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

Кваліфікаційна наукова
робота на правах рукопису

ДЕМИДЕНКО ВОЛОДИМИР ЕДУАРДОВИЧ

УДК 681.5;358.1

ДИСЕРТАЦІЯ

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ПОСТРІЛУ ГАРМАТИ ТА МЕТОДИ ВЕРИФІКАЦІЇ ЙОГО ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ В КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІЙ СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ

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

В. Е. Демиденко

Науковий керівник Максимов М.В. доктор технічних наук, професор

Одеса – 2024

АНОТАЦІЯ

Демиденко В.Е. Імітаційна модель пострілу гармати та методи верифікації його життєвого циклу в комп'ютерно-інтегрованій системі управління. – 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, 2024.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню ефективності та зменшенню часу виконання бойової роботи КІСУ практичними стрільбами гарматою при виникненні різних збурень засобом удосконалення імітаційної моделі пострілу і методів верифікації ланок ланцюга станів життєвого циклу кожного артилерійського пострілу, які утворюють зворотний зв'язок. З цією метою необхідно розробити спосіб верифікації складу піротехнічної суміші методом бібліотеки шляхом удосконалення моделі рівноважної термодеструкції за температурою суміші інертного та порохових газів. Є потреба удосконалити методи й способи автоматизованого керування стрільбою причіпних артилерійських установок за рахунок використання моделей стохастичних процесів, на основі яких розробити зразки бойової роботи окремих самохідних артилерійських систем для забезпечення верифікації ефективного пострілу. Розробити модель і метод пошуку заданої кількості вимірювачів серед безлічі можливих по лінії стрільби, які б забезпечили ефективну реєстрацію балістичної і дульної хвиль для системи верифікації пострілів.

У першому розділі «Інформаційна локалізація та верифікація станів пострілу артилерійської гармати» одержано такі результати.

– Проведено аналіз методів і способів верифікації ланок ланцюга станів «заряд – зарядна камора – ствол – траєкторія снаряда – ціль» життєвого циклу окремого артилерійського пострілу, який констатував функціонування лише

окремих ланок. По-перше, існують моделі і методи автоматизованого діагностування стволів гармат за рівнем зношеності на основі поточного аналізу та класифікації акустичних полів у вигляді дульної і балістичної хвиль пострілів під час бойової роботи для підвищення достовірності оцінювання початкової швидкості снаряда та зменшення часу діагностування стану артилерийського ствола. По-друге, відомі модель і метод автоматизованої параметричної діагностики технічного стану пострілу на основі ідентифікації незалежних параметрів при розширенні порохових газів та догоранні вільного вуглецю в атмосфері під час пострілів. По-третє, існує метод відстеження рухомого артилерійського снаряда під час дії на нього збурень на основі реєстрації балістичної та дульної хвиль на відстані, що фіксує дальність його переміщення. Такий метод дозволив здійснити верифікацію стану пострілу артилерійської гармати і визначити точку зіткнення снаряда з поверхнею на основі параболічної апроксимаційної моделі його динамічних характеристик.

– Показано, що для верифікації ланцюга станів життєвого циклу окремого артилерійського пострілу для ланки «заряд» необхідно розробити метод і модель верифікації складу піротехнічної суміші заряду на основі рівноважної термодеструкції за вимірюванням температури суміші утворених інертного та порохових газів. Додатково доведено, що для ланки «траєкторія снаряда» шляхом удосконалення методу і моделі автоматизованого керування бойовою роботою причіпних артилерійських установок необхідно знайти мінімальний межовий час і на цій основі розробити моделі бойової роботи окремих самохідних артилерійських систем для забезпечення верифікації ефективного пострілу. Для ланок «траєкторія снаряда» і «ціль» розробити моделі і метод пошуку заданої кількості вимірювачів серед безлічі можливих по лінії стрільби, які б забезпечили реєстрацію балістичної і дульної хвиль для побудови системи верифікації пострілів і розрахунку координати зіткнення снаряда з поверхнею.

– Обґрунтовано структуру дослідження і поставлено завдання, яке полягає у підвищенні ефективності виконання завдань під час практичних стрільб гарматою.

Дослідження має враховувати вплив різних зовнішніх збурень на процес стрільби. Необхідно удосконалити метод управління для здіснення єфективного пострілу в реальних умовах засобом забезпечення зворотного зв’язку між способами верифікації кожної ланки життєвого циклу поточного пострілу.

У другому розділі «Методи верифікації складу та енергетичної характеристики піротехнічної суміші методом бібліотеки» розроблено та досліджено методи підвищення ефективності стрільби на підставі удосконалення моделі рівноважної термодеструкції нітроцелюлозного пороху за температурою суміші інертного та порохових газів у бакові фіксованого об’єму. Маємо такі результати.

– Визначено неможливість опису явища утворення сажі у використанні наявних моделей внутрішньої балістики. До складу порохових газів входять CO, CO_2, H_2, H_2O та вільний C, що не відповідає ні основному, ні модифікованому правилу Кістяковського-Вілсона. Аналіз літературних джерел підтвердив, що на склад порохових газів, крім хімічного чинника у вигляді від’ємного кисневого балансу, впливають і фізичні параметри пострілу. У лабораторних умовах не вдається відтворити параметри, які відповідають термодинамічній стадії пострілу. Не виявлено умов забезпечення відповідності результатів експериментальних досліджень параметрам процесу пострілу.

– Запропоновано модифіковану імітаційну модель рівноважної термодеструкції порохової суміші. Для визначення рівноважного складу продуктів горіння, що містять газоподібну та конденсовану фази, використано їх мольні частки. На основі констант хімічної рівноваги парціальних тисків для порохового газу визначено константи його мольних часток.

– Розроблено модель визначення температури суміші інертного та порохових газів у бакові фіксованого об’єму, що дозволяє при спалюванні пороху заданого складу забезпечити зміну температури порохових газів спалюванням проб різної маси та змішуванням з інертним газом постійного об'єму. Інертний газ забезпечує

відсутність допалювання порохових газів при негативному кисневому балансі порохової суміші, через це суттєво не змінюється склад порохових газів.

– Запропоновано метод заповнення бібліотеки розв'язком прямої задачі у вигляді тривимірного масиву. Основою цього масиву є кисневий баланс, який досягається під час термодеструкції вуглицево-водневої сполуки, яка містить кисень. Цей баланс використовується як параметр для вибору, необхідний для розв'язання зворотної задачі про наявний склад сполуки. Щоб розв'язати таку задачу, необхідно перетворити вихідні дані в число-згортку. Таке числове значення утворюється на основі позиційного принципу запису десяткових чисел. Розв'язання задачі з даних, які отримано за рахунок аналізу сформованого тривимірного масиву, відбувається через застосування обмежень. Обмеження дозволяють послідовно цикл за циклом зменшувати ділянки збігу даних.

– Проведено верифікацію та валідацію методу розрахунку складу порохових газів для заповнення бібліотеки. Показано збіг результатів розрахунків із даними для газоподібних продуктів горіння. Відтворено чутливість визначення кількісного складу та температури продуктів згорання при виборі їх компонування, що відрізняється від дійсного. Таким чином для реалізації завдання верифікації ланцюга станів життєвого циклу окремого артилерійського пострілу для ланки «заряд» продемонстровано адекватний характер відображення зміни кількості газоподібної та конденсованої фаз при зміні температури та збігові кількісних характеристик у реперних точках.

У третьому розділі «Удосконалені модель і метод автоматизованого керування бойовою роботою артилерійського підрозділу» розглянуто причіпні й окремі самохідні артилерійські системи під час верифікації пострілу та одержано такі результати.

– Розроблено стохастичну імітаційну модель бойової роботи причіпних артилерійських установок, що дозволило врахувати випадковий характер таких параметрів, як швидкість снаряда, час на перезарядку, ймовірність виявлення

супротивником, та інтегрувати в модель такі зовнішні збурення, як погодні умови та технічний стан артилерійських установок перед пострілом.

– Проведено моделювання за умов зміни вогневих позицій причіпних артилерійських установок, що дозволило врахувати час на транспортування до бойової позиції, можливі втрати боєздатності під час руху та ризик виявлення та атаки з боку супротивника під час транспортування до бойової позиції. Розроблено алгоритми для визначення оптимальних стратегій зміни вогневих позицій.

– Розроблено моделі бойової роботи окремої самохідної артилерійської системи нового покоління на базі зразка причіпної артилерійської системи. Для цього розроблено методику динамічного оцінювання поточного стану боєздатності окремої самохідної артилерійської системи. Розроблено дерево станів боєздатності окремої одиниці та виявлено рівень залежності кількості пострілів самохідної артилерійської системи, необхідних для ураження цілі підвищеної небезпеки впродовж заданого інтервалу часу.

