відображає структуру моделі та взаємозв'язки між класами. Джерело: розроблено автором.

ControlSystem – клас системи управління, що координує роботу всіх компонентів: приймає дані від Sensor, створює InformationUnit, викликає WearAnalyzer, оновлює стан Barrel та приймає рішення щодо керування (адаптації).

Нижче визначимо заявлені класи та основні методи, а також математичні моделі, реалізовані в інструментах класу `WearAnalyzer` для оновлення параметрів стану гармати на основі сенсорних даних.

Клас `Barrel` (Ствол). Цей клас представляє артилерійський ствол як об'єкт з певними властивостями. Основні поля класу `Barrel` містять:

- *caliber* (калібр) – постійна величина калібру гармати (наприклад, 152 мм), що використовується під час оцінювання співвідношення калібр/зношеність;

- *totalShotsFired* (кількість пострілів) – лічильник здійснених пострілів з моменту введення ствола в експлуатацію;

- *wearLevel* (рівень зносу) – змінна, що зберігає поточний відносний рівень зношеності ствола (наприклад, у відсотках від гранично допустимого або в частках одиниці). Визначення цього параметру є головною метою моніторингу;

- *muzzleVelocityRef* – еталонна (номінальна) початкова швидкість снаряда для нового ствола за стандартних умов (значення з технічних характеристик);

- *muzzleVelocityCurrent* – оцінювання поточної початкової швидкості снаряда на основі останніх вимірювань;

- *status* – статус технічного стану (наприклад, «справний», «небезпечне зношення», «вичерпано ресурс» – може перераховуватися за типом `Enum`).

Клас `Barrel` містить методи:

- *updateWearLevel(Delta v)* оновлює рівень зношеності *wearLevel* на основі розрахованої різниці між еталонною та виміряною швидкістю снаряда або інших ознак. Цей метод може використовувати модель зношеності, описану формулою 4.1;

- *getRemainingLife()* оцінює залишковий ресурс (кількість пострілів до досягнення критичної зношеності) за наявною моделлю деградації або за емпіричними даними;

- *reset ()* скидає параметри (імітує встановлення нового ствола, коли *wearLevel = 0*, *totalShotsFired = 0*).

Формалізація моделювання зношеності. Алгоритм оновлення рівня зношеності в методі *updateWearLevel* базується на аналізі зміни балістичних характеристик пострілу [36]. Найбільш інформативним показником є початкова швидкість снаряда v_0 . При зношуванні ствола v_0 поступово зменшується внаслідок збільшення прориву газів та гіршого обтиску снаряда. Відносне зношення ствола можна кількісно оцінити через відносне падіння швидкості. Введемо показник Δv як різницю між номінальною швидкістю v_{ref} (для нового ствола) та виміряною реальною швидкістю v_{meas} , віднесеною до номінальної:

$$W = \frac{v_{\text{ref}} - v_{\text{meas}}}{v_{\text{ref}}}, \quad (4.1)$$

де W – оцінювання зношеності (частка втрати початкової швидкості). Формула 4.1 подає величину зношення як безрозмірну величину (наприклад, $W = 0,1$ відповідає 10% падіння швидкості). Згідно з результатами експериментів, значення W у діапазоні 0-0.08 відповідають незначному зношенню, а при $W > 0.08$ (падіння більше 8%) ствол вважається близьким до граничної зношеності. Метод *updateWearLevel* обчислює W за (4.1) на основі поточно оціненої швидкості v_{meas} , яку надає клас *WearAnalyzer* (див. нижче), і оновлює поле *wearLevel*. Також можна зберігати історію значень W для прогнозування тенденції.

З іншого боку, можна використовувати пряму модель залежності швидкості від зношеності. Балістичні дослідження демонструють, що для помірних значень зношення зниження початкової швидкості приблизно пропорційне величині зношеності каналу ствола [87]. Тому прийнято лінійну модель:

$$v_{\text{meas}} = v_{\text{ref}}(1 - k, W), \quad (4.2)$$

де k – емпіричний коефіцієнт пропорційності. За відсутності точних експериментальних даних k можна визначити, виходячи з того, що за умов граничної зношеності W_{crit} (наприклад, 0.1 або 10%) швидкість падає до мінімально прийнятної v_{min} (скажімо, на 10% менше від номіналу). Тоді $k = (1 - v_{\text{min}}/v_{\text{ref}})/W_{\text{crit}}$. Наприклад, якщо $v_{\text{min}} = 0.9$, v_{ref} при $W_{\text{crit}} = 0.1$, то $k = 1$. У реальних даних, наведених в роботі, зафіксовано падіння дулової швидкості на 4–5% після кількох сотень пострілів, що відповідає $k \approx 0.5$ для даного інтервалу зношення.

В системі значення k точніше може бути визначено шляхом калібрування: проводяться контрольні стрільби з замірами v_{meas} на різних відомих ступенях зношеності (наприклад, після певної кількості пострілів або за результатами полігонних вимірювань профілю каналу) і за методом найменших квадратів підбирається k для (4.2) [88]. Ця модель використовується у методі *getRemainingLife()* класу *Barrel*, щоб визначити, за яким значенням W швидкість впаде до неприпустимого рівня, і скільки пострілів для цього потрібно (вважаючи, що кожен постріл збільшує W на ΔW , що залежить від руйнівної дії пострілу).

Клас *InformationUnit* (інформаційна одиниця). Цей клас служить вектором значень для даних одного пострілу. Він має такі поля:

- *acousticData* – масив (або система) акустичних даних: оцифрований сигнал з одного чи кількох мікрофонів або вже обчислені показники (тривалість імпульсу, затримка між хвилями тощо);

- *opticalData* – дані з оптичних сенсорів: відеозапис або окремі зображення спалаху, або значення інтенсивності в часі;

timestamp – час здійснення пострілу;

- *envConditions* – умови стрільби (може включати температуру заряду, атмосферні умови), стан каналу перед пострілом (холодний/гарячий тощо);

- *trueMuzzleVelocity* – опціонально еталонне значення початкової швидкості (наприклад, під час стрільби контрольними снарядами з вимірювачами).

InformationUnit використовує метод *extractFeatures()*, який обробляє попередні дані сенсорів і заповнює поля систем ознак. Наприклад, обчислює Δt між компонентами сигналу, максимальну амплітуду, спектральну потужність в певних частотних смугах, площу спалаху на зображенні тощо. Цей метод запускає в дію ControlSystem одразу після формування об'єкта InformationUnit, аби підготувати дані для аналізатора зношеності.

Клас WearAnalyzer (аналізатор зношеності). Це провідний клас, що реалізує алгоритми діагностики стану ствола за даними пострілу. У найпростішому випадку WearAnalyzer може бути реалізований як набір статичних функцій, але діяльність його як класу зумовлює збереження іманентних ознак (наприклад, вивчені моделі, коефіцієнти, порогові значення) і перехід від одного до іншого методу аналізу (в залежності від конфігурації системи).

Беремо до уваги такі основні методи:

– *analyzeShot (InformationUnit iu)* – ключовий метод, який приймає інформаційну одиницю пострілу, виконує аналіз та повертає результати у вигляді об'єкта (або структури), який містить значення оцінювання: поточну зношеність W , зафіксовану початкову швидкість v_{meas} , висновок про придатність ствола (наприклад, булевий прапорець *isServiceable*) тощо;

– *computeMuzzleVelocity (acousticFeatures)* – допоміжний метод, який за ознаками акустичного сигналу (наприклад, Δt між хвилями або спектральним зсувом) обчислює значення початкової швидкості. Цей метод може базуватися на емпіричних залежностях чи на використанні каліброваної (4.2);

– *classifyBarrelState (features)* – метод класифікації стану ствола (придатний/непридатний або рівень зношеності за категоріями). Він може бути реалізований через алгоритм машинного навчання [32, 61].

У розділі 2 було представлено класифікатор на основі SVM, який використовує часові та спектральні ознаки акустичних хвиль. Цей підхід застосовується і в даному випадку: метод *classifyBarrelState* завантажує

попередньо вивчену модель (вектор вагомості w і поріг) та враховані для поточного пострілу ознаки \vec{x} , після чого обчислює скалярну відстань до гіперплощини: $d = w^T x + b$. Знак d вказує клас (наприклад, $d < 0$ – «справний ствол», $d > 0$ – «критично зношений»), а величина $|d|$ може давати певний ступінь впевненості. Відомо, що метод SVM забезпечує надійну двокласову класифікацію для подібних задач, дозволяючи з високою імовірністю визначати перевищення критичного рівня зношеності на основі комбінації ознак ударної та дульної хвиль. У зазначеному варіанті використовуються ознаки: тривалість фронту дульного звуку, відношення амплітуд ударної і дульної хвиль, спектральна енергія в діапазоні низьких частот, що зростає під час зношення, тощо. Ці ознаки формуються методом *InformationUnit.extractFeatures*.

Варто зауважити, що можливе також використання більш складних алгоритмів в *WearAnalyzer*. Наприклад, застосування нейронної мережі (як згадано вище, CRNN в моделі *AcouDAR*) або байєсівських методів. Проте незалежно від конкретного алгоритму, інтерфейс класу *WearAnalyzer* залишається таким самим: метод *analyzeShot* отримує дані і повертає систематизовані результати. Така модель дозволяє легко модернізувати систему. У діаграмі класів (див. рис. 4.2) клас *WearAnalyzer* асоційований з *InformationUnit* (входи) та *Barrel* (виходи), що, у свою чергу, оновлює стан *Barrel* через методи *Barrel*.

Клас *ControlSystem* (система управління). Цей клас відповідає за координацію процесу моніторингу та управління. Він взаємодіє з усіма іншими: отримує дані від *Sensor* (*AcousticSensor*, *OpticalSensor*), створює об'єкт *InformationUnit*, викликає *WearAnalyzer*, оновлює *Barrel* та видає команди чи повідомлення на зовнішні системи. Основні етапи, що пропонує метод *processShot()* класу *ControlSystem*, такі:

1. Зачекати сигнал від датчиків про завершення реєстрації чергового пострілу.

2. Створити новий *InformationUnit* *iu* та помістити туди необроблені дані:
`iu.acousticData = acousticSensor.getData(); iu.opticalData = opticalSensor.getData(); iu.timestamp = now()`.

3. Послугуватися *iu.extractFeatures()* для попередньої обробки даних.

4. Передати інформаційну одиницю в аналізатор: `result = wearAnalyzer.analyzeShot(iu)`. Отримати із *result* оцінювання *W* та інші.

5. Використати `barrel.updateWearLevel(result.deltaV)` для оновлення рівня зношеності в моделі ствола.

6. На основі оновленого *barrel.wearLevel* і *result.isServiceable* прийняти рішення:

– якщо ствол придатний, але потребує поправки балістики: розрахувати величину виправлення. Наприклад, якщо оцінено, що $v_{\text{meas}} = 0.95, v_{\text{ref}}$ (тобто $W = 0.05$ або 5%), то згідно з балістичними таблицями збільшити кут підвищення на певну величину $\Delta\phi$. Цю залежність можна отримати з таблиць стрільби або апроксимувати: $\Delta\phi \approx f(W)$;

– якщо ствол досяг критичної зношеності: сформулювати попередження оператору (через інтерфейс) про необхідність заміни ствола та, за потреби, блокувати виконання стрільби (в залежності від політики безпеки).

7. Відправити поправки у балістичний обчислювач або командну систему (наприклад, через `fireControlInterface.sendCorrections(data)`), а повідомлення – на `operatorInterface.display(msg)`.

8. Повернутися до очікування наступного пострілу.

Клас *ControlSystem* фактично реалізує контролер у схемі MVC, забезпечуючи зв'язок між сенсорами, моделлю *Barrel* (Model) та інтерфейсом *View* (в даній реалізації *View* мінімальний). Він також може виконувати періодичні завдання обслуговування, наприклад, зберігати дані про поточний стан системи на випадок перезавантаження, проводити самотестування датчиків тощо.

На діаграмі (див. рис. 4.2) відображені класи та їх взаємозалежність:

- асоціація між ControlSystem та Sensor (AcousticSensor, OpticalSensor) вказує, що ControlSystem отримує дані від декількох сенсорів (можливо, через загальний інтерфейс Sensor, від якого успадковують AcousticSensor і OpticalSensor);
- агрегація між ControlSystem та Barrel: ControlSystem містить або посилається на екземпляр Barrel, який він оновлює;
- агрегація ControlSystem – WearAnalyzer: контролер має єдиний екземпляр аналізатора, який використовується для всіх пострілів;
- залежність WearAnalyzer від InformationUnit: аналізатор використовує дані інформаційної одиниці для розрахунків;
- діада InformationUnit – Sensor: хоча на діаграмі це не оприєвлено, InformationUnit наповнюється даними від сенсорів (можна відтворити, як InformationUnit містить посилання на попередні дані від кожного сенсора або на самі об'єкти Sensor, але під час аналізу сенсори не потрібні, достатньо їх вимірів);
- успадкування OpticalSensor і AcousticSensor від абстрактного Sensor (опціонально): це дозволяє поліморфну обробку різнорідних датчиків.

Формалізація алгоритмів оновлення параметрів моделі. У даному підрозділі особливу увагу приділено двом ключовим математичним алгоритмам, реалізованим у системі: розрахунку оцінювання зношеності (4.1) та врахування рівня зношеності під час розрахунку балістичних поправок (4.2). Вираз (4.1) використовується в *Barrel.updateWearLevel*. Вона забезпечує кількісне оцінювання W на основі акустично визначеної швидкості снаряда. Формула (4.2) задає модель зміни швидкості від зношеності: $v_{\text{meas}} = v_{\text{ref}}(1 - kW)$. Ця формула використовується не тільки для визначення W , але й для розрахунку необхідних поправок кутів наведення.