– Удосконалено імітаційну модель пострілу та метод ефективного керування станами бойової роботи причіпної артилерійської гармати за наявності зовнішніх динамічних збурень, які залежать від часу здійснення пострілів під час зміни вогневої позиції, що дало можливість визначити час виконання бойового завдання окремих самохідних артилерійських систем при втраті боєздатності тільки за рахунок внутрішніх динамічних збурень при використанні запропонованої чотирикомпонентної моделі керування бойовими діями окремої самохідної артилерійської системи без зміни вогневої позиції, що дозволило провести верифікацію ланки траєкторії в ланцюгу станів життєвого циклу артилерійського пострілу.

У четвертому розділі «Метод визначення трьох акустичних сенсорів для реєстрації балістичної хвилі артилерійського пострілу» для забезпечення найбільш ефективної реєстрації балістичної і дульної хвиль при побудові системи верифікації пострілів отримано такі результати.

– Розроблено узагальнену структуру сенсорної системи, що дозволяє здійснювати реєстрацію балістичних хвиль та подальшу параболічну апроксимацію для верифікації артилерійських пострілів в умовах дії випадкових збурень у зоні ведення стрільби.

– Розроблено та досліджено метод визначення трьох акустичних сенсорів для найбільш ефективної реєстрації балістичної та дульної хвиль артилерійського пострілу. Запропонований метод дозволяє виконати завдання вибору трьох акустичних вимірювачів з безлічі наявних у зоні ведення стрільби, які дають змогу здійснювати найбільш ефективну реєстрацію балістичної та дульної хвиль пострілу з урахуванням їх розташування по відношенню до лінії напрямку стрільби, похибки вимірювання та ймовірності безперебійної роботи.

– Для оцінювання акустичних сенсорів у представленому методі розроблено та досліджено нечітко-логічну модель, яка дозволяє розраховувати критерій придатності сенсорів з належним урахуванням поточних значень їх параметрів для ефективної верифікації артилерійського пострілу.

– Для дослідження ефективності запропонованого методу та нечітко-логічної моделі проведено обчислювальні експерименти на прикладах артилерійських пострілів з різними параметрами. В дослідженні було виділено по три акустичні сенсори, які забезпечували найбільш точну реєстрацію балістичної та дульної хвиль поточного пострілу, що підтверджує ефективність розроблених методу та моделі, а також доцільність їх застосування для визначення сенсорів з метою подальшої реалізації верифікації артилерійського пострілу з випадковими збуреннями для визначення координати зіткнення снаряда з поверхнею.

Вперше запропоновано метод пошуку трьох вимірювачів серед безлічі наявних, розташованих по лінії стрільби, для найбільш ефективного відстежування артилерійського пострілу з подальшою можливістю верифікації ланки точки зіткнення снаряда з поверхнею в ланцюгу станів життєвого циклу артилерійського пострілу на основі параболічної апроксимації характеристик траєкторії, по якій рухається снаряд, що забезпечило комп’ютерно-інтегровану систему управління

гарматою сенсорною системою для компенсації випадкових збурень, які діють на снаряд під час пострілу.

Отже, отримані в розділах наукові результати в сукупності дозволили досягнути поставленої мети дисертаційного дослідження.

Ключові слова: снаряд, технічний стан, метод визначення координат, стратегія, математична модель, комп'ютерна система автоматизації, теорія ігор, моделювання, точність, неруйнівний контроль, автоматизована система керування, верифікація, апроксимаційна модель, життєвий цикл.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні результати дисертації:

1. Brunetkin, O., Maksymov, M., Dobrynin, Y., Demydenko, V., Sidelnykov, O. *Development of a process model for determining the composition and energy characteristics of a pyrotechnic mixture using the library method*. EUREKA: Physics and Engineering. 2024. №5, P.99-112. Indexed in SCOPUS, https://doi.org/10.21303/2461-4262.2024.003453

2. Boltenkov V, Brunetkin O, 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*. 2021. Vol 6. № 3 (114). P. 6-7. Indexed in SCOPUS, doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245854.

3. 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. Indexed in SCOPUS, DOI: 10.15587/1729-4061.2020.220326

4. Демиденко В.Е., Реценко С.С., Максимов М.М. Метод визначення трьох акустичних сенсорів для реєстрації балістичної хвилі артилерійського пострілу.

Електротехнічні та комп'ютерні системи. 2024. №41(117). с.43- 52. https://doi.org/10.15276/eltecs.41.117.2024.5

5. Бутенко О.В., Максимов М.В., Демиденко В.Е., Брунеткін О.І. Метод пошуку розв'язання складної задачі інтерпретації для розв'язання зворотної задачі з визначення складу пального. *Суднові енергетичні установки*. Науково-технічний збірник. Одеса. 2019. №39. С. 30–42. http://seu.onma.edu.ua/wp-content/uploads/2020/09/2019_39.pdf

6. Максимов М. В., Демиденко В. Е., Бутенко О. В., Брунеткін О. І. Модель піролізу органічних речовин змінного складу. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2020. №3. С. 12-24. DOI: 10.20998/2078-5364.2020.3.02

7. Demydenko V.E., Maksymov M.V.., Boltenkov 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.

8. 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

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

10. Спосіб визначення координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею : пат. України № 127193; заявл. 20.11.20 ; опубл. 31.05.2023. Бюл. №22.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

11. Демиденко В.Е., Максимов М.В., Болтьонков В.О. Автоматична класифікація артилерійських стволів за рівнем зношеності на підставі акустичних сигнатур пострілів. *Problems of Emergency Situations*: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. – Харків: Національний університет цивільного захисту України. 2021. С. 35-36.

12. Бутенко А.В., Демиденко В.Е., Максимов М.М., Максимова О.Б. Разработка метода определения целевой функции оптимизации энергетической установки. *Modern scientific challenges and trends*: a collection scientific works of the International scientific conference., Warsaw, Poland, 20th October, 2018. Warsaw. 2018. Issue. 9. P.128-133.

13. Бутенко А.В., Демиденко Э.В., Брунеткин А.И. Метод идентификации состава газообразного горючего. *Сучасні тенденції розвитку науки*: матеріали II міжнародної науково-практичної конференції, 17–18 березня 2018 р. (частина II). Київ. МНЦД. С. 39-40.

14. Бутенко О.В., Демиденко В.Е., Брунеткін О.І Метод ідентифікації складу газоподібного пального. *Перспективні напрямки наукової думки*: матеріали міжнародної науковопрактичної конференції, 18 квітня 2018 р. Том 5. Тернопіль. ГО «Європейська наукова платформа» С. 63-69.

15. Бутенко О.В., Демиденко В.Е., Бондаренко В.В., Брунеткін О.І Модель і метод визначення витрати продуктів згорання газів природного і штучного походження. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП_18_2018)*: матеріали XVIII міжнародної науковотехнічної конференції 8–13 червня 2018 р. Одеса (Затока). С. 56-59.

16. А.В. Бутенко, В.Э. Демиденко, А.И. Брунеткин. Разработка метода моделирования технических систем. *Наука: відкриття і прогрес:* Збірник статей III Міжнародної наукової конференції. Чехія, Карлови Вари, 2018. С. 17-25.

17. Butenko A.V., Demidenko V.E., Maksymova O.B. Development of the control system data ware and software for a heat supply variable structure system. *Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine*: a collection scientific works of the International scientific and practical conference., Wloclawek, Republic of Poland, December 21-22, 2018. Wloclawek. 2018. P.67 – 71.

ABSTRACT

Demydenko V.E. Simulation model of a gun shot and methods of verification of its life cycle in a computer-integrated control system. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 151 – Automation and computer-integrated technologies. – National University "Odesa Polytechnic" of Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2024.

The dissertation work is devoted to increasing the efficiency and reducing the time of combat work of the CICS by practical gun firing in the event of various disturbances due to the improvement of the simulation model of the shot and methods of verification of the links of the chain of states of the life cycle of each artillery shot, which form feedback. To do this, it is necessary to develop a method of verifying the composition of the pyrotechnic mixture using the library method based on the improvement of the equilibrium thermal destruction model by the temperature of the mixture of inert and powder gases. To improve the methods and models for the automated firing control of towed artillery installations due to the use of models of stochastic processes, on the basis of which to develop models of the combat operation of individual self-propelled artillery systems to ensure the verification of an effective shot. Develop a model and method of finding a given number of meters among the existing set along the firing line, which would ensure effective registration of ballistic and muzzle waves for the shot verification system.

The following results were obtained in the first chapter "Information localization and verification of artillery gun firing states".

– An analysis of the methods and approaches of verification of the links of the chain of states "charge - charging chamber - barrel - projectile trajectory - target" of the life cycle of a separate artillery shot was carried out, which proved the existence of only certain links. First, there are models and methods of automated diagnosis of gun barrels according to the level of wear based on the current analysis and classification of acoustic fields, in the form of muzzle and ballistic waves, shots during combat work to increase

the reliability of estimating the initial speed of the projectile and reduce the time of diagnosing the state of the artillery barrel. Secondly, the model and method of automated parametric diagnostics of the technical condition of a shot based on the identification of independent parameters, during the expansion of powder gases and the afterburning of free carbon in the atmosphere during shots, are known. Thirdly, there is a method of tracking a moving artillery projectile when it is subjected to disturbances based on the registration of ballistic and muzzle waves at a distance formed over the range of its movement. This method made it possible to verify the firing state of an artillery gun and determine the point of contact of the projectile with the surface based on the parabolic approximation model of its dynamic characteristics.

– It is shown that in order to verify the chain of states of the life cycle of an individual artillery shot for the "charge" link, it is necessary to develop a method and model for verifying the composition of the pyrotechnic mixture of the charge based on the model of equilibrium thermal destruction by measuring the temperature of the mixture of inert and powder gases formed. In addition, it is shown that for the "projectile trajectory" link, it is necessary to find the minimum time limit through the improvement of the method and model for the automated combat operation of towed artillery installations, on the basis of which to develop models of the combat operation of individual self-propelled artillery systems to ensure the verification of an effective shot. For the "projectile trajectory" and "target" links, develop a model and method for finding a given number of meters among the existing set along the firing line, which would ensure the registration of ballistic and muzzle waves for building a shot verification system and calculating the coordinates of the meeting of the projectile with the surface.

– The structure of the research is substantiated and the task is set, which consists in increasing the efficiency of the performance of tasks during practical shooting with a cannon. The study should take into account the influence of various external disturbances on the firing process. It is necessary to improve the control method to achieve an effective shot in real conditions by providing feedback from the verification methods of each link of the life cycle of the current shot.

In the second chapter "Methods for verifying the composition and energy characteristics of a pyrotechnic mixture using the library method", methods of increasing firing efficiency were developed and investigated based on the improvement of the model of equilibrium thermal destruction of nitrocellulose gunpowder based on the temperature of the mixture of inert and powder gases in a tank of fixed volume, where the following results were obtained.

– The impossibility of describing the phenomenon of soot formation using existing models of internal ballistics was determined. The composition of powder gases includes CO, CO_2, H_2, H_2O and free C, which does not correspond to either the basic or the modified Kistiakovsky-Wilson rule. The analysis of literary sources confirmed that the composition of powder gases, in addition to the chemical factor in the form of a negative oxygen balance, is also influenced by the physical parameters of the shot. In laboratory conditions, it is not possible to reproduce the parameters that correspond to the thermodynamic stage of the shot. No conditions were found to ensure that the results of experimental studies correspond to the parameters of the firing process.

– A modified simulation model of equilibrium thermal destruction of a powder mixture is proposed. To determine the equilibrium composition of combustion products containing gaseous and condensed phases, their mole fractions were used. Based on the chemical equilibrium constants of partial pressures for powder gas, the constants of its mole fractions were determined.

– The developed model for determining the temperature of a mixture of inert and powder gases in a tank of a fixed volume allows, when burning powder of a given composition, to provide a change in the temperature of powder gases by burning samples of different masses and mixing with inert gas of a constant volume. The inert gas ensures that there is no afterburning of the powder gases with a negative oxygen balance of the powder mixture and the composition of the powder gases is not distorted.

– A method of filling the library with solutions of a direct problem in the form of a three-dimensional array is proposed. The basis of this array is the oxygen balance, which is achieved during thermal destruction of a carbon-hydrogen compound that contains

oxygen. This balance is used as a parameter for selection, which is necessary when solving the inverse problem about the presence of the composition of the compound. To solve such a problem, it is necessary to transform the raw data into a convolutional number. Such a numerical value is formed on the basis of the positional principle of writing decimal numbers. The solution of the problem from the data obtained through the analysis of the formed three-dimensional array occurs through the application of constraints. The constraints allow to successively reduce the areas of data overlap cycle by cycle.

– Verification and validation of the method of calculating the composition of powder gases for filling the library was carried out. The coincidence of the calculation results with the data for gaseous combustion products is shown. The sensitivity of determining the quantitative composition and temperature of combustion products when choosing their list, which differs from the actual one, is shown. Thus, to implement the task of verifying the chain of states of the life cycle of an individual artillery shot for the "charge" link, the adequate character of the display of the change in the amount of gaseous and condensed phases with a change in temperature and the coincidence of quantitative characteristics at reference points has been demonstrated.

In the third chapter "Improved model and method of automated control of the combat work of an artillery unit" trailers and separate self-propelled artillery systems during shot verification were considered and the following results were obtained.

– A stochastic simulation model of the combat operation of towed artillery installations was developed, which made it possible to take into account the random nature of parameters such as projectile speed, reloading time, the probability of detection by the enemy, and to integrate into the model external disturbances, such as weather conditions and the technical condition of artillery installations before firing.

– Simulation was carried out under the conditions of changing firing positions of towed artillery installations, which allowed to take into account the time for transportation to the combat position, possible losses of combat capability during movement and the risk of detection and attack by the enemy during transportation to the combat position.

Algorithms have been developed to determine optimal strategies for changing firing positions.

– Models of the combat work of a separate self-propelled artillery system of a new generation based on a model of a towed artillery system have been developed. For this, a technique of dynamic assessment of the current state of combat capability of a separate self-propelled artillery system has been developed. A tree of individual combat capability states was developed and the level of dependence on the number of shots of a self-propelled artillery system necessary to hit a high-danger target during a given time interval was revealed.

– The simulation model of a shot and the method of effective control of combat states of a towed artillery gun in the presence of external dynamic disturbances, which depend on the time of firing when changing the firing position, were further developed, which made it possible to determine the time of execution of the combat task of individual self-propelled artillery systems in the event of loss of combat capability only due to internal dynamic disturbances when using the proposed four-component model of combat control of a separate self-propelled artillery system without changing the firing position, which made it possible to verify the link of the trajectory in the chain of states of the life cycle of an artillery shot.

In the fourth chapter "The method of determining three acoustic sensors for recording the ballistic wave of an artillery shot" to ensure the most effective registration of ballistic and muzzle waves during the construction of a shot verification system, the following results were obtained.

– A generalized structure of the sensor system has been developed, which allows registration of ballistic waves and subsequent parabolic approximation for the verification of artillery shots under the conditions of random disturbances in the firing zone.

– The method of determining three acoustic sensors for the most effective registration of ballistic and muzzle waves of an artillery shot has been developed and researched. The proposed method makes it possible to solve the problem of choosing three acoustic meters from the existing set in the firing zone, which allow for the most effective

registration of ballistic and muzzle waves of a shot, taking into account their location in relation to the line of the firing direction, measurement error, and the probability of trouble-free operation.

– For the assessment of acoustic sensors in the presented method, a fuzzy logical model was developed and researched, which allows to calculate the sensor suitability criterion with due consideration of the current values of their parameters for the effective verification of an artillery shot.

– To investigate the effectiveness of the proposed method and fuzzy logic model, computational experiments were conducted on examples of artillery shots with different parameters. In the study, three acoustic sensors were identified, which provided the most accurate registration of ballistic and muzzle waves of the current shot. Which confirms the effectiveness of the developed method and model, as well as the expediency of their application to determine sensors in order to further implement the verification of an artillery shot with random disturbances to determine the coordinates of the collision of the projectile with the surface.

For the first time, a method of finding three meters among the existing set located along the firing line was proposed for the most effective tracking of an artillery shot, which made it possible to verify the link of the meeting point of the projectile with the surface in the chain of states of the life cycle of an artillery shot based on the parabolic approximation of the characteristics of the trajectory along which the projectile moves, which provided a computer-integrated gun control system with a sensor system to compensate for random disturbances acting on the projectile during a shot.

Thus, the scientific results obtained in the sections together made it possible to achieve the set goal of the dissertation research.

Key words: projectile, technical condition, coordinate determination method, strategy, mathematical model, computer automation system, game theory, simulation, accuracy, non-destructive testing, automated control system, verification, approximation model, life cycle.

LIST OF PUBLICATIONS OF THE ACQUIRER

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Brunetkin, O., Maksymov, M., Dobrynin, Y., Demydenko, V., Sidelnykov, O. *Development of a process model for determining the composition and energy characteristics of a pyrotechnic mixture using the library method*. EUREKA: Physics and Engineering. 2024. №5, P.99-112. Indexed in SCOPUS, https://doi.org/10.21303/2461-4262.2024.003453

2. Boltenkov V, Brunetkin O, 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*. 2021. Vol 6. № 3 (114). P. 6-7. Indexed in SCOPUS, doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245854.

3. 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. Indexed in SCOPUS, DOI: 10.15587/1729-4061.2020.220326

4. Demydenko V.E., Retsenko S.S., Maksimov M.M. The method of determining three acoustic sensors for registering the ballistic wave of an artillery shot. *Electrical and computer systems*. 2024. No. 41(117). pp. 43-52. https://doi.org/10.15276/eltecs.41.117.2024.5

5. Butenko O.V., Maksymov M.V., Demydenko V.E., Brunetkin O.I. A method of finding a solution to a complex problem of interpretation for solving the inverse problem of determining the composition of fuel. *Ship power plants*. Scientific and technical collection. Odesa. 2019. No. 39. P. 30–42. http://seu.onma.edu.ua/wp-content/uploads/2020/09/2019_39.pdf

6. Maksimov M.V., Demydenko V.E., Butenko O.V., Brunetkin O.I. Model of pyrolysis of organic substances of variable composition. *Integrated technologies and energy saving.* 2020. No. 3. P. 12-24. DOI: 10.20998/2078-5364.2020.3.02

7. Demydenko V.E., Maksymov M.V.., Boltenkov 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.

8. 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

9. The method of determining the energy efficiency of an artillery gun: patent of Ukraine for invention. No. 128164; statement 04.05.21; published 04.24.24, Bul. No. 17.