Зауважимо, що при незначній зміні швидкості траєкторія снаряда трансформується пропорційно до цієї зміни. Тому поправка дальності ΔD або кута

$\Delta\phi$ може бути визначена як $\Delta D \approx -W \cdot D$ (відносне зменшення дальності пропорційне W). Більш точно поправки визначаються з балістичних рівнянь, але в межах адаптивної системи можна використати лінійні відповідники або заздалегідь збережені таблиці поправок на зношеність. Під час інтеграції системи моніторингу в комп'ютер керування вогнем можливе виконання автоматичного перерахунку траєкторії за умови введення скоригованого значення початкової швидкості. Наприклад, якщо стандартна балістична модель отримує на вхід v_0 , то ControlSystem просто замінює v_0 на v_{meas} під час кожного розрахунку для наступного пострілу. Таким чином формується рекомендований підхід: ControlSystem після аналізу встановлює в параметрах стрільби нове значення початкової швидкості, що дорівнює виміряному. Водночас це еквівалентно введенню поправки на дальність через зношеність.

Насамкінець наведемо інтегрований сценарій роботи системи у вигляді послідовності дій (алгоритм контролера):

1. **Вхід:** дані від датчиків пострілу (акустичні, оптичні).
2. ControlSystem формує InformationUnit з цих даних.
3. InformationUnit обчислює величини: Δt , A_{max} , тощо.
4. WearAnalyzer отримує величини та на їх основі обчислює:
 - значення v_{meas} (напр., $v_{meas} = L/\Delta t$ з поправками на температуру повітря для звуку),
 - значення W за (4.1),
 - класифікацію стану (норм/крит), найчастіше через SVM.
5. WearAnalyzer передає результати (структура result).
6. ControlSystem оновлює Barrel: *barrel.updateWearLevel(result.W)*.
7. ControlSystem генерує вихід:
 - якщо W перевищує поріг, то система встановлює *barrel.status = critical* і видає попередження;

– попри все передає v_{meas} у балістичний обчислювач як нове значення початкової швидкості для формування установки подальшої стрільби.

8. **Вихід:** оновлена модель *Barrel*; повідомлення користувачу; скориговані установки стрільби для наступного пострілу.

Запропонована модель була програмно реалізована мовою C++ з використанням бібліотек для обробки сигналів та комп'ютерного зору (для прикладу, *FFTW* для швидкого Фур'є-перетворення акустичних сигналів та *OpenCV* для аналізу зображень спалаху). UML-діаграму класів (див. рис. 4.2) було покладено в основу структури програмних модулів. Під час тестування системи на модельних даних та даних польових експериментів було підтверджено її працездатність: зокрема, симуляція показала, що для ствола із 5% зношенням система коректно оцінила W в межах 0.05–0.06, і запропоновані поправки майже повністю компенсували втрату точності стрільби [33, 89]. Тому, маємо підстави стверджувати, що отримані результати свідчать про ефективність розробленої підсистеми моніторингу та адаптивного управління [34, 34].

4.3 Системи управління (Controller) на основі Марківських моделей

Підсистема **Controller** відповідає за адаптивне управління стрільбою на основі результатів моніторингу, реалізуючи логіку прийняття рішень згідно з структурою MVC. Вона одержує оновлені дані про стан гармати (рівень зношеності, поточна початкова швидкість тощо) від моделі стану (клас **Barrel**) та формує команди для зміни режиму стрільби [32]. Для формального опису процесу прийняття рішень використано Марківські моделі. Зокрема, послідовність пострілів артилерійської системи за умов випадкових збурень моделюється як дискретний ланцюг Маркова [33, 34]. Це означає, що стан системи після чергового пострілу залежить лише від попереднього стану (не від всієї передісторії), що узгоджується з фізикою зношення та накопичення пошкоджень ствола [36].

Марківська модель дозволяє врахувати ймовірнісний характер деградації та ефективності пострілів, що особливо важливо під час інтенсивної стрільби.

UML-діаграма адаптивного контролера. На рис. 4.3 умовно зображено спрощену UML-діаграму станів адаптивного контролера. Станами системи є різні технічні стани гармати (наприклад, «нормальний», «помірна зношеність», «критична зношеність»), а переходи між ними відповідають акту здійснення пострілу та поновлення даних моніторингу. Контролер оцінює поточний стан після кожного пострілу і приймає рішення: продовжувати стрільбу без змін, внести корективи (наприклад, поправку в кут наведення або заряд) [35, 37, 90] чи призупинити стрільбу для технічного обслуговування [91]. Такі дії автоматизовані, а стани змінюються під впливом пострілу, таким чином система алгоритмічно реалізує марківську стратегію управління.

Формалізація Марківської моделі. Нехай дискретна випадкова величина X_n позначає стан системи після n -го пострілу. Можна виділити скінченну множину станів s_0, s_1, \dots, s_m , впорядкованих за ступенем погіршення (наприклад, s_0 – відмінний стан, s_m – гранична зношеність, за якої стрільба неприпустима). Марківська властивість процесу полягає в тому, що:

$$P\{X_{n+1} = s_j \mid X_n = s_i, X_{n-1} = s_k, \dots\} = P\{X_{n+1} = s_j \mid X_n = s_i\} = p_{ij}, \quad (4.3)$$

де p_{ij} – імовірність переходу зі стану s_i в стан s_j за один крок (після одного пострілу), причому для кожного i виконується $\sum_j p_{ij} = 1$. Таким чином, динаміка стану гармати задана матрицею переходів $P = [p_{ij}]$ розміру $(m + 1) \times (m + 1)$. Наприклад, для трьох рівнів стану – нормальний, помірна зношеність та критична зношеність – матриця переходів може мати такий вигляд:

$$P = \begin{pmatrix} p_{00} & p_{01} & p_{02} \\ 0 & p_{11} & p_{12} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (4.4)$$

де стан s_2 є абсорбуючим (критична зношеність, після досягнення якої всі подальші стани залишаються s_2 , тобто $p_{22} = 1$) [92]. Ненульові ймовірності



Рис. 4.3. Марківська модель станів системи в підсистемі Controller (спрощений граф станів і переходів). Джерело: розроблено автором.

p_{01}, p_{12} відображають поступове накопичення зношеності: наприклад, p_{01} – ймовірність переходу від нормального стану до помірної зношеності після пострілу. Ймовірність p_{00} (залишатися в нормальному стані) близька до 1 за умови невеликої кількості пострілів; зі збільшенням зношеності вона зменшується, натомість p_{12} (перехід до критичної зношеності) зростає. Марківський граф станів (див. рис. 4.3) наочно ілюструє ці переходи: дуги помічені відповідними p_{ij} , а також можлива пряма (хоч і мала) ймовірність небезпечного переходу $s_0 \rightarrow s_2$

(раптове досягнення граничного стану через, наприклад, дефект боеприпасу). На схемі така дуга показана штриховою лінією.

Алгоритми ухвалення рішень на основі моніторингу. Розглядаємо ситуацію, коли контролер реалізує Марківський процес прийняття рішень, тобто на кожному етапі після пострілу він повинен обрати одну з допустимих дій $a \in \mathcal{A}(s_i)$, щоб оптимізувати певний критерій ефективності стрільби. До множини дій входять, зокрема:

- a_1 : **продовжувати вогонь** без змін (дія за замовчуванням, якщо стан s_i задовільний);

- a_2 : **скорегувати стрільбу** (наприклад, збільшити заряд або кут підвищення для компенсації падіння швидкості снаряда);

- a_3 : **вивести гармату з експлуатації** (тимчасово припинити стрільбу даним стволом через надмірну зношеність або ненадійність пострілу).

Вибір дії здійснюється автоматично на основі даних сенсорного моніторингу. Алгоритм ухвалення рішення можна подати у вигляді псевдокоду.

Для кожного пострілу:

- отримати дані вимірювань (акустичні, оптичні) -> сформувати об'єкт InformationUnit;

- виконати аналіз (WearAnalyzer) -> оцінити поточний стан ствола (визначити стан s_i);

- оновити модель Barrel (наприклад, wearLevel, muzzleVelocityCurrent);

- якщо $s_i =$ «критична зношеність» або виявлено «неефективний постріл».

Якщо необхідна корекція балістики:

- застосувати дію a_2 (розрахувати поправки, скоригувати наведення для наступного пострілу);

інакше:

- застосувати дію a_3 (вивести гармату зі стрільби, сигналізувати оператору про критичний стан зношеності);

– в іншому випадку: дія a_1 (продовжити стрільбу без змін).

У цьому алгоритмі під «неефективним пострілом» розуміється постріл, результат якого не відповідає очікуванням (наприклад, надто мала початкова швидкість снаряда або значне відхилення траєкторії). Як показано в нашій роботі, ефективність кожного пострілу можна автоматично класифікувати за акустичними характеристиками поля пострілу. Для цього використовується класифікатор на основі методу опорних векторів (LS-SVM), спроможний розрізняти «нормальні» та «неефективні» постріли за ознаками ударної та дульної хвиль. Вірогідність помилки класифікації другого пострілу після ретельного вивчення не перевищує 5%. Якщо автоматичний аналіз визначає постріл як неефективний, контролер реагує у такий спосіб: або вводить поправки для наступного пострілу цього ствола (якщо проблема в балістиці, приміром, якщо знизилась швидкість, то збільшується кут підвищення), або виводить даний ствол із подальшої експлуатації, щоб не витратити боєприпаси даремно. Такий підхід реалізує адаптивне управління за критерієм максимальної ймовірності ураження цілі за мінімальної витрати часу і снарядів.

4.4 Реалізація підсистеми відображення стану (View) та візуалізації процесів пострілу

Підсистема **View** відповідає за передачу оператору інформації про стан гармати та візуалізацію ключових параметрів стрільби. Вона **надає графічний інтерфейс користувача (GUI)** для моніторингу в реальному часі та включає засоби візуалізації акустичних і оптичних даних [33, 34, 35]. Розроблений інтерфейс дотримується принципів зручності й інформативності, щоб система контролю могла швидко оцінити ситуацію. На рис. 4.4 показано структуру GUI: екран поділено на ділянки для відображення числових показників, графіків сигналів та службових повідомлень.

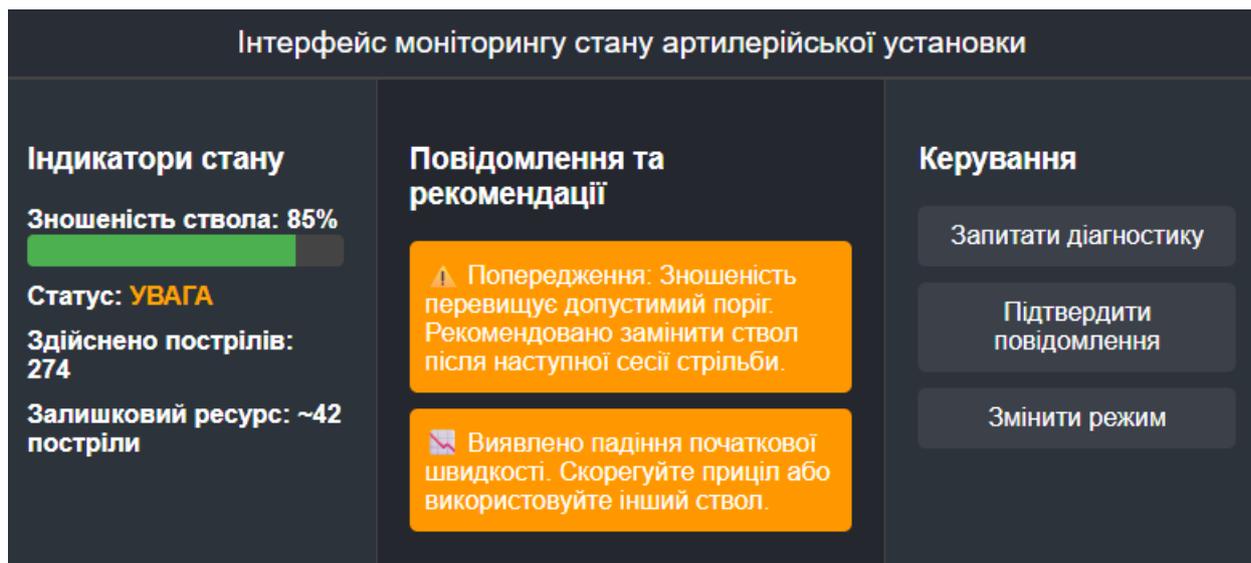


Рис. 4.4. Структура графічного інтерфейсу користувача. Джерело: розроблено автором.

Графічні інтерфейси користувача. Інтерфейс реалізовано у вигляді окремого модуля, що отримує оновлені дані від контролера після кожного пострілу. Основні елементи GUI включають:

– індикатори стану – панель, що відображає поточний рівень зношеності ствола (у відсотках або за шкалою), статус ствола (нормальний/потребує уваги/критичний), кількість здійснених пострілів та прогнозований залишковий ресурс. Ці дані беруться з моделі Barrel* (поле ‘wearLevel’, ‘status’, ‘totalShotsFired’ тощо) і оновлюються після кожного пострілу [32, 36].

– повідомлення та рекомендації – текстове поле, куди виводяться автоматичні попередження або поради від системи. Наприклад, при досягненні порогу зносу з’явиться попередження про необхідність заміни ствола; при значному падінні швидкості – рекомендація скоригувати приціл або перейти на інший ствол.

– кнопки керування – інтерактивні елементи для запиту додаткової діагностики, підтвердження отримання попередження або переключення режимів відображення. Вони дозволяють оператору за потреби отримати детальніші дані

(наприклад, графік сигналу пострілу) або вимкнути певні повідомлення після ознайомлення.

Візуалізація процесів пострілу. Важливим складником View є модуль візуалізації даних сенсорів. Зокрема, реалізовано такі графічні відображення.