10. The method of determining the coordinates of the meeting of the artillery projectile with the surface: patent of Ukraine No. 127193; statement 20.11.20; published 31.05.2023. Bul. No. 22.

Published works of approbation nature:

11. Demydenko V.E., Maksimov M.V., Boltyonkov V.O. Automatic classification of artillery barrels by level of wear based on acoustic signatures of shots. *Problems of Emergency Situations*: Materials of the International Scientific and Practical Conference. – Kharkiv: National University of Civil Defense of Ukraine. 2021. P. 35-36.

12. Butenko A.V., Demydenko V.E., Maksimov M.M., Maksimova O.B. Development of a method for determining the target function of power plant optimization. *Modern scientific challenges and trends*: a collection of scientific works of the International scientific conference., Warsaw, Poland, 20th October, 2018. Warsaw. 2018. Issue. 9. P.128-133.

13. Butenko A.V., Demydenko V.E., Brunetkin A.I. The method of identifying the composition of gaseous fuel. *Modern trends in the development of science*: materials of

the II international scientific and practical conference, March 17–18, 2018 (part II). Kyiv. MNCD. P. 39-40.

14. Butenko O.V., Demydenko V.E., Brunetkin O.I. The method of identifying the composition of gaseous fuel. *Prospective directions of scientific thought*: materials of the international scientific and practical conference, April 18, 2018. Volume 5. Ternopil. GO "European Scientific Platform", pp. 63-69.

15. Butenko O.V., Demydenko V.E., Bondarenko V.V., Brunetkin O.I. Model and method of determining consumption of combustion products of gases of natural and artificial origin. *Measuring and computing technology in technological processes (MCTTP_18_2018):* materials of the XVIII international scientific and technical conference, June 8–13, 2018, Odesa (Zatoka). P. 56-59.

16. A.V. Butenko, V.E. Demydenko, A.I. Brunetkin. Development of a method of modeling technical systems. *Science: discovery and progress*: Collection of articles of the III International Scientific Conference. Czech Republic, Karlovy Vary, 2018. P. 17-25.

17. Butenko A.V., Demidenko V.E., Maksymova O.B. Development of the control system data ware and software for a heat supply variable structure system. *Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine*: a collection scientific works of the International scientific and practical conference., Wloclawek, Republic of Poland, December 21-22, 2018. Wloclawek. 2018. P. 67-71.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ 22
ВСТУП 23
РОЗДІЛ 1 ІНФОРМАЦІЙНА ЛОКАЛІЗАЦІЯ ТА ВЕРИФІКАЦІЯ СТАНІВ ПОСТРІЛУ АРТИЛЕРІЙСЬКОЇ ГАРМАТИ 31
1.1 Загальні положення 31
1.2 Метод верифікації теплоти вибуху металього заряду 35
1.3 Метод локалізації початкової швидкості снаряда при виникненні акустичних полів пострілу 43
1.4. Метод визначення енергетичної ефективності артилерійської гармати 48
1.5 Метод верифікації координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею 56
1.6. Постановка завдань дослідження 61
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ВЕРИФІКАЦІЇ СКЛАДУ ТА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПІРОТЕХНІЧНОЇ СУМІШІ МЕТОДОМ БІБЛІОТЕКИ 73
2.1 Метод розв'язання задачі інтерпретації через зворотну задачу визначення складу пального. 73
2.1.1 Метод заповнення бібліотеки. 74
2.1.2 Метод пошуку розв'язання зворотної задачі. 78
2.2 Удосконалення моделі рівноважної термодеструкції порохової суміші. 80
2.2.1 Загальні положення зі створення моделі рівноважної термодеструкції НЦ порохів. 80
2.2.2. Модель визначення температури суміші інертного газу та порохових газів у ємності фіксованого обсягу з випадковими збуреннями. 86
2.3. Верифікація та валідація методу розрахунку складу ПГ 94
2.4 Результати верифікації складу та енергетичної характеристики НЦ пороху бібліотеки. 103

РОЗДІЛ 3 УДОСКОНАЛЕНІ МОДЕЛЬ І МЕТОД АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ БОЙОВОЮ РОБОТОЮ АРТИЛЕРІЙСЬКОГО ПІДРОЗДІЛУ. 105
3.1 Імітаційне моделювання артилерійських операцій на основі Марківських процесів. 106
3.2 Метод моделювання артилерійських операцій в реальному часі 111
3.3 Розрахунковий експеримент циклу зміни позицій та оцінювання ризиків. 122
3.4. Метод динамічного оцінювання поточного стану боєздатності окремої самохідної артилерійської системи. 128
РОЗДІЛ 4 МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТРЬОХ АКУСТИЧНИХ СЕНСОРІВ ДЛЯ РЕЄСТРАЦІЇ БАЛІСТИЧНОЇ ХВИЛІ АРТИЛЕРІЙСЬКОГО ПОСТРІЛУ 141
4.1 Особливості побудови сенсорної системи верифікації пострілів у зоні ведення артилерійської стрільби 142
4.2 Розробка методу визначення трьох акустичних сенсорів для реєстрації балістичної хвилі артилерійського пострілу 153
4.3 Розробка нечіткої моделі для розрахунку критерію придатності акустичних сенсорів для реєстрації балістичної та дульної хвиль пострілу 167
4.4 Дослідження ефективності методу визначення трьох акустичних сенсорів для реєстрації балістичної хвилі артилерійського пострілу 178
ВИСНОВКИ 188
ЛІТЕРАТУРА 192
ДОДАТОК А 207
ДОДАТОК Б 210

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АСК– автоматизована система керування

БДФ – блок дефаззифікації

БНЛВ – блок нечіткого логічного виведення

БП – база правил

БПЛА – безпілотний літальний апарат

КІСУ– комп’ютерно-інтегрована система управління

ММ – математичні моделі

МО ЗСУ – Міністерство оборони Збройних Сил України

НДР – науково-дослідна робота

НМОКП– нечітка модель обчислення критерію придатності

НУ– національний університет

НЦ– нітроцелюлоза

НЦП – порох з нітроцелюлози

ПГ – порохові гази

САС – самохідні артилерійські системи

САСНП – самохідну артилерійську систему нового покоління

ВСТУП

Регулярне спостереження за перебігом подій російсько-української війни довело важливість використання артилерії як головного ударного компоненту виконання тактичних завдань [1]. Аналогічного висновку дослідники дійшли в аналізі військових конфліктів в Іраку [2] і Афганістані [3].

Моделі бойової тактики ворогуючих сторін та стрімка динаміка застосування військової сили зумовлюють використання вогневих засобів багатовекторної потужності з системами автоматизованого управління [4]. У зв’язку з істотним зростанням інтенсивності та швидкості використання вогневих засобів у системах управління сучасним військовим технічним забезпеченням спостерігається ефект подолання інформаційних бар’єрів першого й другого рівня, за В. М. Глушковим [5]. Ключовим способом вирішення цієї проблеми є широке впровадження засобів автоматизації з обов’язковим зворотним зв’язком кожного етапу здійснення суттєвого впливу на вогневі засоби.

В аналіз імплементованих у збройних силах України систем автоматизації артилерії [6] залучаються всі етапи управління. Управління складається з розвідки цілей, обробки даних і передавання відомостей у штаби керування вогнем, постійний збір інформації про вогневі засоби, постановку завдань, виклик, коригування та припинення вогню, оцінювання результатів [7, 8].

Найвища ефективність бойового застосування зброї досягається діагностикою артилерійських систем [9]. Сучасні обчислювальні технології надають достовірну інформацію про стан гарматного ствола [10].

В умовах систематичного ускладнення ведення бойових дій особлива увага приділяється моделям та технологіям діагностування стану артилерійських гармат. До наявних сьогодні методів та технологій автоматизованого управління насамперед висуваються вимоги щодо їх дієвості та достовірності, через те що в період бойового застосування артилерії несвоєчасне або помилкове рішення може

призвести не тільки до зниження ймовірності ураження цілі, а й до знищення гармати протиборчою стороною.

Сучасна тактика використання артилерійських підрозділів заснована на системі контрбатарейної боротьби. Для такої тактики є актуальними методи верифікації кожного артилерійського пострілу. Верифікація пострілу підтвердження його ефективності.

Верифікація координат розриву снаряда координатам цілі здійснюється із застосуванням засобів спостереження або систем звукової розвідки. Однак перевагу потрібно віддавати пасивним системам або їх елементам, які найменше виступають демаскуючими факторами і захищені фізичними бар'єрами експлуатації від можливих перешкод і збурень з боку протиборчої сторони.

В такому сенсі при кожному поточному пострілі визначення стану артилерійської системи (за типом заряд–зарядна камора–ствол–ціль) у разі проведення стрільби за обмеженого часу є основою утворення ланцюга станів, над окремими ланками якого проводиться верифікація з метою констатації поточного рівня якості й відповідності заявленим або прийнятим вимогам. Обробка й аналіз загального результату верифікації кожної окремої ланки дає змогу оцінити ефективність поточного пострілу згідно з прийнятими критеріями.

Актуальними є дослідження, які розглядають верифікацію ланки «ствол» з певного ланцюга. Стан ствола визначає бойові якості гармати в цілому. Зношеність каналу ствола загрожує зниженням бойових якостей і ефективності застосування гармати [11]. Зношення розглядають як інтегральний процес, що призводить до зменшення початкової швидкості снаряда і збільшення їх розкидування від пострілу до пострілу як випадкової величини [12].

У деяких літературних джерелах досліджені моделі та методи технічного діагностування стволів артилерійських систем за рівнем зношеності на основі аналізу та класифікації акустичних полів пострілів для підвищення достовірності показників та зменшення часу діагностування [13,14,15].

Також суттєвими є дослідження, які розглядають моделювання ланок «ствол–ціль», поєднаних в ланцюг на основі стохастичного комплектування. Автори [16] роблять обґрунтоване припущення, що атакуюча сторона буде виявлена після першого пострілу, і артилерійський підрозділ може наразитися на небезпеку відповіді протиборчої сторони.

У науковій літературі також відомі модель та метод розподіленого утворення порохових газів по довжині ствола гармати в процесі пострілу та визначення їх температури для виявлення додаткової діагностичної ознаки ефективного пострілу [17, 18]. Крім того, є відомим метод відстеження артилерійського пострілу на основі реєстрації балістичної та дульної хвиль, утворених пострілом, для верифікації стану пострілу артилерійської гармати і визначення точки зіткнення снаряда з поверхнею [19, 20, 21, 22].

У подальшому розглядатимемо життєвий цикл артилерійського пострілу на поточній позиції стрільби, який відповідає ланцюгу «заряд – зарядна камора – ствол – траєкторія – ціль». Життєвий цикл вважатимемо ефективним, якщо на ціль спрямовано заплановану дію згідно з прийнятим критерієм.

Циклічна верифікація життєвого циклу кожного артилерійського пострілу дозволяє своєчасно провести коригувальні та попереджувальні дії для запобігання зменшення ефективності бойової роботи відповідно до прийнятого критерію і, відповідно, компенсувати або звести до мінімуму перешкоди і збурення, що виникли.

Отже, верифікацію життєвого циклу артилерійського пострілу будемо розглядати як головну умову керування вогнем артилерійського підрозділу в автоматизованій системі. Верифікація повинна здійснюватися відповідно до погоджених методів, які переконливо доведуть, що кожна з ланок ланцюга життєвого циклу відповідає вхідним вимогам. Перші напрацювання в цьому напрямку представлено в [23, 24, 25].

Вирішення завдань керування стрільбою через постійну верифікацію кожної ланки ланцюга станів, які додатково утворюють зворотний зв’язок, дозволить управління в реальному часовому діапазоні за умови максимальної ефективності.

Безперечно, дослідження, що удосконалюють КІСУ ураження цілі артилерійським підрозділом за рахунок моделювання й верифікації життєвого циклу пострілу без втрати ефективності, є актуальними.

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

Робота виконана відповідно до плану наукової і науково-технічної діяльності Інституту військово-морських сил НУ «Одеська морська академія» на 2020 рік, затвердженого командувачем ВМС ЗСУ 07.02.20 року, і є складником д/б НДР (реєстр. № 0120ZS002970, шифр «Рапан-Б») та до планів, затверджених Міністерством освіти і науки України, які виконано в Національному університеті «Одеська політехніка»; також розвідка є концептуальною частиною держбюджетної НДР за темою «Підвищення ефективності АСК спеціального призначення за рахунок моделювання нелінійних високоенергетичних динамічних процесів», НДР № 224-47 (№ ДР 0122U200907).

Мета дослідження.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності та зменшення часу виконання бойової роботи КІСУ практичними стрільбами гарматою при виникненні різних збурень засобом удосконалення імітаційної моделі пострілу і методів верифікації ланок ланцюга станів життєвого циклу кожного артилерійського пострілу, які утворюють зворотний зв’язок.

Досягнення мети вдалося завдяки:

– аналізу методів і способів верифікації ланок ланцюга станів «заряд – зарядна камора – ствол – траєкторія – ціль» життєвого циклу окремого артилерійського пострілу та постановки завдань дослідження;

– пошуку методу верифікації складу піротехнічної суміші методом бібліотеки на основі удосконалення моделі рівноважної термодеструкції за температурою суміші інертного та порохових газів;

– удосконаленню методів і моделей автоматизованого керування бойовою роботою причіпних артилерійських установок у разі використання стохастичних процесів, на основі яких розроблено моделі бойової роботи окремих самохідних артилерійських систем для забезпечення верифікації ефективного пострілу;

– розробки моделі і методу пошуку трьох вимірювачів серед існуючої множини по лінії стрільби, які б забезпечили найбільш ефективну реєстрацію балістичної і дульної хвиль для побудови системи верифікації пострілів.

Об'єкт дослідження – процеси верифікації ланок станів в ланцюгу життєвого циклу пострілу КІСУ артилерійською гарматою для забезпечення його ефективності.

Предмет дослідження – імітаційні моделі й методи керування для КІСУ з виконання бойового завдання артилерійською гарматою за наявності перешкод і збурень.

Методи дослідження: енергетичний баланс для створення одновимірної моделі пострілу; визначення через брутто-формулу складу НЦП для виявлення сили пороху в залежності від його складу; метод бібліотеки для розв'язання оберненої і некоректно поставленої задачі дозволило обґрунтувати отримання значення ентальпії порохових газів; методи теорії ймовірностей і математичної статистики під час комп'ютерного моделювання та оцінювання характеристик системи; стохастичне моделювання для розробки ефективного методу керування бойовою роботою гармат; нечітка логіка для моделювання придатності сенсорів при реєстрації пострілів; методи регресивного аналізу; обчислювальні методи лінійної алгебри для розробки засобів верифікації параметрів стану життєвого циклу пострілу в КІСУ гарматою.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Удосконалено метод визначення рівноважного вмісту продуктів горіння пороху постійного складу. Зокрема, у відповідній моделі для газоподібної та конденсованої фаз горіння як спосіб визначення поточної брутто-формули артилерійського пороху використовують їх мольні частки, що утворюються в ємності фіксованого об'єму внаслідок зміни температури порохових газів, що утворились як результат спалювання порцій пороху змінної маси в інертній атмосфері. Це унеможливлює догорання утворених порохових газів при негативному кисневому балансі порохової суміші, що дозволило провести верифікацію складу артилерійських порохових зарядів в будь-якому стані для заповнення бібліотеки засобом чисел–згорток, що складають компонент моделювання зворотного зв’язку в ланцюгу станів життєвого циклу артилерійського пострілу.

2. Виявлено доцільність подальшого удосконалення імітаційної моделі пострілу та методу ефективного керування станами бойової роботи причіпної артилерійської гармати за умов зовнішніх динамічних збурень, що залежать від часу здійснення пострілів при зміні вогневої позиції. Таким чином стало можливим визначення терміну виконання бойового завдання окремих самохідних артилерійських систем за умови втрати боєздатності тільки у разі внутрішніх динамічних збурень під час використання запропонованої чотирикомпонентної моделі керування бойовими діями окремої самохідної артилерійської системи без зміни вогневої позиції, що дозволило провести верифікацію ланки траєкторії в ланцюгу станів життєвого циклу артилерійського пострілу.

3. Вперше запропоновано метод пошуку трьох вимірювачів серед існуючої множини, розташованих по лінії стрільби, для найбільш ефективного відслідковування артилерійського пострілу, що дало можливість верифікації ланки точки зустрічі снаряда з поверхнею в ланцюгу станів життєвого циклу артилерійського пострілу на основі параболічної апроксимації характеристик

траєкторії, по якій рухається снаряд, що забезпечило КІСУ гарматою сенсорною системою для компенсації випадкових збурень, які діють на снаряд при пострілі.

Практичне значення одержаних результатів. Моделі, способи і методи верифікації дали можливість КІСУ гарматою впроваджувати для кожного пострілу ефективний життєвий цикл, якщо на ціль спрямовано заплановану дію згідно з прийнятим критерієм.

Основні положення дисертаційного дослідження впроваджено:

– на національному конкурсі МО ЗСУ «Кращий винахід 2023 року» у сухопутних і десантно-штурмових військах. Патент України на винахід № 127193, «Спосіб визначення координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею».

Особистий внесок здобувача. Наукові результати, викладені в дисертації, одержані автором самостійно. Автору належать основні ідеї в підвищенні ефективності стрільби та зменшенні часу роботи КІСУ гарматою у разі виникнення збурень завдяки удосконаленню імітаційної моделі пострілу і методів верифікації ланок ланцюга станів життєвого циклу кожного пострілу.