– *Спектрограма акустичного сигналу пострілу.* Для кожного пострілу система будує спектрограму – часово-частотний розподіл звукового сигналу. На ній чітко виділяються дві фази: фронт ударної хвилі та наступна дульна хвиля. Наприклад, рис. 4.5 ілюструє типову спектрограму звуку пострілу: по осі часу відкладено кілька десятків мілісекунд після пострілу, по осі частоти – діапазон до 5-10 кГц, колір відображає рівень звукового тиску (PSD). Ударна хвиля проявляється як короткий широкомугловий сплеск на початку, а дульний звук – як довший низькочастотний сигнал. За формою спектрограми система додатково контролює якість пострілу [93]. Наприклад, звужений спектр і менша тривалість сигналу можуть свідчити про «слабкий» постріл (низьку швидкість). Спектрограма виводиться на екран GUI одразу після пострілу, даючи оператору наочне підтвердження акустичних параметрів.

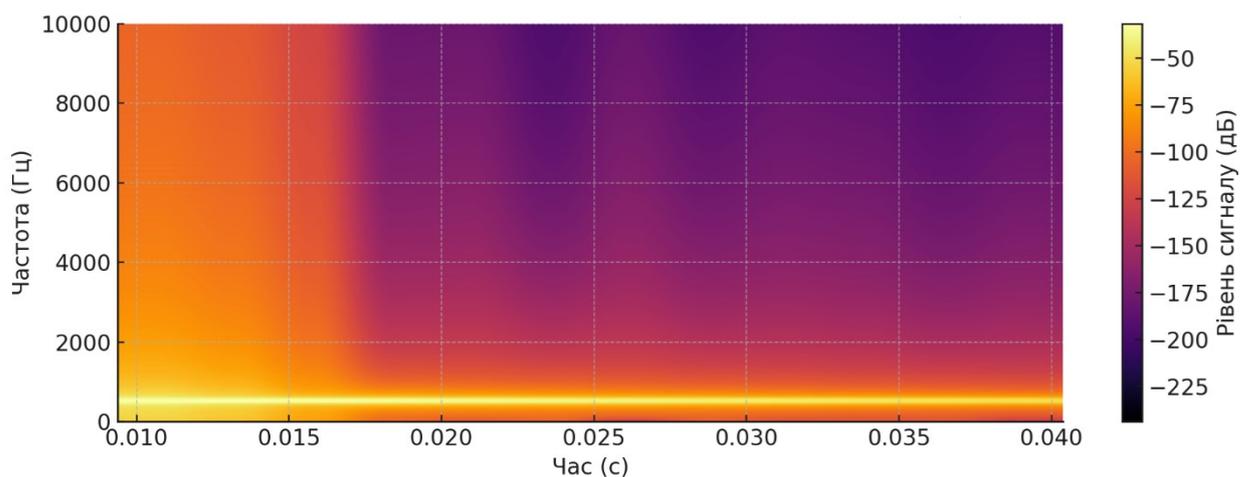


Рис. 4.5. Типова спектрограма звуку пострілу. Джерело: розроблено автором.

– *Візуалізація дульного спалаху.* Оптичні дані з високошвидкісної камери можуть відображатися у вигляді уповільненого відеофрагменту або послідовності зображень. В інтерфейсі передбачено вікно, де після пострілу програватиметься короткий запис (0,1–0,2 с реального часу) тривалості спалаху (рис 4.6). Це дозволяє візуально оцінити характер вихлопу порохових газів. Як зазначалося, форма спалаху залежить від зношеності ствола: для нового ствола полум'я компактне і симетричне, для зношеного – більш розширене, з можливими боковими «язиками». На екрані GUI такі відмінності помітні, і оператор може підтвердити правдивість показників автоматичної системи. Якщо використовується не камера, а інфрачервоний фотодіод (оптичний сенсор спалаху), інтерфейс буде графік інтенсивності освітлення в часі. За тривалістю та кількістю піків цього графіка також можна свідчити про особливості пострілу (наприклад, наявність повторного спалаху – ознака неоднорідного горіння пороху).

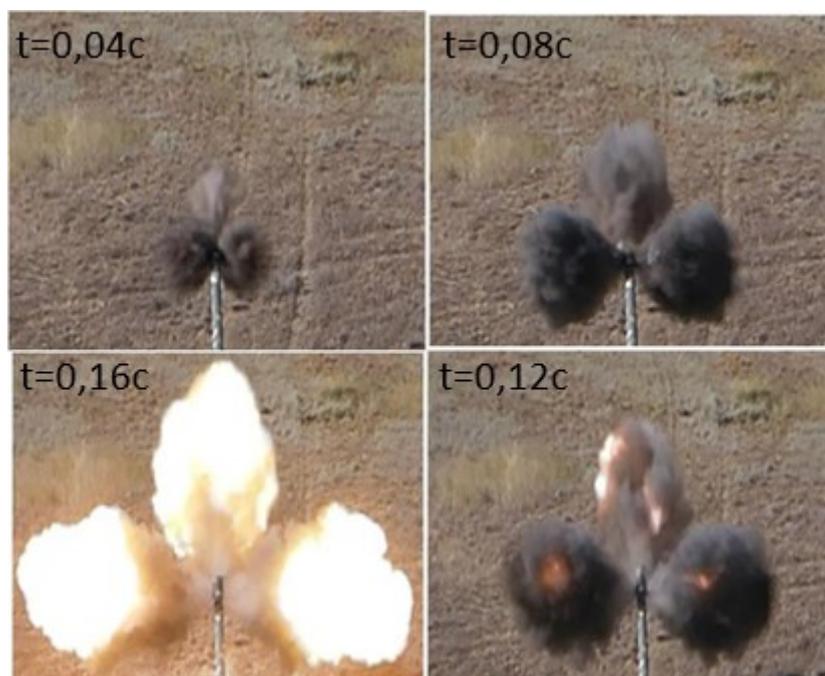


Рис. 4.6. Вікно відображення короткого запису тривалості спалаху.
Джерело: [33].

– *Цифрові графіки параметрів.* Окрім сигналів одного пострілу, View може відображати тенденції параметрів за серію пострілів. Наприклад, залежність графіка вимірної початкової швидкості v_0 від номера пострілу, щоб відстежувати тенденцію до її зниження. Інший важливий графік – залежність залишкового ресурсу від кількості пострілів: на ньому показується, як прогнозований ресурс ствола (в пострілах) спадає з часом. Такі графіки допомагають виявити довготривалі зміни стану, непомітні за одним пострілом.

Реалізована підсистема View забезпечує інтерактивну та наочну взаємодію оператора із системою моніторингу. Засобом паралельного відображення числових індикаторів і графічних даних досягається ситуативна обізнаність про технічний стан гармати. Згідно з принципами MVC View отримує дані лише від контролера/моделі і не виконує складних обчислень, тому не перенавантажує систему. Важливо, що поєднання різнорідних джерел інформації (звук + відео) підвищує довіру користувача до системи: навіть за певної похибки автоматичних алгоритмів оператор бачить «картину» пострілу і може прийняти обґрунтоване рішення. Тож підсистема відображення стану є завершальним компонентом лінії моніторингу, що забезпечує ефективну взаємодію «людина–машина» у процесі адаптивного управління стрільбою.

4.5. Методика експериментальної перевірки та оцінювання ефективності

Для перевірки дієздатності запропонованих методів моніторингу та адаптивного управління й оцінювання їх ефективності проведено серію експериментів, зокрема з використанням імітаційної моделі (див. розділ 1.6) та реальних даних. У цьому підрозділі описано методику експериментальної перевірки, сценарії моделювання, критерії ефективності та одержані результати у вигляді порівняльних таблиць.

Опис експериментальних сценаріїв. Було розглянуто два основних сценарії стрільби:

– *Сценарій А (традиційний)* – батарея веде вогонь залпами без використання системи адаптивного управління. Командир дає однакові установки для всіх гармат; коригування вогню відбувається за стандартною процедурою після оцінювання результатів залпу (наприклад, шляхом пристрілювання). Інформація про зношеність стволів оперативно не враховується, всі гармати вважаються умовно справними до конкретного прояву відмов.

– *Сценарій В (адаптивний)* – батарея використовує запропоновану систему моніторингу та контролю. Після чергового пострілу з кожної гармати автоматично визначається ефективність пострілу (за акустичними даними) та оновлюється стан ствола. Контролер у реальному часі вносить поправки: гармати, що продемонстрували неефективний постріл, або підлягають автоматичній корекції, або виключаються з наступного залпу (якщо проблема суттєва). Таким чином залпи динамічно адаптуються, у кожному наступному залпі беруть участь лише гармати з належним станом, а для інших передбачається обслуговування або заміна.

Для обох сценаріїв проведено серії симуляцій (по 100 реалізацій кожного) з однаковими початковими умовами. Вимірювалися такі показники: час, необхідний для ураження цілі; кількість витрачених снарядів; середнє відхилення точок влучання; стан стволів після виконання вогневого завдання. Результати сценаріїв усереднювалися та порівнювалися.

Критерії оцінювання ефективності. Оскільки ефективність бойової роботи артилерії багатовимірною, використовувався узагальнений критерій на основі згортки кількох окремих показників. Введемо такі базові метрики:

- Q – ймовірність ураження цілі заданим обсягом вогню (точність стрільби).
- N – витрата снарядів на ураження цілі.
- T – час, витрачений на виконання вогневого завдання (наприклад, час від відкриття вогню до ураження цілі).

– ΔW – приріст зношеності стволів (у середньому по батареї) за час виконання завдання.

Для кількісного порівняння визначимо інтегральний показник ефективності так:

$$E = \lambda_1 Q - \lambda_2 \frac{N}{N_{\text{norm}}} - \lambda_3 \frac{T}{T_{\text{norm}}} - \lambda_4 \frac{\Delta W}{\Delta W_{\text{norm}}}, \quad (4.5)$$

де $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ – вагові коефіцієнти, що визначають важливість кожного критерію (обрано так, що $\lambda_1 = 1$ найважливіший, $\lambda_{2,3,4} < 1$), а величини в знаменниках – нормувальні (еталонні) значення для приведення показників до безрозмірності. Вираз (4.5) представлено таким чином, що більший E відповідає кращій ефективності: високий Q підвищує E , тоді як більші N , T та зношеність зменшують E . Цей узагальнений критерій подібний до запропонованого в роботі «генералізованого критерію ефективності», що враховує і точність вогню, і швидкість виконання завдання, і ощадливість витрат.

Для практичної доцільності пропонуємо результати експериментів. У таблиці 4.1 наведено порівняння ключових показників для сценаріїв А (традиційного) та В (з адаптивним управлінням) за результатами симуляції. Значення подано усереднено на одне вогневе завдання (одну ціль).

Таблиця 4.1. – Порівняльні результати перевірки ефективності стрільби батареї (усереднено на одне завдання).

Показник	Сценарій А (традиційний)	Сценарій В (адаптивний)
Ймовірність ураження цілі з першого залпу, Q	0,45	0,78
Середня кількість пострілів до ураження, N	6,1	3,8
Середній час до ураження цілі, T (с)	130	85
Інтегральний показник ефективності, E	0,52	0,84

Джерело: розроблено автором.

Як показано в табл. 4.1, використання адаптивного контролера на основі марковської моделі дає суттєві переваги. Ймовірність уразити ціль першим же залпом зросла з 45% до 78%, що означає різке підвищення результативності початкового вогневого нальоту. В адаптивному підході система в середньому витрачає менше снарядів (3,8 проти 6,1) і часу (85 с проти 130 с) на знищення цілі. Узагальнений критерій E в сценарії В майже на 60% вищий, ніж у традиційному сценарії, що підтверджує значне покращення ефективності стрільби засобом запропонованої системи. Варто зазначити, що і зношеність стволів розподіляється оптимальніше: відпрацьований ствол у сценарії В вибуває із залпу раніше, тому його середній приріст зношеності ΔW менший, а навантаження перерозподіляється на справні гармати. У такий спосіб пролонгується ресурс найбільш зношеного ствола (у традиційному підході він би продовжував стріляти і міг швидше вийти з ладу).

Додатково були проведені полігонні стрільби для валідації моделювання. Реальні експерименти (у скороченому обсязі, 2 гармати по 20 пострілів) підтвердили тенденції симуляції: адаптивна система виявила збій швидкості на одній гарматі та запропонувала корекцію, завдяки чому середнє відхилення точок влучання по вертикалі зменшилося приблизно на 30% порівняно з необробленими даними. Отже, методика експериментальної перевірки продемонструвала коректну роботу всіх компонентів системи (сенсори, аналіз, контроль, відображення) та її ефективність у підвищенні результативності стрільби. У таблиці 4.2 систематизовано основні переваги запропонованого підходу порівняно з традиційними методами, а також потенційні ризики і шляхи їх нейтралізації.

Як показано в табл. 4.2, головні переваги системи – це підвищення точності та швидкодії вогню за рахунок оперативної компенсації деградації матеріальної частини, а також пасивний характер контролю, що важливо для практичності.

Таблиця 4.2. Аналіз переваг та можливих проблем під час впровадження системи моніторингу та адаптивного управління.

Показник	Традиційний підхід (без системи)	Адаптивний (із запропонованою системою)
Моніторинг зношеності	Періодичний контроль вручну або спецзасобами; неможливий під час бою	Безперервний моніторинг під час кожного пострілу в реальному часі
Точність стрільби	Поступово падає через зношеність, корекція – лише після явного промаху	Підтримується автоматично: система вносить поправки до того, як похибка стане критичною
Витрата боєприпасів	Зайві втрати снарядів на пристрілювання та через неефективні постріли	Знижена за рахунок виключення неефективних пострілів і швидшого досягнення результату
Вимоги до обладнання	Не потребує додаткових пристроїв, окрім стандартних	Потрібні сенсори та обчислювач; вони повинні бути захищені, підживлені, скореговані
Вразливість	Радарні станції виявлення початкової швидкості демаскують позицію, але вони коштовні. Пасивні методи без системи не застосовуються	Пасивна система не випромінює сигналів, важче демаскується. Ризик: сенсори можуть пошкодитися в бою (вирішується дублюванням, див. 4.4)
Складність для персоналу	Стандартні процедури, звичні для розрахунку	Потрібна підготовка операторів в роботі з новим інтерфейсом; можлива недовіра до автоматичних рішень
Надійність рішень	Залежить від досвіду командира; людський фактор; реакція із затримкою.	Швидке алгоритмічне рішення на основі чисел. Ризик помилки алгоритму (знижено комбінованим аналізом кількох сенсорів та випробуваннями).

Джерело: розроблено автором.

Труднощі впровадження пов'язані з необхідністю додаткового обладнання та його захисту, а також з навчанням особового складу. Проте сучасні тенденції розвитку озброєння свідчать, що переваги від впровадження системи суттєві: артилерія дедалі більше оснащується АСУВ і діагностики, що інтегруються у єдині інформаційні мережі поля бою. Запропонована система доцільно імплементується в актуальну концепцію. Зокрема, її можна розглядати як

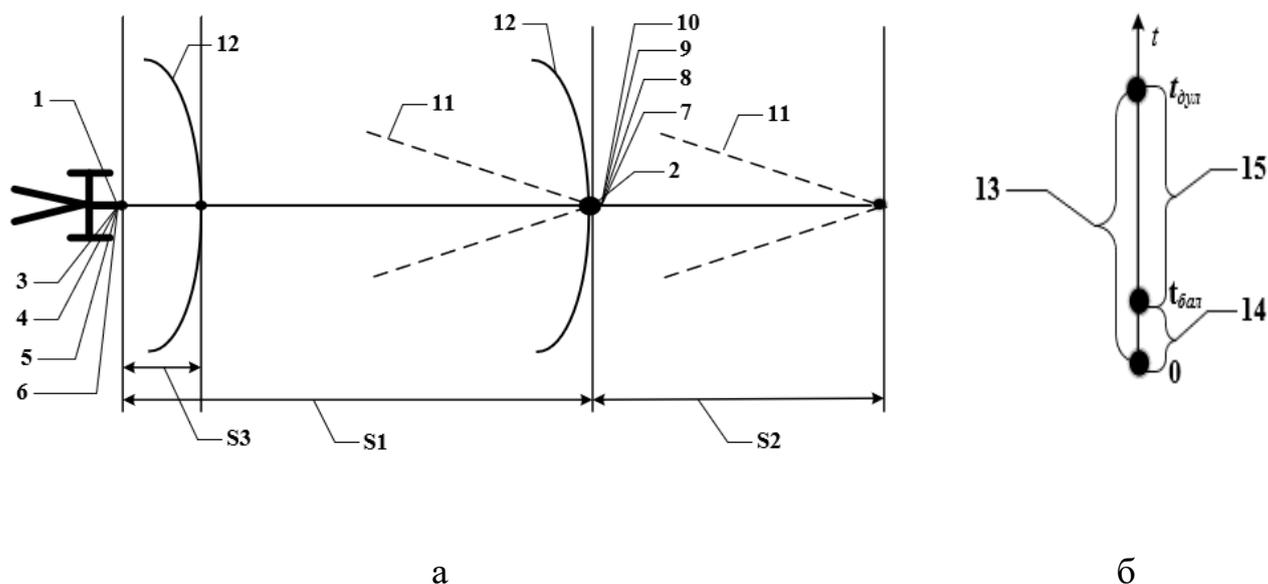
компонент більших АСУВ: дані про стан кожної гармати можуть передаватися на командний пункт і враховуватися під час планування операцій (наприклад, виборі яких гармат надати пріоритетне значення).

4.6 Методи і моделі наукової новизни патентованих рішень для забезпечення надійності АУ

Одержаний результат поставленого перед нами третього завдання дисертаційного дослідження дав можливість розроблення та вдосконалення алгоритмічного та інформаційного забезпечення АСУ артилерійськими підрозділами. Основними підходами дослідження стали використання Марківських моделей і симуляційних методів із застосуванням формальних об'єктно-орієнтованих методів аналізу та проєктування. В межах цього процесу було сформовано класифікацію ключових сутностей предметної області: артилерійських систем, акустичних і оптичних датчиків, алгоритмів аналізу сигналів і станів, а також класів управління процесами бойової роботи.

Реалізація цього завдання уможливила отримання трьох інноваційних патентних рішень, безпосередньо пов'язаних з формалізованими класами та моделями, створеними під час розробки дисертаційного дослідження.

Перший патент [7] базується на розробленій класовій моделі «Barrel», яка інтегрує параметри стану ствола, а також на основі класу «AcousticSensor». Останній відповідає за реєстрацію акустичних сигналів пострілу та передачу їх у клас аналізу зношеності «WearAnalyzer». Винахід полягає в формалізованому алгоритмі визначення початкової швидкості снаряда на основі акустичних сигналів і подальшому порівняльному зіставленні з табличними значеннями. Цей алгоритм реалізовано у вигляді методу класу, що дозволяє автоматично класифікувати зношеність як стан визначеності «Barrel». Використання такого формалізованого підходу забезпечує інтегровану та оперативну діагностику стану артилерійських гармат у польових умовах із високою точністю і надійністю. Спосіб пояснюється певним розташуванням обладнання, яке наведено на рис.4.7.

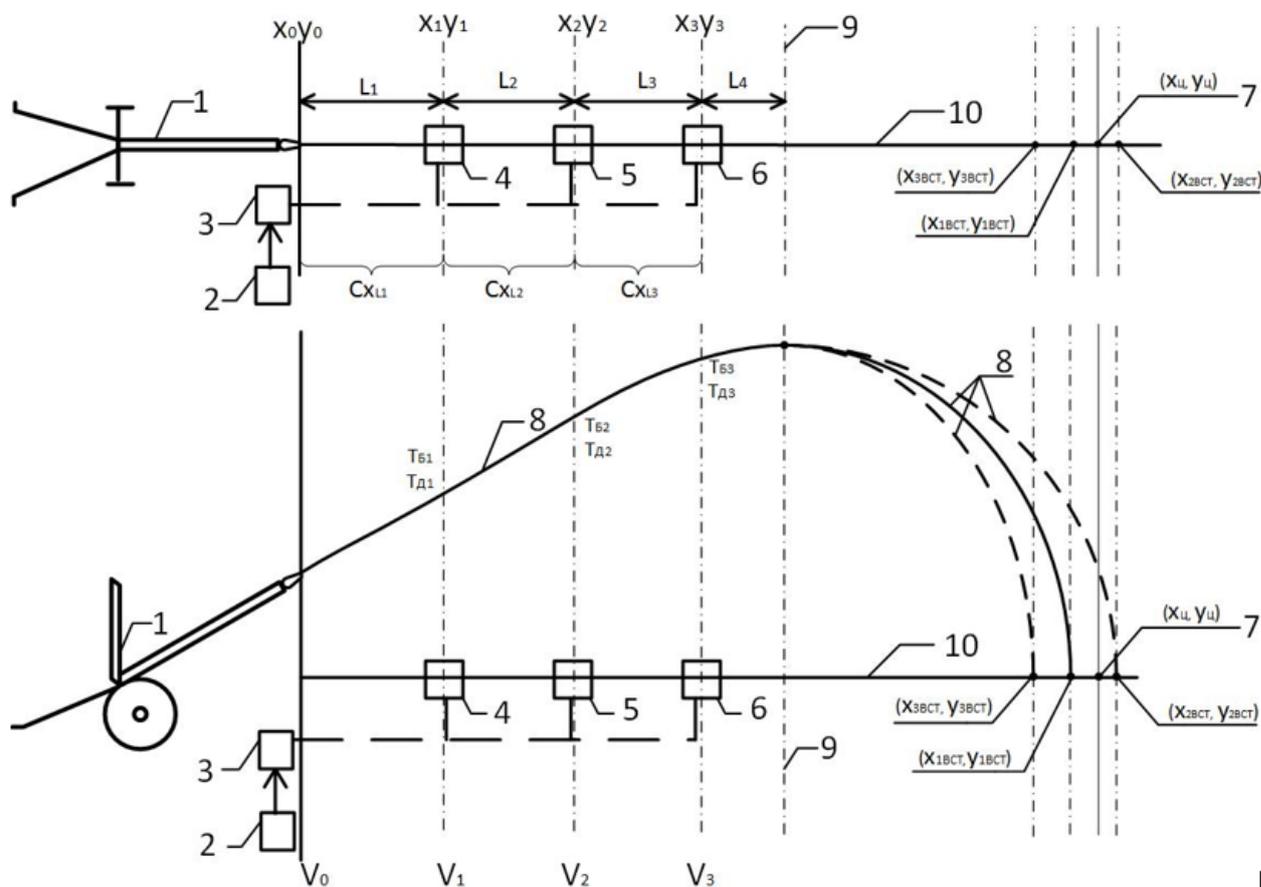


1 – гармата, 2 – мікрофони, 3 – сенсор температури повітря, 4 – сенсор тиску повітря, 5 – сенсор вологості повітря, 6 – сенсор напрямку та швидкості вітру, 7 – сенсор температури повітря біля мікрофонів (2), 8 – сенсор тиску повітря біля мікрофонів (2), 9 – сенсор вологості повітря біля мікрофонів (2), 10 – сенсор напрямку та швидкості вітру біля мікрофонів (2), 11 – балістична хвиля, 12 – дульна хвиля, S1 – відстань від гармати до мікрофонів (2) у напрямку стрільби, S2 – відстань від мікрофонів (2) до знаходження балістичної хвилі (11) у напрямку стрільби в момент реєстрації мікрофонами (2) дульної хвилі (12), S3 – відстань від гармати до знаходження дульної хвилі 12, в момент часу $t_{бал.}$ (14), коли балістична хвиля (11) була зареєстрована мікрофонами (2) на відстані S1, 13 – момент часу реєстрації дульної хвилі $t_{дул.}$, 14 – момент часу реєстрації балістичної хвилі $t_{бал.}$, 15 – інтервал часу, зареєстрований мікрофонами (2) між часом проходженням балістичної $t_{бал.}$ і дульної хвилі $t_{дул.}$

Рис.4.7. Спосіб визначення зношеності ствола і зарядної камери артилерійської гармати (а – схема розташування гармати і вимірювального обладнання, б – діаграма часу реєстрації хвиль в місці розташування мікрофона) . Джерело: [7].

Другий патент [32] апелює до оформленої структури класів моделі траєкторії, які враховують акустичні дані, отримані за допомогою «AcousticSensor». Запропонований підхід полягає в об'єктно-орієнтованому моделюванні просторових точок траєкторії, сформованих класами «TrajectoryPoint» та «TrajectorySegment», із застосуванням методу трипозиційної

акустичної реєстрації. Винахід передбачає процес обчислення інтегрального коефіцієнта опору руху снаряда за даними часових інтервалів реєстрації балістичної і дальної хвиль. Результатом цього процесу є отримання координат точки падіння снаряда навіть за відсутності вибуху, що значно підвищує точність і оперативність АСК вогнем. Спосіб пояснюється певним розташуванням обладнання, яке наведено на рис.4.8.



1 - артилерійське гармата, 2 - метеостанція, 3 - розрахунковий блок, 4 - перша група вимірювальних мікрофонів з комутуючою апаратурою, 5 - друга група вимірювальних мікрофонів з комутуючою апаратурою, 6 - третя група вимірювальних мікрофонів з комутуючою апаратурою, 7 - ціль, 8 - апроксимуючі параболи, які визначаються за трьома точками траєкторії польоту артилерійського снаряда, 9 - таблицна відстань, що фіксує втрату снарядом надзвукової швидкості, 10 - лінія напрямку стрільби, L_1 - відстань між гарматою 1 і першою групою вимірювальних мікрофонів 4, L_2 - відстань між першою групою вимірювальних мікрофонів 4 і другою групою вимірювальних мікрофонів 5, L_3 - відстань між другою групою вимірювальних мікрофонів 5 і третьою групою вимірювальних мікрофонів 6, L_4 - відстань між третьою групою вимірювальних мікрофонів 6 і таблицною відстанню, коли снаряд втратить надзвукову швидкість, X_0, Y_0 - координати гармати 1, X_1, Y_1 - координати першої групи вимірювальних мікрофонів 4, X_2, Y_2 - другої групи вимірювальних мікрофонів 5,