У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать:

– в [25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32] – метод визначення рівноважного складу продуктів згорання постійного складу, що містять газоподібну та конденсовану фази, для яких в імітаційній моделі визначення його брутто-формули використовують мольні частки фаз, що утворюються за рахунок зміни температури порохових газів для виявлення складу порохових зарядів при заповненні бібліотеки у вигляді чисел-згорток;

– в [33, 34, 35, 21, 36] – імітаційна модель пострілу та метод ефективного керування станами бойової роботи причіпної артилерійської гармати при зовнішніх динамічних збуреннях, які залежать від часу здійснення пострілів як граничні умови для чотирикомпонентної моделі керування бойовими діями окремої самохідної артилерійської системи без зміни вогневої позиції;

– в [37, 38, 24, 39] – метод пошуку трьох вимірювачів серед існуючої множини, які розташовано по лінії стрільби для найбільш ефективного відслідковування артилерійського пострілу, на основі параболічної апроксимації характеристик траєкторії, по якій рухається снаряд для компенсації випадкових збурень, що діють на снаряд при пострілі.

Апробація результатів роботи.

Результати дисертаційного дослідження доповідалися, обговорювалися й отримали схвалення на: «Problems of Emergency Situations International scientificand practical conference» (Kharkiv, 2021); National University of Civil Defense of Ukraine, «Modern scientific challenges and trends: IX International Scientific Conference» (Warsaw, 2018); Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine: a collection of scientific works of the International scientific and practical conference, Republic of Poland, (Wloclawek 2018); II international scientific and practical conference «Modern trends in the development of science», (Kyiv 2018); International scientific and practical conference «Promising directions of scientific thought», (Ternopil, 2018); XVIII international scientific and technical conference «Measuring and computing equipment in technological processes» (Odesa, 2018); III International scientific conference. Science: discoveries and progress: Czech Republic, (Karlovy Vary, 2018).

Публікації. Результати наукових досягнень викладено в 17 друкованих працях, зокрема 8 у спеціалізованих наукових виданнях (3 публікації індексуються у міжнародній науково-метричній базі SCOPUS, 2 патенти України на винахід), 7 доповідей і тез на міжнародних конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел, що містить 178 позицій. Загальний обсяг дисертації становить 213 сторінки (з них 178 основного тексту), 39 рисунків, 25 таблиця та 2 додатки.

РОЗДІЛ 1

ІНФОРМАЦІЙНА ЛОКАЛІЗАЦІЯ ТА ВЕРИФІКАЦІЯ СТАНІВ ПОСТРІЛУ АРТИЛЕРІЙСЬКОЇ ГАРМАТИ

1.1 Загальні положення

Існує безліч методів і моделей інформаційної локалізації та верифікації станів складників пострілу артилерійської гармати на основі стохастичних підходів вимірювання. Процес пострілу представляє собою орієнтований граф при послідовному переході декількох станів, в яких перебуває артилерійський снаряд. Перехід з одного стану в інший за досить високого рівня ймовірності підтримки поточних характеристик і властивостей дозволяє керувати вогнем артилерійської гармати шляхом стрімкого виявлення у пострілі гармати одного, кількох або всіх відхилень. А саме якість заряду, рівень зношеності зарядної камори та ствола, відхилення маси снаряда впливають на початкову його швидкість. Крім того, зміна метеоданих і неможливість фіксування розриву снаряда можуть призвести до такого граничного стану, який поставить під загрозу подальшу стрільбу на ураження цілі. Тому в сучасних автоматизованих системах керування вогнем артилерії в розрахунковому циклі, який оснащений таймером, розглядається система «заряд – зарядна камора – ствол – снаряд – траєкторія снаряда – зіткнення з поверхнею», яка робить можливим проводити верифікацію кожного пострілу і водночас розділяти їх відповідно на ефективні і неефективні, та зрештою вводити коригувальні дії на наступний постріл. Матеріали з відкритих джерел доводять, що такі методи керування скорочують час виконання вогневого завдання за рахунок уникнення зворотного зв'язку між послідовними пострілами [16, 20, 40- 49].

Показано, що під час стрільби з керуванням станами засобом верифікації значення узагальненого критерію ефективності майже в 5 разів вище, ніж під час класичної стрільби з пристрілюванням [16, 20, 40-49].

Показовим підтвердженням правильності обраного шляху побудови систем керування стрільбою артилерійської гармати на основі стохастичних підходів є можливість створення інформаційно-вимірювальної системи, яка враховує геронтологію (старіння) порохів. Прикладом такої системи, заснованої на томографічних вимірах на всіх етапів життєвого циклу боєприпасу, є система, яку наведено в [50]. Особливістю експлуатації артилерійських боєприпасів є значний термін зберігання, протягом якого спостерігається зміна фізико-хімічних властивостей вибухових речовин [51-53]. Пропонується за боєприпасом закріпити електронний паспорт, який оформляється на етапі виробництва, а потім підтримується впродовж його технічної експлуатації в арсеналі аж до підприємств утилізації артилерійських боєприпасів [50]. Даний висновок було зроблено з розглянутої класифікації основних причин анормальної дії кондиційних боєприпасів.

Така інформаційна система виявляє дефекти виробництва і геронтологічні зміни в артилерійських боєприпасах засобом томографічних вимірювань. За результатами вимірювань здійснюється облік причинно-наслідкових зв’язків анормальної дії боєприпасів внаслідок зміни фізико-хімічних властивостей розривного й метального заряду. Відстежуються зміни балістичних властивостей пороху, які зумовлюють зростання опору, що виникає в розривному заряді. Прогнозується виникнення додаткових обсягів газоповітряних порожнин, що призводять до перегріву розривного заряду за рахунок стиснення порохового газу і повітря, що скупчилися в них. Така система може бути застосована за мирного часу. За умов тривалих військових дій у разі постачання порохів різних виробників практично неможлива реалізація запропонованого електронного паспорта. Але, безперечно, гентерологічний складник є одним із основних, що формує ефективність пострілу, тому в подальшому вважаємо за необхідне розглянути методи верифікації порохів, які, в першу чергу, вичерпали термін гарантованого зберігання.

Наступним важливим станом системи, який необхідно постійно верифікувати, є початкова швидкість, яку снаряд має при виході з каналу ствола гармати. Значна кількість досліджень довела, що ця швидкість є головною діагностичною ознакою ефективності пострілу і, крім того, є головною ознакою стану системи, насамперед ланки «заряд – зарядна камора – ствол – снаряд». Для такої верифікації широко поширюються інформаційні технології з технічного діагностування артилерійських стволів на базі отримання інформації через фото- або відеозйомку рухомого снаряда. Окремо функціонують радіолокаційні системи на базі допплерівських радарів.

Інформаційну технологію виявлення швидкості фотоелектричним способом представлено в [48]. Вона являє собою інформаційну технологію вимірювання параметрів снаряда, що летить балістичною траєкторією. Подальший розвиток і вдосконалення такої технології пов’язано з підвищенням точності вимірювання параметрів снаряда, що рухається вільною траєкторією.

Результати експерименту показують, що системи з фотоелектричним виявленням можуть визначати швидкість і координати всіх видів випущених снарядів, і точність вимірювання дуже висока. Але цей спосіб залежний від стану атмосферного повітря. Така інформаційна технологія може бути розширена, якщо датчики фотоелектричного виявлення вийдуть на вищий рівень чутливості [48].

В основу інформаційної технології цифрової обробки зображень покладено визначення осі рухомого снаряда, що забезпечується автоматично за рахунок обчислення за допомогою ЕОМ вектора швидкості снаряда, що летить траєкторією кута атаки артилерійським снарядом [55]. Алгоритми інформаційної технології точно відновлюють форму оболонки снаряда обробкою деяких деталей зображення методом розрахунку центроїда, що дало змогу обчислювати миттєву швидкість снаряда. Результати випробувань показали, що запропонований метод обробки автоматично ідентифікує зображення, яке отримується з високошвидкісної фотозйомки під час артилерійських стрільб навіть за

несприятливих умов спостереження. Пропонований метод центроїдів виявився більш корисним, ніж метод цільового об’єкта. Така інформаційна технологія використовується під час фотометричних випробувань [56].

У статті [57] про оцінку асиметрії і коливального руху з використанням інформаційно-вимірювальної системи стартового відео описується підхід до ідентифікації руху під час польоту снаряда стабілізованим обертанням, викликаним асиметрією маси. Відео польоту було знято після запуску кількох 155-мм артилерійських снарядів M110A2E1. Потім ці відео були проаналізовані з використанням методу автоматичного аналізу на початковій ділянці траєкторії випущеного снаряда для визначення їхнього початкового положення та історії орієнтування в просторі.

Проведено дослідження особливостей радіолокаційного сигналу, отриманих у задачах вимірювання параметрів руху снаряда на початковому етапі пострілу, результати якого дозволили розробити інформативні алгоритми обробки [58]. Розроблено радіолокаційний спосіб вимірювання параметрів руху снаряда на етапі проміжної балістики, що дозволив провести практичні виміри характеристик снарядів з нероздільними та роздільними частинами. Запропоновано радіолокаційні способи вимірювання параметрів руху дульної частини ствола артилерійської системи під час пострілу [58].