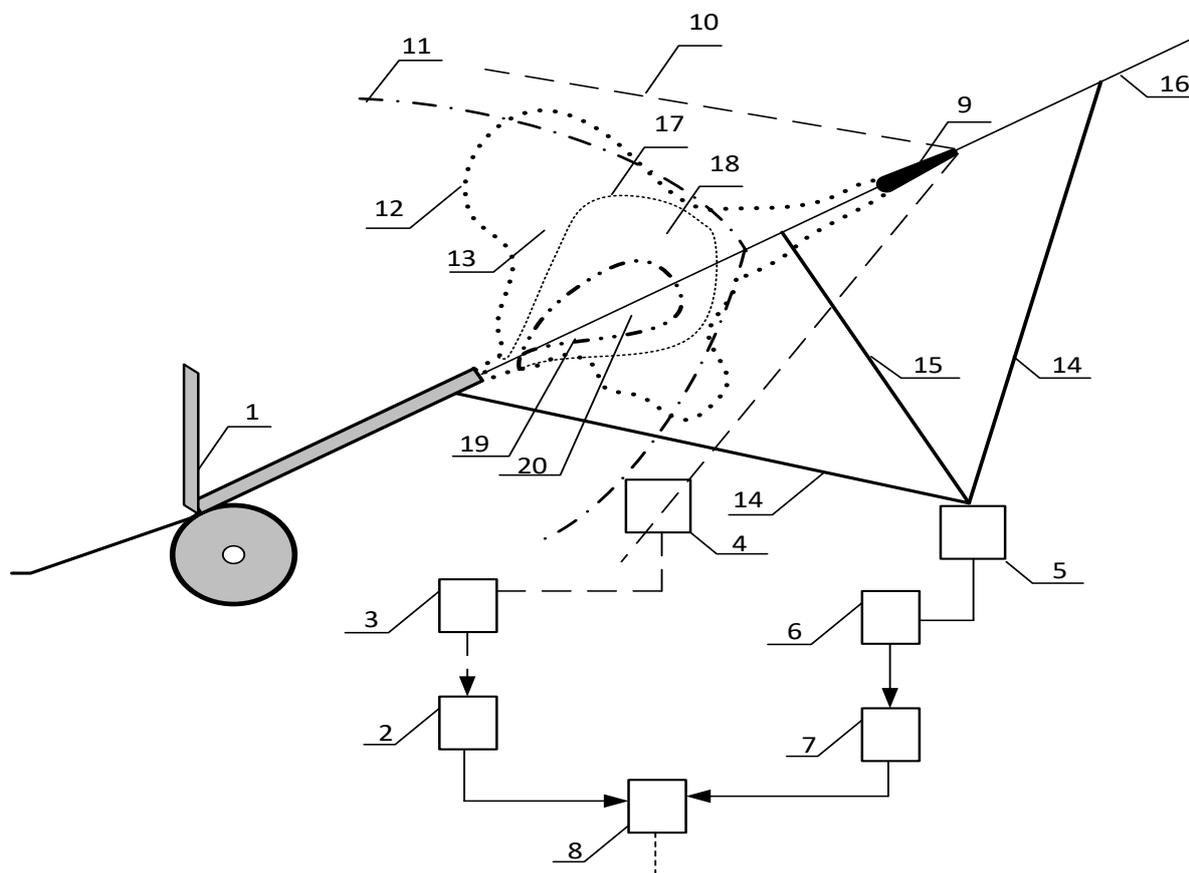
X_3, Y_3 - третьої групи вимірювальних мікрофонів 6, $X_{ц}, Y_{ц}$ - координати цілі 7, $X_{1вст}, Y_{1вст}$ - перша група координат зіткнення снаряда з поверхнею, визначених за розрахунковими параболою 8 по першій групі трьох точок траєкторії, $X_{2вст}, Y_{2вст}$ - друга група координат зіткнення снаряда з поверхнею, визначених за розрахунковими параболою 8 по другій групі трьох точок траєкторії, $X_{3вст}, Y_{3вст}$ - третя група координат зіткнення снаряда з поверхнею, визначених за розрахунковими параболою 8 по третій групі трьох точок траєкторії, V_0 - швидкість снаряда над координатою X_0, Y_0 , V_1 - швидкість снаряда над координатою X_1, Y_1 , V_2 - швидкість снаряда над координатою X_2, Y_2 , V_3 - швидкість снаряда над координатою X_3, Y_3 , C_{xL1} - інтегральний коефіцієнт лобового опору на ділянці L_1 , C_{xL2} - інтегральний коефіцієнт лобового опору на ділянці L_2 , C_{xL3} - інтегральний коефіцієнт лобового опору на ділянці L_3 , $T_{Б1}$ - час реєстрації балістичної хвилі в координаті X_1, Y_1 , $T_{Б2}$ - час реєстрації балістичної хвилі в координаті X_2, Y_2 , $T_{Б3}$ - час реєстрації балістичної хвилі в координаті X_3, Y_3 , $T_{Д1}$ - час реєстрації дульної хвилі в координаті X_1, Y_1 , $T_{Д2}$ - час реєстрації дульної хвилі в координаті X_2, Y_2 , $T_{Д3}$ - час реєстрації дульної хвилі в координаті X_3, Y_3 ,

Рис. 4.8. Спосіб визначення координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею. Джерело: [32].

Третій патент [10] ґрунтується на формалізованій об'єктно-орієнтованій моделі станів артилерійської гармати, представленій класом «ArtilleryUnitState» з використанням марківських ланцюгів для опису динаміки переходів між ефективним і неефективним станами роботи установки. Запропонований метод передбачає автоматичну класифікацію стану пострілу за акустичними параметрами, визначеними класом аналізатора зношеності та ефективності «ShotEfficiencyAnalyzer». За цих обставин забезпечується залучення параметрів енергії, отриманої снарядом, у відношенні до енергії порохового заряду. Отже, автоматизована система здатна в реальному часі проводити адаптивне управління, виводячи неефективні АУ із бойового циклу, у такий спосіб вона оптимізує розподіл навантаження та подовжує ресурс матеріальної частини.

Спільною ознакою перелічених патентних рішень є використання формалізованих об'єктно-орієнтованих моделей класів та методів, розроблених у процесі виконання заявлених четвертим розділом завдань. Вони змогли інтегрувати різноманітні інформаційні потоки, зокрема акустичні, оптичні та балістичні дані, в єдину систему управління з високим ступенем автоматизації.

Застосування класових ієрархій і об'єктних взаємодій засвідчило суттєве скорочення часу аналізу інформації та ухвалення рішень за умов динамічних змін бойової ситуації.



1 – гармата, 2 – комп'ютер, 3 – АЦП, 4 – мікрофон, 5 – цифрова високочастотна ширококутова відеокамера, 6 – персональний комп'ютер з програмним комплексом для обробки даних, 7 – комплекс аналізу, 8 – суматор, 9 – снаряд, 10 – балістична хвиля, 11 – дульна хвиля, 12 – довжина кривої лінії межі між проекцією поверхні порохових газів, утвореними об'ємом порохового викиду, з атмосферним тиском та атмосфери на інтервалі часу їх спостереження, 13 – об'єм порохового викиду при атмосферному тиску, 14 – зйомки, 15 – перпендикуляр до лінії зйомки, 16 – лінії напрямку стрільби, 17 – довжина кривої лінії межі між проекцією поверхні порохових газів та вільного вуглецю на стадії миттєвого займання з тиском, більшим, ніж атмосферний, та атмосфери на інтервалі часу їх спостереження, що утворює ударну дульну хвилю, 18 – поверхні порохових газів та вільного вуглецю на стадії миттєвого займання з тиском, більшим, ніж атмосферний, 19 – довжина кривої лінії межі між проекцією поверхні вільного вуглецю та порохових газів при їх існуванні, що потрапили з каналу ствола гармати в атмосферу з тиском, більшим, ніж атмосферний, та атмосфери, 20 – поверхні вільного вуглецю та порохових газів.

Рис. 4.9. Спосіб визначення енергетичної ефективності артилерійської гармати.

Джерело: [10].

Новизна дослідження полягає в тому, що вперше запропоновано об'єктно-орієнтовану інтегральну модель автоматизованої системи діагностики та управління артилерійськими підрозділами, яка реалізує принципи адаптивності, оперативності та ефективності за допомогою формалізованих методів аналізу сигналів і керування ресурсами рис. 4.10.



Рис. 4.10. Структурна модель інформаційно-аналітичної системи моніторингу та адаптивного управління бойовою роботою АУ. Джерело: розроблено автором

Підсумовуючи, зазначимо, що виконання завдання, поставленого перед нами в четвертому розділі дисертаційного дослідження, забезпечило не лише отримання нових наукових результатів, а й створення практично орієнтованих патентних рішень, що суттєво підвищують надійність і ефективність артилерійських систем в умовах реального застосування.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота містить отримані автором самостійно нові науково обґрунтовані результати з підвищення надійності артилерійських систем за умов динамічних збурень шляхом розробки та вдосконалення алгоритмічного та інформаційного забезпечення автоматизованих систем керування засобом імітаційного моделювання процесів зношення, діагностики та ефективності функціонування артилерійських систем на основі об'єктно-орієнтованих методів. Результати дослідження засвідчили досягнення мети, ефективність реалізації завдань, підтвердили достовірність запропонованих концепцій і дали підстави зробити такі висновки.

1. Сучасні збройні конфлікти, зокрема російсько-українська війна, підтвердили вирішальну роль артилерії у досягненні стратегічної мети. Водночас використання новітніх засобів, зокрема безпілотних літальних апаратів для розвідки і коригування вогню, продемонструвало, що інтеграція різномірних сенсорів та автоматизованих систем управління вогнем дозволяє суттєво підвищити результативність артилерійських ударів. Проте інтенсивне бойове застосування артилерійських систем виявило низку нагальних проблем: прискорене зношення стволів, перегрів гармат, погіршення влучності стрільби і зниження боєдатності комплексів. Низька точність або раптовий вихід з ладу гармати у критичний момент бою можуть суттєво зашкодити успішному виконанню вогневого завдання та збільшити ризик невиправданих втрат, тож забезпечення надійності і стабільно високої результативності артилерії має першочергове значення. Навіть сучасні технології виготовлення не гарантують довговічність артилерійського ствола, а працездатність зброї обмежується кількома тисячами пострілів, після чого починається стрімке падіння точності та виникає потреба в заміні. За умов динамічних бойових дій ресурс ефективності може бути вичерпано за лічені тижні, тому контроль стану і раціональне використання стволів стають нагальною потребою, особливо за воєнних

обставин. Найвні методи оцінювання технічного стану артилерійських установок є недостатньо оперативними та точними, адже регламентні огляди й обміри каналу потребують вилучення гармати з бою, а непрямі ознаки (падіння початкової швидкості снаряда) лише приблизно оцінюють зношеність. Водночас за динамічних умов сучасного бою виникають випадкові збурення (вібрації, погодні умови, маневрування цілей тощо), які істотно впливають на точність пострілу. Без автоматизованого врахування цих факторів гарантоване ураження цілі часто потребує додаткових пострілів та часу, що неприпустимо в реальній бойовій обстановці.

Аналіз наукових джерел показав, що наразі відсутня комплексна інтеграція моніторингу стану, алгоритмів стрільби та моделювання для підтримки прийняття рішень у реальному часі. Сучасні АСУВ ще не впровадили повною мірою Марківські моделі та імітаційні методи, через що знижується ефективність реагування на зношеність і динамічні зміни обстановки. Концепція передбачуваного технічного обслуговування (*predictive maintenance*) в сучасному озброєнні підкреслює важливість безперервного контролю стану систем для завчасного планування ремонту і заміни, що підтверджує необхідність поєднання моніторингу зі штатними системами управління вогнем.

Отже, актуальність виконаного дослідження зумовлена нагальною потребою створення комплексного математичного та інформаційного забезпечення управління артилерією на основі сучасних методів моніторингу технічного стану, Марківських моделей адаптивного управління та імітаційного моделювання бойових процесів. Запропонований у роботі підхід спрямований на суттєве підвищення надійності й живучості артилерійських систем в складних умовах бою, що відповідає актуальним практичним потребам Збройних Сил України і тенденціям розвитку світових оборонних технологій.

2. За результатами виконаного в першому розділі аналізу сучасного стану проблеми визначено ключові фактори, що впливають на надійність і ефективність

артилерійських систем за умов динамічних збурень. Доведено, що навіть відносно невелике переміщення цілі (близько 5 м/с) без фіксації її руху зумовлює промах з відхиленням точки влучання до 100 м, що значно перевищує радіус ураження цілі. Через це попередній автоматичний розрахунок є обов'язковим елементом системи управління вогнем, адже людина не здатна достатньо точно виконати таке коригування в реаліях. Також встановлено, що випадкові варіації балістичних параметрів пострілу, зокрема початкової швидкості снаряда, можуть нівелювати зусилля з точного наведення: без вимірювання фактичної швидкості кожного пострілу та введення поправок навіть по нерухомій цілі не гарантується влучання з першого пострілу. На практиці для вирішення цієї проблеми сучасні гармати оснащують датчиками дульної швидкості або системами контролю траєкторії пострілу (акустичними, радарними тощо), дані з яких надходять до СУВ і дозволяють автоматично скоригувати наведення перед наступним пострілом. Таким чином, традиційні методи ведення артилерійського вогню без автоматизованої корекції не забезпечують необхідної результативності за динамічних умов, що підтверджує необхідність розробки нових моделей та алгоритмів, які інтегрують інформацію про кожен постріл та оперативно реагують на зміни обстановки.

Комплексний аналіз сучасних алгоритмів управління (МРС, адаптивних, робастних, з нечіткою логікою, нейромережевих) показав, що жоден з підходів не забезпечує оптимального поєднання адаптивності, швидкодії та надійності. Прогностичні МРС-системи відзначаються високою точністю та гнучкістю, але потребують значних обчислювальних ресурсів і чутливі до цілісності моделі; робастні регулятори гарантують стійкість до збурень, проте складні в реалізації; інтелектуальні контролери нечіткої логіки чи нейронних мереж здатні пристосовуватися до нелінійностей, однак вимагають значних навчальних вибірок і не гарантують стабільності. Це ускладнює їх пряме застосування за умов реального бою і додатково обґрунтовує потребу в якісно новому комплексному

рішенні. Отже, виявлено науково-технічне завдання, вирішення якого потребує комплексного підходу. Для розділу 1 були сформульовані завдання дослідження, спрямовані на компенсацію впливу динамічних збурень і підвищення бойової ефективності артилерії. Зокрема, обґрунтовано нагальну необхідність удосконалення імітаційних моделей зношення стволів з урахуванням акустичних та оптичних проявів пострілу, розробки нових адаптивних алгоритмів управління стрільбою на основі марківських процесів та створення методів оперативного моніторингу стану гармат за сигналами пострілу з метою верифікації результатів стрільби в реальному часі. Заявлені напрямки дослідження стали основою завдань, які було виконано в дисертаційній роботі.