В роботі обґрунтовано і розроблено програмно-алгоритмічне забезпечення для вимірювання кінематичних і динамічних характеристик об’єктів, траєкторія яких відрізняється від балістичної траєкторії [59]. Автоматизована система діагностичних ознак дульного викиду запропонована в [60].

Наявна велика кількість досліджень, які не тільки довели, а й узагальнили можливість використання акустичного поля пострілу для обслуговування потреб артилерійських підрозділів [13-15, 61-62].

Систематизуючи проведені дослідження, можна зробити висновок, що реєстрація акустичного поля для потреб артилерійських підрозділів дозволяє

розв’язати два завдання. Перше полягає у виявленні оптично не спостережуваних вогневих позицій гармат, незалежно від видів застосовуваних боєприпасів, за демаскуючою ознакою, якою є звук пострілу, так звані звукові цілі. Це завдання реалізується в процесі стрільби своєї артилерії по незвуковій і оптично неспостережуваній цілях шляхом виявлення за звуком розривів точок падіння снарядів.

Другий напрям використання отриманих значень акустичного поля у вигляді дульної і балістичної хвиль дає можливість розрахувати швидкість снаряда з метою її верифікації. Основні дослідження передбачають пошук місця розташування вимірювальних мікрофонів, необхідних для реєстрації хвиль. Спочатку має реєструватися ударна балістична хвиля. Потім уже в конусі Маха, утвореному балістичною хвилею, повинна бути зареєстрована дульна ударна хвиля, яка ще не перейшла в звукову. Для ефективної експлуатації автоматизованої діагностичної системи необхідно визначити, на якій відстані від гармати по лінії ведення вогню треба розмістити вимірювальні мікрофони. Крім того, за відомими фізичними моделями відбувається витікання газу з дульного зрізу гармати під час пострілу, внаслідок чого утворюються балістична та дульна хвилі шляхом згорання пороху, що сприяє визначенню дульної енергії. Такий метод дозволить оцінювати параметри балістичної та ударної хвиль.

У подальшому необхідно провести аналіз методів і моделей, які можуть бути використані для проведення верифікації в автоматизованій системі керування артилерійським вогнем в системі станів «заряд – зарядна камора – ствол – снаряд – траєкторія снаряда – зіткнення з поверхнею».

1.2 Метод верифікації теплоти вибуху метального заряду.

У ході подальшого дослідження розглянемо автоматизовану систему для визначення теплоти вибуху метального заряду артилерійського пострілу з метою верифікації його якості, а також метод такого визначення, що представлений на рис. 1.1.

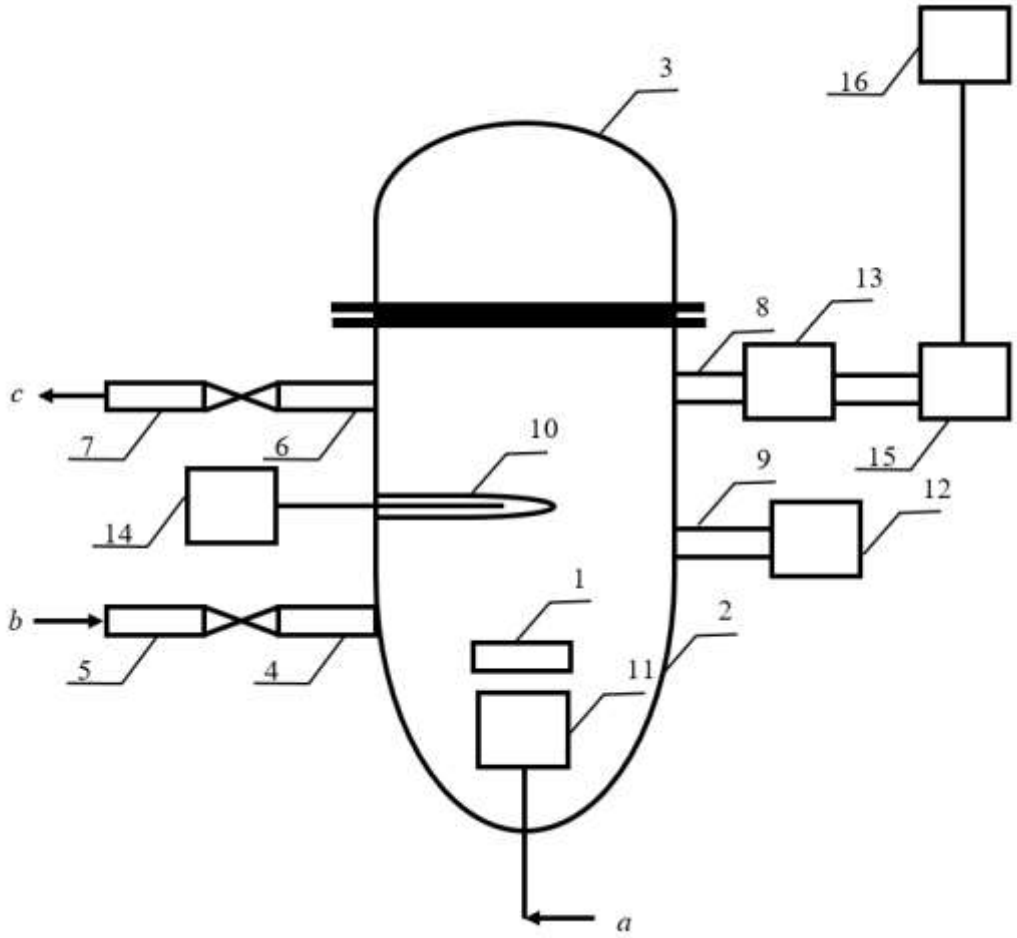

Рис.1.1. Автоматизована система для визначення теплоти вибуху метального заряду артилерійського пострілу для верифікації його якості (розроблено автором)

Автоматизована система для визначення теплоти вибуху метального заряду артилерійського пострілу для верифікації його якості включає циліндричний бак з внутрішньою теплоізольованою поверхнею для спалювання проби ментального заряду і збору утворених порохових газових продуктів (2), на верхній частині якого встановлена герметична фланцева кришка з внутрішньою теплоізольованою поверхнею (3). Всередині циліндричного бака (2), в нижній його частині, установлено електропідпалювач(1)1, в середній частині на боковій стінці закріплена гільза (10) для термопари з пристроєм, який показує значення температури (14).

В боковій стінці циліндричного бака (2) вмонтовані: вхідний штуцер (4), сполучений з вхідною запірною арматурою продувки інертним газом (5); вихідний штуцер (6), сполучений з вихідною запірною арматурою продувки інертним газом (7); штуцер (9), сполучений з манометром (12); штуцер (8), сполучений з газовим редуктором (13).

Вихід газового редуктора (13) сполучений з входом установки для визначення складу горючого газу в процесі його спалювання (15), вихід якої, у свою чергу, сполучений з персональним комп'ютером з програмним забезпеченням (16).

Для пояснення роботи установки, за допомогою якої здійснюється метод, на рис. 1.1 також позначено: проба метального заряду (1), «a» - лінія подачі напруги, «b» - лінії подачі в циліндричний бак (2) інертного газу та «c» - лінія відведення з циліндричного баку (2) інертного газу.

Установка для визначення складу горючого газу в процесі його спалювання (15) є відомою [63]. Вона містить енергетичний пристрій з пальником, регулювальну арматуру повітря, регулювальну арматуру газу, блок управління, пробірний пристрій, трубопровід відбору повітря, трубопровід відбору газу, регулювальну арматуру повітря, що подається в пробірний пристрій, регулювальну арматуру газу, що подається в пробірний пристрій, витратомір повітря, що надходить в пробірний пристрій, витратомір газу, що надходить в пробірний пристрій, трубопровід подачі горючого газу, трубопровід подачі повітря, датчик витрати повітря і датчик витрати газу, при цьому пальник з'єднаний з трубопроводом подачі горючого газу і трубопроводом подачі повітря. Водночас на трубопроводі подачі горючого газу встановлений датчик витрати і регулювальна арматура газу, а на трубопроводі подачі повітря установлений датчик витрати і регулювальна арматура повітря, трубопровід подачі повітря з'єднаний з трубопроводом відбору повітря, який, у свою чергу, з'єднаний з пробірним пристроєм. На трубопроводі відбору повітря установлені

регулювальна арматура повітря, що подається в пробірний пристрій, і витратомір повітря, трубопровід подачі горючого газу з'єднаний з трубопроводом відбору горючого газу, який з'єднаний з пробірним пристроєм. На трубопроводі відбору горючого газу встановлені регулювальна арматура газу, який подається в пробірний пристрій, блок управління, з'єднаний паралельно з регулювальною арматурою повітря і регулювальною арматурою газу, з датчиком витрати повітря і датчиком витрати горючого газу, з регулювальною арматурою повітря, що подається в пробірний пристрій і витратоміром повітря, що надходить в пробірний пристрій, з витратоміром газу, що надходить в пробірний пристрій і регулювальною арматурою горючого газу, що подається в пробірний пристрій, а також з термопарою, встановленою в камері згорання пробірного пристрою.