3. У другому розділі вдосконалено математичні моделі зношення артилерійських стволів, що визначає перший складник наукової новизни дослідження. Розроблено комплексну імітаційну модель внутрішньої балістики пострілу з поступовим зношенням каналу ствола, яка вперше враховує генерацію акустичних та оптичних полів, що супроводжують постріл, для діагностики технічного стану гармати. Модель має об'єктно-орієнтовану структуру (UML-діаграма класів) і охоплює модулі внутрішньої балістики, ерозійного зношення, акустичного і оптичного датчиків. Проведені численні експерименти уможливили дослідження впливу ключових факторів (тиску порохових газів, температури, властивостей заряду, ступеня зношеності ствола тощо) на параметри пострілу та наслідки для ресурсу гармати. Зокрема, імітаційно продемонстровано, що збільшення діаметра каналу через зношення призводить до зниження пікового тиску і початкової швидкості снаряда. Акустично постріл зі зношеного ствола еквівалентний пострілу з гармати меншого калібру за більш сприятливих умов. На основі синтезованих сигналів виділено інформативні ознаки акустичного поля (амплітуди і тривалості ударної та дульної хвиль, спектральні характеристики), чутливі до ступеня відпрацювання ствола. Виявлено, що за інформативними ознаками акустичних і оптичних полів пострілу можна автоматично

класифікувати технічний стан ствола гармати. Зокрема, використання методу опорних векторів SVM дозволило досягти ймовірності розпізнавання стану «справний або зношений» на рівні до 0,94, що перевищує точність традиційних вимірювальних методів. Для забезпечення адекватності аналізу вперше запропоновано новий тип інформаційної одиниці, що об'єднує синхронізовані параметри акустичного (Δt , амплітуди ударної та дульної хвиль, спектральні характеристики) та оптичного (площа й тривалість дульного спалаху, яскравість, колір, інтенсивність бокових спалахів) спостереження. Інформаційна одиниця реалізована як абстрактний базовий клас **InformationUnit** з двома спеціалізованими похідними **AcousticInfoUnit** та **OpticalInfoUnit**, які формуються відповідними сенсорами під час кожного пострілу та передаються до модуля **WearAnalyzer** для загальної обробки. Це дає можливість уніфіковано інкапсулювати різноманітні дані, узгоджувати часові характеристики пострілу, спрощувати інтерфейси обробки в системі управління та підвищувати точність оцінювання технічного стану.

До того ж модель відтворює параметри оптичного поля пострілу. Встановлено, що інтенсивність дульного спалаху та тривалість згорання продуктів пострілу зростають зі збільшенням зношеності ствола або погіршенням характеристик пороху. Це пов'язано з появою вторинного полум'я – запалювання часток вільного вуглецю в атмосфері після виходу з каналу охолоджених газів, що характерно саме для зношених каналів. Отже, виявлено кількісну залежність між оптичними характеристиками пострілу та технічним станом гармати, що лягла в основу методу оцінювання енергетичної ефективності артилерійського пострілу.

Одержані результати підтверджують доцільність використання об'єднаних акустичних та оптичних параметрів у форматі єдиної інформаційної одиниці для оперативної діагностики зношеності. Водночас визначення початкової швидкості та яскравості дульного спалаху дає змогу розраховувати рівень деградації ствола

в режимі реального часу. Імітаційне моделювання забезпечило додаткове дослідження впливу варіативності характеристик боєприпасів, зокрема встановлено, що порохові заряди з тривалим терміном зберігання зумовлюють прискорене ерозійне зношення. Модель дозволяє прогнозувати вплив цих факторів і визначати оптимальні режими стрільби та періодичність обслуговування. Удосконалені імітаційні моделі з використанням інформаційних одиниць формують основу для інтегрованої системи моніторингу, здатної виявляти критичну зношеність безперервно, без виведення гармати з бойової експлуатації. В цілому запропоновані підходи створюють передумови для створення адаптивної автоматизованої системи діагностики артилерійського озброєння.

4. У третьому розділі розкрито другий складник наукової новизни – інтеграцію Марківських моделей із симуляційними методами для адаптації управління артилерійськими гарматами за умов невизначеності. Запропонований підхід до вирішення цієї проблеми вперше доцільно продемонстрував поєднання стохастичної моделі станів бойової роботи з подієво-орієнтованою симуляційною моделлю дій підрозділу, що дозволяє приймати рішення на основі прогнозу ймовірнісних траєкторій та оперативно реагувати на зміну ситуації. Такий принцип базується на об'єктно-орієнтованому представленні артилерійської батареї, в якій керовані об'єкти поєднують як властивості (ресурс, точність, боєздатність), так і динамічні стани (переміщення, вогонь, вихід з ладу, реакція на загрозу).

Ключовим механізмом взаємодії між симуляційною підсистемою та ядром управління стали інформаційні одиниці, запропоновані та реалізовані у другому розділі. Усі сенсорні дані про стан гармати після пострілу (акустичні та оптичні) комплектуються у структуровані об'єкти **AcousticInfoUnit** та **OpticalInfoUnit**, що наслідують абстрактний клас **InformationUnit**. Ці об'єкти формують потік спостережень для **WearAnalyzer**, де на основі характеристик хвиль (Δt , спектр,

спалах, яскравість, площа спалаху тощо) оцінюється технічний стан гармати. Далі оновлений стан агрегується в **StateProfile** і передається до **MarkovDecisionModel**, яка використовує цю інформацію для коригування ймовірностей переходів між станами та перегляду стратегій.

Таким чином, кожне спостереження в моделі зумовлює оновлення марківського оцінювання, що забезпечує зворотний зв'язок між реальною поведінкою гармати й прогнозами в моделі. Якщо SVM-класифікатор фіксує початкові ознаки критичної зношеності, ймовірність успішного ураження зменшується, що зумовлює зміну стратегії: гармата тимчасово вилучається із залпу або ідентифікується як менш затребувана в розподілі пострілів. Це дозволяє реалізувати адаптивне управління, де марківські стани не є фіксованими, а динамічно уточнюються на основі симуляційних спостережень, що принципово відрізняє даний підхід від класичних схем зазначених моделей.

Імітаційне моделювання бойового процесу підтвердило ефективність запропонованого впровадження. У сценаріях з динамічними загрозами та невизначеністю (наприклад, контрбатареїним вогнем або частковою відмовою обладнання) адаптивна система зберігала до 70–85 % боєздатності, тоді як традиційна втрачала її майже повністю. Інформаційні одиниці забезпечили єдину узгоджену точку доступу до поточних параметрів пострілу, тим самим дозволивши спростити інтерфейс між підсистемами та зменшити тривалість аналізу.

Тож розроблена система дозволила вперше реалізувати зворотний цикл «постріл – моніторинг – оновлення стану – нове рішення» в артилерійській підсистемі управління на основі інтеграції марківських процесів з симуляційною моделлю, підтримуваною інформаційними одиницями. Це забезпечило підвищення точності, адаптивності та ефективності вогневих рішень за умов динамічних збурень, що і зумовило досягнення поставленої мети дисертаційного дослідження.

5. У четвертому розділі розроблені моделі та алгоритми інтегровано в єдину систему та проведено експериментальну перевірку її ефективності – це третій заявлений складник новизни дисертації. Запропоновано структуру інформаційно-аналітичної підсистеми моніторингу стану гармат і адаптивного управління вогнем, реалізовану за принципами безперервного збору даних та автоматизованого циклу «сенсори – аналіз – управління». Підсистема включає акустичні й оптичні сенсори, модулі оцифрування й попередньої обробки сигналів, бортовий обчислювальний модуль (програмні компоненти **WearAnalyzer**, модель **Barrel**, база знань про стан гармати), інтерфейс оператора та інтерфейси зовнішнього обміну даними з автоматизованою системою управління і балістичним обчислювачем. Структура побудована на засадах шаблону MVC та ООП, що забезпечує модульність і сумісність із наявними системами управління. Результати імітаційного експерименту, проведеного для порівняння з традиційним підходом, засвідчили високу ефективність інтегрованої системи. Імовірність ураження цілі першим пострілом зросла з 45% (за стандартного управління) до 78% з використанням Марківського контролера. Середня витрата боєприпасів на одну ціль зменшилась з 6,1 до 3,8 пострілу, а середній час ураження цілі скоротився з 130 с до 85 с. Узагальнений показник ефективності стрільби (комплексно враховує точність, швидкість і ресурс) підвищився приблизно на 60% порівняно з традиційним варіантом, що підтверджує перевагу запропонованої системи. Для валідації моделювання проведено полігонні стрільби (два гарматні розрахунки по 20 пострілів кожен), які підтвердили працездатність усіх компонентів системи. Система коректно виявила деградацію дульної швидкості на одному зі стволів та внесла відповідні поправки, у результаті чого середнє вертикальне відхилення точок влучання зменшилось приблизно на 30% у порівнянні зі стрільбою без корекції. Вказані кількісні результати свідчать про радикальне підвищення ефективності артилерійського вогню завдяки впровадженню адаптивного управління. Система

забезпечує високу ймовірність ураження цілі вже першим пострілом і значно скорочує загальний час виконання вогневого завдання, що є критично важливим у бойових умовах. До того ж зменшується витрата боєприпасів та оптимізується використання матеріальної частини – ресурс найбільш зношених стволів подовжується за рахунок перерозподілу навантаження. Таким чином, інтегрована підсистема моніторингу й управління успішно пройшла експериментальну перевірку та продемонструвала значне підвищення точності й швидкодії артилерійського вогню порівняно з традиційними підходами. Загалом експериментальна перевірка підтвердила працездатність і високу ефективність усіх компонентів розробленої підсистеми.

6. Запропоновані в дисертації методи і засоби мають значний потенціал практичного застосування. Розроблену систему доцільно впроваджувати в штатні автоматизовані системи управління артилерійським вогнем Збройних Сил України, що дозволить підвищити ефективність ураження цілей, зменшити витрати боєприпасів та пролонгувати ресурс стволів. Це, у свою чергу, сприятиме економії матеріальних ресурсів та зниженню ризиків для особового складу через скорочення тривалості вогневих операцій. Теоретико-практичні засади нашого дослідження доцільно використовувати артилерійським підрозділам Сухопутних військ і Десантно-штурмових військ Збройних Сил України, де інтеграція засобів моніторингу стану гармат та адаптивного наведення сприятиме зростанню боєздатності та живучості зброї. Зокрема, розроблений спосіб визначення координати зіткнення артилерійського снаряда з ціллю призначений для оперативного коригування вогню по рухомих цілях, а метод діагностики зношення ствола може бути впроваджений у систему технічного забезпечення для контролю ресурсу гармат безпосередньо під час стрільби. Новизна і практична цінність розробок підтверджуються отриманими охоронними документами. Принципи адаптивного управління ефективні не лише для ствольної артилерії, а й для ракетних комплексів. Так, запропоновано метод

визначення оптимальної кількості послідовних пусків ракет для гарантованого знищення морської цілі. Це свідчить про універсальність і широкі перспективи для подальшого практичного застосування розроблених підходів. Дисертаційне дослідження виконано у Національному університеті «Одеська політехніка» в межах держбюджетної НДР за тематикою «Підвищення ефективності АСУ спеціального призначення за рахунок моделювання нелінійних високоенергетичних динамічних процесів». Основні результати роботи апробовано на міжнародних науково-практичних конференціях та опубліковано у профільних наукових виданнях (зокрема в тих, що індексуються в Scopus), що підтверджує досягнення мети дослідження, наукову новизну та практичну значущість отриманих результатів. Загальне впровадження розроблених технологій сприятиме підвищенню обороноздатності та технологічного рівня Збройних Сил України. Отже, результати дисертаційної роботи повністю відповідають поставленій меті та становлять вагомий науково-практичний доробок у галузі підвищення надійності та ефективності бойового застосування артилерії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Świętochowski N. Field Artillery in the defensive war of Ukraine 2022-2023 Part I. Combat potential, tasks and tactics. *SJMULF*. 2023. Vol. 210(4) P. 341-358. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.1631>.
2. Świętochowski N. Field Artillery in the defensive war of Ukraine 2022-2023. Part II. Methods of task implementation. *SJMULF*. 2024. Vol. 211(1). P. 57-76. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.4136>.
3. Demydenko V.E., Maksymov M.V., Boltentkov V.O. Combat operations model of a single self-propelled artillery system for the computer game ARMA 3. *Applied Aspects of Information Technology*. 2024. Vol. 7, No. 3: 207–218. DOI:<https://doi.org/10.15276/aait.07.2024.14>.
4. Bartulović V., Trzun Z., Hoić M. Use of Unmanned Aerial Vehicles in Support of Artillery Operations. *Strategos*. 2023. Vol. 7 (1). P. 71–92. <https://hrcak.srce.hr/305562>
5. Oprean L.G. Artillery and Drone Action Issues in the War in Ukraine. *Scientific Bulletin*. 2023. Vol. 28(1). P. 73-78. <https://doi.org/10.2478/bsaft-2023-0008>
6. Dobrynin Y., Maksymov M., & Boltentkov V. Development of a method for determining the wear of artillery barrels by acoustic fields of shots. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 3(5 (105)). P. 6–18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.206114>
7. Спосіб визначення зношення дула і зарядної камори артилерійської гармати: пат. України на винахід № 126356; заявл. 13.08.2020; опубл. 21.09.2022, Бюл. № 38. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1706588/>
8. Ліцман А., Нестеров Д. Визначення ступеня впливу окремих факторів на частоту відмов механічного обладнання артилерійського озброєння під час його експлуатації. *Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Серія: військові та технічні науки*. 2020. Том 80. P. 283–99. <http://dx.doi.org/10.32453/3.v80i2.204>

9. Boltentkov V., Brunetkin O., Dobrynin Y., Maksymova O., Kuzmenko V., Gultsov P., Demydenko V. ., & Soloviova O. Devising a method for improving the efficiency of artillery shooting based on the Markov model. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 6 № 3 (114), 6–17.

<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245854>

10. Спосіб визначення енергетичної ефективності артилерійської гармати: пат. України на винахід. № 128164; заявл. 05.04.21; опубл. 24.04.24, Бюл. № 17.

<https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1796619>

11. Kislitsyn, A., & Dorofeev, N. Directions for the development of domestic self-propelled artillery systems based on the analysis of samples of artillery weapons from the leading countries of the world. *Social Development and Security*. 2021. Vol. 11(6). P. 98-107. <https://doi.org/10.33445/sds.2021.11.6.7>

12. Спосіб визначення кількості послідовного пуску ракет пусковою установкою для знищення морської цілі: пат. України на на корисну модель № 155594; заявл. 02.10.2023; опубл. 13.03.2024. Бюл. №11.

<https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1788150>

13. Khudov H., Yuzova I., Lisohorskyi B., Solomonenko Y., Mykus S., Irkha A., Onishchuk V., Sukonko S., Semiv G., & Bondarenko S. Development of methods for determining the coordinates of firing positions of roving mortars by a network of counter-battery radars. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2021. Vol. 3, P. 140-150.

<https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001821>

14. Brzozowski M., Pakowski M., Nowakowski M., Myszka M. and Michalczewski M., Radars with the function of detecting and tracking artillery shells - selected methods of field testing, 2019 IEEE 5th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), Turin, Italy, 2019, pp. 429-434,

<https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace.2019.8869656>

15. Samčović A. Serious games in military applications. *Vojnotehnički Glasnik / Military Technical Courier*. 2018. Vol. 66 (3). P. 597–613
<https://aseestant.ceon.rs/index.php/vtg/article/view/16367>
16. Добринін Є. В., Болтъонков В. О., Максимов М. В. Інформаційна технологія автоматизованої оцінки зносу артилерійських стволів на основі SVM-класифікатора. *АИТ*. 2020. Том 3, № 3. Ст. 117–132.
<https://doi.org/10.15276/aait.03.2020.1>.
17. Girardi R., de Oliveira J.C. IMEVR: An MVC Framework for Military Training VR Simulators. *Lecture Notes in Computer Science*. 2021. vol 12770. P. 582–594. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77599-5_40
18. Oprean L.-G. Artillery from the perspective of firing effects and ensured capabilities. *Scientific Bulletin*. 2020. Vol. 25. P. 107–113.
<https://doi.org/10.2478/bsaft-2020-0015>
19. Журавльов О.О., Орлов С.В., Шуляков С.О. Математична модель траєкторії польоту снаряда далекобійної артилерійської системи. *Системи озброєння і військова техніка*. 2020. № 3(63). С. 62-68.
<https://doi.org/10.30748/soivt.2020.63.09>
20. Ganjiyev S.J., Usmonov S.R., Karimov A.Kh. Use of artillery in modern war: a brief analysis of the Ukrainian conflict. *Galaxy International Interdisciplinary Research Journal*. 2023. Vol. 11 (3). P. 118–121.
<https://internationaljournals.co.in/index.php/giirj/article/view/3646>
21. Chávez K., Swed O. Emulating underdogs: Tactical drones in the Russia-Ukraine war. *Contemporary Security Policy*. 2023. Vol. 44 (4). P. 592–605.
<https://dx.doi.org/10.1080/13523260.2023.2257964>
22. Aliev A. A. ogli, Bayramov A. A. ogli, & Sabziev E. N. ogly. Effectiveness of artillery systems. *Advanced Information Systems*. 2018. Том 2, №3, С.115–122.
<https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.3.20>

23. Brunetkin O. Maksymov M. Brunetkin V. Maksymov O. Dobrynin Y. Kuzmenko V. Gultsov P. Development of the model and the method for determining the influence of the temperature of gunpowder gases in the gun barrel for explaining visualize of free carbon at shot. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Том 4, № 1(112). P. 41–53., <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239150>

24. Tarakhtiy O. S., Gultsov P. S., Maksimov O. M. Modeling the formation of muzzle blast as a diagnostic sign of the state of the shot. *Science and society: modern trends in a changing world: proceedings of the 2nd International scientific and practical conference*. MDPC Publishing. Vienna, Austria. 2024. P. 21-27. <https://sci-conf.com.ua/ii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-science-and-society-modern-trends-in-a-changing-world-22-24-01-2024-viden-avstriya-arhiv>

25. Maksymova O.B., Boltenev V.O., Maksymov M.V., Gultsov P.S. Maksymov O.M. Development and Optimization of Simulation Models and Methods for Controlling Virtual Artillery Units in Game Scenarios. *Herald of Advanced Information Technology*. 2023. Vol.6, № 4. P. 320–337. DOI: <https://doi.org/10.15276/hait.06.2023.21>.

26. Maksymov O., Toshev O., Demydenko V., & Maksymov M. Simulation modeling of artillery operations in computer games: approach based on Markov processes. *Technology Audit and Production Reserves*. 2024. №5/2(79). P. 23-28. <https://journals.uran.ua/tarp/article/view/312873>

27. Dobrynin Y., Brunetkin O., Maksymov M., & Maksymov O. Constructing a method for solving the riccati equations to describe objects parameters in an analytical form. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Том 3, № 4(105). P. 20–26. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.205107>

28. Maksymova O., Boltyonkov V., Gultsov P., Maksymov O. Improvement of the model and method of artillery installation target damage control with minimal combat capability loss. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*. Issue 2(68). Dec. 2023. P. 98–115. DOI: <https://doi.org/10.15276/opu.2.68.2023.1>.

29. Brunetkin O., Beglov K., Brunetkin V., Maksymov O., Maksymova O., Havaliukh O., & Demydenko V. Construction of a method for representing an approximation model of an object as a set of linear differential models. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol 6, №2(108). P. 66–73. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.220326>

30. Тарахтій О. С., Гульцов П. С., Максимов О. М. Удосконалення моделі керування бойовою здатністю артилерійської гармати. *Topical aspects of modern scientific research: proceedings of the 5th International scientific and practical conference*. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. 2024. P. 256-261. URL: <https://sci-conf.com.ua/v-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-topical-aspects-of-modern-scientific-research-25-27-01-2024-tokio-yaponiya-arhiv/>.

31. Тарахтій О.С., Гульцов П. С., Максимов О. М. Удосконалення методу керування бойовою здатністю артилерійської гармати. *European congress of scientific achievements: proceedings of the 1st International scientific and practical conference*. Barca Academy Publishing. Barcelona, Spain. 2024. P. 120-125. <https://sci-conf.com.ua/i-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-european-congress-of-scientific-achievements-29-31-01-2024-barselona-ispaniya-arhiv>

32. Спосіб визначення координати зустрічі артилерійського снаряда з поверхнею: пат. України на винахід № 127193; заявл. 20.11.20 ; опубл. 31.05.2023. Бюл. №22. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1739129>

33. Dobrynin Ye.V., Boltenev V.O., Kuzmenko V.V., Maksymov O.M. Development of a universal binary classifier of the state of artillery barrels by the physical fields of shots. *Applied Aspects of Information Technology*. 2022. Vol.5 No.4. pp. 289–302. <https://doi.org/10.15276/aait.05.2022.19>

34. Максимов М.В., Гульцов П.С., Болтънков В.О., & Максимов О.М. Метод верифікації артилерійського вистрілу під час впливу випадкових збурень. *Морська безпека*. 2024, №1. С. 36-49. <https://doi.org/10.32782/msd/2024.1/05>

35. Maksymov M. V, Boltenkov V. O., Gultsov P. S., Maksymov O. M. Verification of artillery fire under the influence of random disturbances for the computer game ARMA 3. *Applied Aspects of Information Technology*. 2023. Vol.6 No.4: P. 362–375. <https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.24>
36. Тарахтій О. С., Гульцов П. С., Максимов О. М. Метод параболічної апроксимації визначення координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею. *Modern problems of science, education and society: proceedings of the 12th International scientific and practical conference*. SPC “Sci-conf.com.ua”. Kyiv, Ukraine. 2024. P. 21-27. <https://sci-conf.com.ua/xii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-modern-problems-of-science-education-and-society-5-7-02-2024-kiyiv-ukrayina-arhiv/>.
37. Kumar D., Kalra S., Jha M.S. A concise review on degradation of gun barrels and its health monitoring techniques. *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol.142. 106791. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106791>
38. Wang L, Chen Z, Yang G. An Uncertainty Analysis Method for Artillery Dynamics with Hybrid Stochastic and Interval Parameters. *Comput Model Eng Sci*. 2021. Vol.126(2). P. 479–503. <https://doi.org/10.32604/cmescs.2021.011954>
39. Wang X., Li X., Sun Q., Xia C., Chen Y. Improved Manta Ray Foraging Optimization for PID Control Parameter Tuning in Artillery Stabilization Systems. *Biomimetics*. 2025. Vol. 10(5). P. 266. <http://dx.doi.org/10.3390/biomimetics10050266>
40. Yuan S., Deng W., Yao J., Wang X. Robust adaptive precision motion control of tank horizontal stabilizer based on unknown actuator backlash compensation. *Defence Technology*. 2023. Vol. 20. P. 72–83. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214914722001921>
41. Huang W., Li Y., Tang J., Qian L. Fault Diagnosis Methods for an Artillery Loading System Driving Motor in Complex Noisy Environments. *Sensors*. 2024. Vol. 24(3), P. 847. <https://doi.org/10.3390/s24030847>

42. Xiao H., Yang G., Ge J. Surrogate-based multi-objective optimization of firing accuracy and firing stability for a towed artillery. *Journal of Vibroengineering*. 2017. Vol. 19(1). P. 290–301. <https://doi.org/10.21595/jve.2016.17108>
43. Xu F., Yang G., Wang L. Artillery structural dynamic responses uncertain optimization based on robust Nash game method. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2021. Vol. 35. P. 4105–4113. <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0822-7>
44. Cao R., Zhang X. Design optimization for a launching system with novel structure. *Defence Technology*. 2019. Vol. 15. P. 680–689. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.08.005>
45. Shen C., Zhang X., Wu X., Zhu T. Modeling and simulation of bullet-barrel interaction process for the damaged gun barrel. *Defence Technology*. 2019. Vol. 15(6). P. 972–986. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.07.009>
46. Fink O., Wang Q., Svensén M., et al. Potential, challenges and future directions for deep learning in prognostics and health management. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2020. Vol. 92, 103678. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.103678>
47. Rezaeianjouybari B., Shang C. Deep learning for prognostics and health management: State of the art, challenges, and opportunities. *Measurement*. 2020. Vol. 163. 107929. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107929>
48. Li X., Ding Q., Sun J.Q. Remaining useful life estimation in prognostics using deep convolutional neural networks. *Reliability Engineering & System Safety*. 2018. Vol. 172. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.11.021>
49. Lei Y., Li N., Guo L., et al. Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to RUL prediction. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2018. Vol. 104. P. 799–834. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.11.016>
50. Wang Z., Zhang Y., Li J. A method for rapidly evaluating reliability and predicting remaining useful life using two-dimensional convolutional neural network

with signal conversion. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2019. Vol. 33(10). P. 2561–2573. <https://doi.org/10.1007/s12206-019-0504-x>

51. Wang T., Li G., Fan X., Chen Y. Numerical simulation and optimized design of cased telescoped ammunition interior ballistic. *Defence Technology*. 2018. Vol. 14(1). P. 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2017.11.006>

52. Hu C., Wang G., Xu J., Huang B. Influence of multiple structural parameters on interior ballistics based on orthogonal test methods. *Defence Technology*. 2019. Vol. 15(5). P. 690–698. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.06.014>

53. Cao R., Zhang X. A novel launching system applying a relay chamber technology and its optimization. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 2019. Vol. 44(6), P. 1199–1207. <https://doi.org/10.1002/prop.201800242>

54. Zhu H., Chen M., Han Z., & Lungu M. Inverse Reinforcement Learning-Based Fire-Control Command Calculation of an Unmanned Autonomous Helicopter Using Swarm Intelligence Demonstration. *Aerospace*. 2023. Vol. 10(3): 309. <https://doi.org/10.3390/aerospace10030309>

55. Hu X., Li C., Zhang X., Xu J. A robust optimization approach for an artillery fire-scheduling problem under uncertainty. *European Journal of Operational Research*. 2019. Vol. 272(1). P. 77–89. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2018.08.015>

56. Kim S., Kim H., Lee D. Agent-based simulation and its application to analyze combat effectiveness combined with communication success ratio. *Mathematical Problems in Engineering*. 2018. Article ID 2730671. <https://doi.org/10.1155/2018/2730671>

57. Chen Y., Xie M., Zou X, Liu J. Development and challenges of nonlinear dynamic modeling and stabilization control of mobile firing guns. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2024. 0(0). <https://doi.org/10.1177/09544070241232730>

58. Zou L., Fan J., Huang J., Chen J. The Construction of a Small-Caliber Barrel Wear Model and a Study of the Barrel Wear Rule. *Coatings*. 2024. Vol. 14, № 9. 1200. <https://doi.org/10.3390/coatings14091200>

59. Anipko O., Baulin D., Horielyshev S., Boikov I., Medvid M., Babkov Y., Nakonechnyi A., Kolomiitsev O., & Gleizer N. Development of a method for predicting barrel wear resistance when using ammunition with a long storage life. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2024. № 2. P.119-130. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2024.003298>

60. Banerjee A., Nayak N., Giri D. and Bandha K. Effect of Gun Barrel Wear on Muzzle Velocity of a typical Artillery Shell. Proceedings of the *2019 International Conference on Range Technology (ICORT)*, Balasore, India, 2019, pp. 1-3, <https://doi:10.1109/ICORT46471.2019.9069641>

61. Li X., Mu L., Zang Y., Qin Q. Study on performance degradation and failure analysis of machine gun barrel. *Defence Technology*. 2020. Vol. 16(2), pp. 362–373. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.05.008>

62. Pinezhi D., Heller J., Lu L. Ballistic projectile tracking using CW Doppler radar. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2010. Vol. 46(3), pp. 1302–1311. <https://doi.org/10.1109/TAES.2010.5545190>

63. Zheng D., Tan H., Zhou F. A design of endoscopic imaging system for hyper long pipeline (gun barrel) inspection based on a wheeled pipe robot. *AIP Conference Proceedings*. 2017. 1820:060001. <https://doi10.1063/1.4977316>

64. Dalzochio J., Kunst R., Pignaton E., et al. Predictive Maintenance in the Military Domain: A Systematic Review of the Literature. *ACM Comput. Surv.* 2023. 55, 13s, Article 267. P. 1-30. <https://doi.org/10.1145/3586100>

65. Shim Y., Atkinson M. P. Analysis of artillery shoot-and-scoot tactics. *Naval Research Logistics*. 2018. Vol. 65, №3. P. 242–274. <https://doi.org/10.1002/nav.21803>

66. Cha Y.-H., Kim Y.-D. Fire scheduling for planned artillery attack operations under time-dependent destruction probabilities. *Omega*. 2010. Vol.38 №5. № P. 383–392. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2009.10.003>

67. Choi Y. B., Jin S. H., Kim K. S. Deterministic and robust optimization approach for single artillery unit fire scheduling problem. *Applied Sciences*. 2017. Vol. 7, № 10, 1038. <https://doi.org/10.3390/app7101038>

68. Choi Y. B., Jin S. H., Kim K. S., Chung B. D. A robust optimization approach for an artillery fire-scheduling problem under uncertain threat. *Computers & Industrial Engineering*. 2018. Vol. 125, P. 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.08.015>

69. Choi Y. B., Yun H. Y., Kim J. Y., Jin S. H. Robust optimization approach using scenario concepts for artillery firing scheduling under uncertainty. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9, № 14. 2811. <https://doi.org/10.3390/app9142811>

70. Xu F., Yang G., Wang L. Artillery structural dynamic responses optimization based on Stackelberg game method. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2021. Vol. 40, № 1. P. 140–159. <https://doi.org/10.1177/14613484211029140>

71. Cai J.-P., Yu R., Yan Q., Mei C., Wang, B.-R., Shen, L. Event-triggered adaptive control for tank gun control systems. *IEEE*. 2019. Access 7. P. 17517–17523. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2906672>

72. Çimen T. Survey of state-dependent Riccati equation in nonlinear optimal feedback control synthesis. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2012. 35(4), P. 1025–1047. <https://doi.org/10.2514/1.55821>

73. Raza A., Wang H. Range and accuracy improvement of artillery rocket using fixed canards trajectory correction fuze. *Aerospace*. 2022. Vol.9, № 1. P.32. <https://doi.org/10.3390/aerospace9010032>

74. Biggs, A., Hamilton, J. A primer on using Monte Carlo simulations to evaluate marksmanship. *Journal of Defense Analytics and Logistics*. 2023. Vol.7, №2. P.138–155. <https://doi.org/10.1108/JDAL-10-2022-0008>

75. Wade B. M. A multi-objective optimization of ballistic and cruise missile fire plans based on damage calculations from missile impacts on an airfield defended by an air defense artillery network. *Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology*. 2019. Vol. 16, №2. P. 103–117. <https://doi.org/10.1177/1548512918788503>

76. Biggs A., Huffman G., Hamilton J., Markwald R. R. Small arms combat modeling: a superior way to evaluate marksmanship data. *Journal of Defense Analytics and Logistics*. 2023. Vol. 7, №1. P. 69–87. <https://doi.org/10.1108/JDAL-11-2022-0012>

77. Shevtsov R. An improved mathematical model of fire damage to enemy artillery units by missile forces and artillery in operations. *Social Development and Security*. 2023. Vol.13, № 1. P. 14–23. <https://doi.org/10.33445/sds.2023.13.1.2>

78. Yang J., et al. Artillery sound recognition based on waveform space projection. In: Proc. 4th Intl. Symp. on Signal Processing Systems. *IEEE*. 2020. pp. 408–412. <https://doi.org/10.1117/12.2631838>

79. Ka M.-H., Vazhenin N.A., Baskakov A.I., Oh C.-G. Analysis of Power Performance of a Muzzle Velocity Radar. In: Proc. 5th Int. Conf. on Info. Communications & Signal Processing. *IEEE*. 2005. 5 pp. <https://doi.org/10.1109/ICICS.2005.1689038>

80. Chen W., Liu J. Ultrasonic guided wave testing method of gun barrel crack defects based on L(0,2) mode. *Advances in Intelligent Systems and Interactive Applications*. 2017. Vol. 686. pp. 530–588. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-69096-4_74

81. Шабатура Ю., & Поповченко О. Сучасні методи і засоби технічної діагностики артилерійського озброєння та перспективи їх розвитку. *Військово-технічний збірник*. 2023. № 29. С. 90–101. <http://dx.doi.org/10.33577/2312-4458.29.2023.90-101>

82. Qi W., Liu J., Gou Y., Wang K. Enhancing Artillery Barrel Wear Detection via CRNN-Based Acoustic Analysis and Domain Adaptation. *Journal of Physics:*

Conference Series. 2024. Vol. 2891. 112018.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2891/11/112018/pdf>

83. O. Brunetkin, V. Kuzmenko, O. Soloviova. Mathematical model of energy transformation processes in barrel system for determining shooting performance. *Energy Engineering and Control Systems.* 2022. Vol. 8. No. 1. pp. 28 – 39. <https://doi.org/10.23939/jeeecs2022.01.028>

84. Zhang P., Jin W., Ren D., & Lyu Y. (). Measurement and reconstruction of geometric parameters of the barrel bore based on the laser scanning strategy. *Frontiers in Physics.* 2023. Vol. 10. 1115544. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.1115544>

85. Li X., Mu L., Zang Y., Qin Q. Strain-based health monitoring and remaining life prediction of a large-caliber gun barrel. *Measurement*, 122, pp. 297–311, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.02.040>

86. Maciąg P., Chałko L. Use of sound spectral signal analysis to assess the technical condition of mechanical devices. *MATEC Web of Conferences.* 2019. Vol. 290. 01006. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929001006>

87. Seyr H., Muskulus M. Use of Markov Decision Processes in the evaluation of corrective maintenance scheduling policies for offshore wind farms. *Energies.* 2019. Vol.12, №15. 2993. <https://doi.org/10.3390/en12152993>

88. Chen Y., Cai Y., Yang G., Zhou H., Liu J. Neural adaptive pointing control of a moving tank gun with lumped uncertainties. *Journal of Mechanical Science and Technology.* 2022. Vol. 36. pp. 2709–2720. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12206-022-0504-0>

89. Chu Y., Huo C., Zhang F. ADRC-PID cascade control method for a vehicle mounted and unbalanced barrel pitching system under bumpy road and erosion wear conditions. *Journal of Mechanical Science and Technology.* 2022. Vol. 36, № 9. pp. 4363–4377. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12206-022-0802-6>

90. Simon G., Maroti M., Ledeczki A., Sztipanovits J. Shooter Localization in Urban Terrain. *Computer*. Vol. 37, № 8. pp. 60–61, 2004. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1323018>
91. Yan C, Zhu C. Quantitative assessment method of muzzle flash and smoke at high noise level on field environment. *Sci Rep*. 2023 Jan 27. Vol. 13, № 1:1480. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36707528/>
92. Jin Y., Zou L., Huang J., & Chen J. (). Numerical research on ablation and wear of the artillery barrel based on UMESHMOTION user-defined subroutine. *Engineering Reports*. 2023. Vol. 5, № 3. e12575. <https://doi.org/10.1002/eng2.12575>
93. Bai H., Lu T., Yang Z., Sun W. Design of a Software-Defined Artillery System Architecture. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. 2891. 112009, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2891/11/112009>

ДОДАТОК А

Документи про впровадження результатів дослідження



ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи
 Максимова Олексія Максимовича
 представленої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю
 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Надана довідка затверджує, що дисертаційне дослідження Максимова О.М. «Підвищення надійності артилерійських систем в умовах динамічних збурень за рахунок удосконалення інформаційного забезпечення АСК» відповідно до планів, затверджених Міністерством освіти і науки України, є складовою частиною держбюджетних НДР за темами: «Розробка моделі та методу математичного забезпечення автоматизованих систем керування, які використовують паливо змінного складу для зменшення енергоємності виробництва», НДР № 206-47, (№ ДР 0122U000566) і «Підвищення ефективності АСК спеціального призначення за рахунок моделювання нелінійних високоенергетичних динамічних процесів» НДР № 224-47, (№ ДР 0122U200907)

Довідка надана у зв'язку з захистом дисертації.

Проректор



Дмитро ДМИТРИШИН

Вик. Брунеткін О.І.
 тел. 705-83-71



ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи
 Максимова Олексія Максимовича
 представленої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю
 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Надана довідка затверджує, що матеріали дисертаційного дослідження Максимова О.М. «Підвищення надійності артилерійських систем в умовах динамічних збурень за рахунок удосконалення інформаційного забезпечення АСК» використовуються Національним університетом «Одеська політехніка» при підготовці бакалаврів та магістрів за напрямом «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» в Інституті штучного інтелекту та робототехніки (ІШІР) на кафедрі «Програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій» при викладанні наступних дисциплін:

- автоматизація виробничих процесів;
- оптимізація процесів і систем;
- часні системи керування;
- оптимальні та адаптивні системи управління.

Довідка надана у зв'язку з захистом дисертації.

Перший проректор



Сергій НЕСТЕРЕНКО

Вик. Брунеткін О.І.
 тел. 705-83-71

ДОДАТОК Б

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковано основні результати дисертації:

1. Dobrynin Y., Brunetkin O., Maksymov M., & **Maksymov O.** Constructing a method for solving the Riccati equations to describe objects parameters in an analytical form. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Том 3 №4 (105). P. 20–26. (Scopus) <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.205107>

2. Brunetkin O., Beglov K., Brunetkin V., **Maksymov O.**, Maksymova O., Havaliukh O., & Demydenko V. Construction of a method for representing an approximation model of an object as a set of linear differential models. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol 6 №2(108). P. 66–73. (Scopus) <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.220326>

3. Brunetkin O. Maksymov M. Brunetkin V. **Maksymov O.** Dobrynin Y. Kuzmenko V. Gultsov P. Development of the model and the method for determining the influence of the temperature of gunpowder gases in the gun barrel for explaining visualize of free carbon at shot. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Том 4 № 1(112). P. 41–53. (Scopus), <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239150>

4. Dobrynin Ye.V., Boltentkov V.O., Kuzmenko V.V., **Maksymov O.M.** Development of a universal binary classifier of the state of artillery barrels by the physical fields of shots. *Applied Aspects of Information Technology*. 2022. Vol.5 №4. P. 289–302. <https://doi.org/10.15276/aait.05.2022.19> (категорія Б)

5. Maksymov M. V, Boltentkov V. O., Gultsov P. S., **Maksymov O. M.** “Verification of artillery fire under the influence of random disturbances for the computer game ARMA 3”. *Applied Aspects of Information Technology*. 2023. Vol.6 No.4: P. 362–375. <https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.24>(категорія Б)

6. Maksymova O.B., Boltentkov V.O., Maksymov M. V., Gultsov P.S. **Maksymov O.M.** Development and Optimization of Simulation Models and Methods for Controlling Virtual Artillery Units in Game Scenarios. *Herald of Advanced*

Information Technology. 2023. Vol.6. No.4. p. 320–337. DOI: <https://doi.org/10.15276/hait.06.2023.21>. (категорія Б)

7. Maksymova O., Boltyonkov V., Gultsov P., **Maksymov O.** Improvement of the model and method of artillery installation target damage control with minimal combat capability loss. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*. Issue 2(68). Dec. 2023. P. 98–115. DOI: <https://doi.org/10.15276/opu.2.68.2023.1> (категорія Б)

8. Максимов М.В., Гульцов П.С., Болтъонков В.О., & **Максимов О.М.** Метод верифікації артилерійського вистрілу під час впливу випадкових збурень. *Морська безпека*. 2024, №1. С. 36-49. <https://doi.org/10.32782/msd/2024.1/05> (категорія Б)

9. **Maksymov O.**, Toshev O., Demydenko V., & Maksymov M. Simulation modeling of artillery operations in computer games: approach based on Markov processes. *Technology Audit and Production Reserves*. 2024. №5/2(79). P. 23-28. <https://journals.uran.ua/tarp/article/view/312873> (категорія Б)

10. Спосіб визначення зношення дула і зарядної камери артилерійської гармати: пат. України на винахід № 126356; заявл. 13.08.2020; опубл. 21.09.2022, Бюл. № 38. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1706588>

11. Спосіб визначення координати зустрічі артилерійського снаряда з поверхнею: пат. України на винахід № 127193; заявл. 20.11.20 ; опубл. 31.05.2023. Бюл. №22. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1739129>

12. Спосіб визначення енергетичної ефективності артилерійської гармати: пат. України на винахід. № 128164; заявл. 05.04.21; опубл. 24.04.24, Бюл. № 17. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1796619>

13. Спосіб визначення кількості послідовного пуску ракет пусковою установкою для знищення морської цілі: пат. України на на корисну модель № 155594; заявл. 02.10.2023; опубл. 13.03.2024. Бюл. №11. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1788150>

Опубліковані праці апробаційного характеру:

14. Tarakhtiy O. S., Gultsov P. S., **Maksimov O. M.** Modeling the formation of muzzle blast as a diagnostic sign of the state of the shot. *Science and society: modern trends in a changing world*: Proceedings of the 2nd International scientific and practical conference. MDPC Publishing. Vienna, Austria. 2024. P. 21-27. <https://sci-conf.com.ua/ii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-science-and-society-modern-trends-in-a-changing-world-22-24-01-2024-viden-avstriya-arhiv>

15. Тарахтій О. С., Гульцов П. С., **Максимов О. М.** Удосконалення моделі керування бойовою здатністю артилерійської гармати. *Topical aspects of modern scientific research*: proceedings of the 5th International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. 2024. P. 256-261. URL: <https://sci-conf.com.ua/v-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-topical-aspects-of-modern-scientific-research-25-27-01-2024-tokio-yaponiya-arhiv>

16. Тарахтій О.С., Гульцов П. С., **Максимов О. М.** Удосконалення методу керування бойовою здатністю артилерійської гармати. *European congress of scientific achievements*: proceedings of the 1st International scientific and practical conference. Barca Academy Publishing. Barcelona, Spain. 2024. P. 120-125. <https://sci-conf.com.ua/i-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-european-congress-of-scientific-achievements-29-31-01-2024-barselona-ispaniya-arhiv>

17. Тарахтій О. С., Гульцов П. С., **Максимов О. М.** Метод параболічної апроксимації визначення координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею. *Modern problems of science, education and society*: proceedings of the 12th International scientific and practical conference. SPC “Sci-conf.com.ua”. Kyiv, Ukraine. 2024. P. 21-27. <https://sci-conf.com.ua/xii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-modern-problems-of-science-education-and-society-5-7-02-2024-kiyiv-ukrayina-arhiv>