Окрім того, пробірний пристрій містить циліндричну камеру згорання, що охоплює коаксіальні циліндри, патрубок подачі горючого газу, в якому установлено засіб для вимірювання температури горючого газу, який подається, патрубок подачі повітря і магістраль підведення повітря в камеру згорання, усередині якої установлена термопара і засіб для вимірювання температури повітря, що надходить, розташований на вході магістралі підведення повітря, при цьому патрубок подачі горючого газу пробірного пристрою з'єднаний з трубопроводом подачі горючого газу, а патрубок подачі повітря пробірного пристрою з'єднаний з трубопроводом подачі повітря установки, а коаксіальні циліндри розташовані таким чином, що між ними утворені зазори, за якими проходить повітря.

Запропонований метод здійснюється в такому порядку. На першому етапі, коли проводять верифікацію пострілів метальних зарядів артилерійських гармат, доставляють певну кількість однакових метальних зарядів, які мають підтвердження з пакувального арсеналу якості теплоти вибуху метального заряду артилерійського пострілу, отриману зі споряджувального заводу. З будь-якого, випадково відібраного з поставленої кількості, беруть пробу метального заряду

(1), яку розміщують в циліндричному баку (2) системи для визначення теплоти вибуху метального заряду артилерійського пострілу для верифікації його якості. Циліндричний бак герметично закривають фланцевою кришкою (3). Далі на другому етапі в регуляторі дроселювання газового редуктора (13) встановлюють показник заданого сталого тиску для дроселювання порохового газу, який буде утворено в циліндричному баку (2).

Третій етап передбачає видалення повітря з циліндричного бака (2) шляхом продування його інертним газом, який подають через вмонтований в його боковій стінці вхідний штуцер (4), сполучений з вхідною запірною арматурою продування інертним газом (5), і відводять гази продування з циліндричного бака (2) через вихідний штуцер (6), сполучений з вихідною запірною арматурою продування інертним газом (7). На четвертому етапі проводять контроль тиску інертного газу в циліндричному баку (2) манометром (12), який сполучений через штуцер (9) з циліндричним баком (2). Після того, як тиск інертного газу в циліндричному баку (2) встановлюються на рівні атмосферного, закривають вхідну (5) та вихідну (7) запірні арматури і подають електричну напругу на електропідпалювач (11) та підпалюють пробу метального заряду (1).

П’ятий етап передбачає утворені порохові гази направити із циліндричного баку (2) через штуцер (8), сполучений з газовим редуктором (13), в установку для визначення складу горючого газу в процесі його спалювання (15). На шостому етапі спалюють пороховий газ в атмосфері повітря в установці для визначення складу горючого газу в процесі його спалювання (15) і визначають поточну брутто-формулу порохового газу проби метального заряду (1).

Отриману брутто-формулу спалюваного порохового газу передають в персональний комп’ютер з програмним забезпеченням на сьомому етапі, безпосередньо вводять значення температури, отримане з термопари пристроєм, який показує значення температури (14) в гільзі (10), що закріплена на стінці циліндричного баку (2). Додатково передають тиск регулятора дроселювання,

який встановлюють на газовому редукторі (13) і задекларовану теплоту вибуху метального заряду (1), яку наведено в підтвердженні з пакувального арсеналу або споряджувального заводу про властивість теплоти вибуху метального заряду артилерійського пострілу.

На восьмому етапі за допомогою персонального комп'ютера з програмним забезпеченням визначають поточну теплоту вибуху проби метального заряду. В результаті порівнюють поточну розраховану теплоту вибуху проби метального заряду (1) із задекларованою за допомогою персонального комп'ютера з програмним забезпеченням і, якщо отримано рівність значень з урахуванням похибок вимірювань та розрахунків, роблять висновок, що отримано результат про позитивно проведену верифікацію властивості теплоти вибуху метального заряду артилерійського пострілу. Інакше роблять висновок, що отримано результат про негативно проведену верифікацію властивості теплоти вибуху метального заряду артилерійського пострілу.

Дані для визначення теплоти вибуху метального заряду артилерійського пострілу для верифікації його якості, наведено в табл. 1.1. У прикладі (1) наведено розрахункові та експериментальні дані щодо застосування системи і способу на майданчику B, на який доставлено комплектовані постріли однакового виду в кількості N елементів з арсеналу WW. Для проведення дослідження випадково вилучали один з доставлених пострілів. З метального заряду вилученого пострілу була відібрана проба (1) для вимірювального експерименту. Пробу (1) було розміщено в циліндричному баку (2) системи для визначення теплоти вибуху метального заряду артилерійського пострілу для верифікації його якості.

Аналогічно в Прикладі 2 наведено розрахункові та експериментальні дані щодо застосування системи і способу на майданчику C, на який доставлено комплектовані постріли однакового виду в кількості M елементів з арсеналу WV. Для проведення дослідження випадково вилучали один з доставлених пострілів. З метального заряду вилученого пострілу була відібрана проба (1) для

вимірювального експерименту. Пробу було розміщено в циліндричному баку (2) системи для визначення теплоти вибуху метального заряду артилерійського пострілу для верифікації його якості. В обох випадках було проведено експеримент і отримано результат.

З наведених даних можна зробити такі висновки. Задекларована теплота вибуху метального заряду артилерійського пострілу в Прикладі 1 складає 950 кДж/кг, а у Прикладі 2 – 945 кДж/кг (див. п. 7 табл. 1.1). Значення загальної відносної похибки вимірювань і розрахунків визначення теплоти вибуху метального заряду артилерійського пострілу для верифікації його якості складає 1,5% (див. п. 6 таблиці 1.1). Визначено брутто-формулу порохового газу, отриманого експериментально в Прикладі 1 - $C_1H_{1,44}N_{0,37}O_{1,57}$, а для Прикладу 2 - $C_1H_{1,43}N_{0,32}O_{1,56}$(див. п. 2 табл. 1.1).

Відповідно до цього розраховано експериментальну теплоту вибуху метального заряду артилерійського пострілу, яка склала для Прикладу 1 - 958 кДж/кг і для Прикладу 2 - 890 кДж/кг (див. п. 7 табл. 1.1). Визначено відносні похибки експериментів, які склали для Прикладу 1 – 0,84% і для Прикладу 2 – 5,82% (див. п. 9 табл. 1.1).

Після проведеного аналізу результатів, отриманих за прикладами табл. 1.1 Прикладу 1 – позитивний, а для Прикладу 2 – негативний.

Таблиця 1.1 − Показники властивостей величин, які отримано під час проведення верифікації теплоти вибуху метального заряду артилерійського пострілу

№	Найменування показника, одиниця виміру	Значення показників в експериментах	
		Приклад № 1	Приклад № 2
1.	Величина тиску порохового газу при дроселюванні, який встановлено на регуляторі газового редуктора, Па	$1{,}1 \cdot 10^5$	$1{,}1 \cdot 10^5$
2.	Брутто-формула порохового газу	$C_1H_{1,44}N_{0,37}O_{1,57}$	$C_1H_{1,43}N_{0,32}O_{1,56}$
3.	Значення температури, яке зафіксовано термопарою, К	2800	2300
4.	Значення тиску в циліндричному баку після утворення порохового газу, Па	$5.1\ 10^5$	$4.8\ 10^5$
5.	Значення загальної відносної похибки вимірювань і розрахунків, %	1,5	1,5
6.	Декларована теплота вибуху метального заряду артилерійського пострілу, кДж/кг	950	945
7.	Розрахована теплота вибуху метального заряду артилерійського пострілу, кДж/кг	958	890
8.	Значення відносної похибки експерименту, %	0,84%	5,82%
9.	Порівняння похибок значень декларованої і розрахункової теплоти вибуху	$0{,}84\% < 1{,}5\%$	$5{,}82\% > 1{,}5\%$
10.	Висновок про співставлення декларованої і розрахункової теплоти вибуху	є рівність в межах похибки експерименту	немає рівності в межах похибки експерименту
11.	Результат верифікації	позитивний	негативний

Джерело: ррозроблено автором

Дані, отримані за прикладами № 1 і №2, підтверджують можливість проведення верифікації метального заряду артилерійського пострілу запропонованими системою та методом і досягнення рекомендованого технічного результату.

1.3 Метод локалізації початкової швидкості снаряда при виникненні акустичних полів пострілу

Існують дослідження в галузі інформаційних технологій, які довели можливість за швидкістю снаряда, який виходить з каналу ствола, проводити автоматизовану діагностику стану системи «ствол–зарядна камора» [13- 15, 61, 62, 64].

Метод пояснюється таким розташуванням обладнання, яке наведено на рис.1.2. На рис.1.2 показано: 1 – гармата, 2 – мікрофон або мікрофони, 3 – вимірювач температури повітря у гарматі, 4 – вимірювач тиску повітря у гарматі, 5 – вимірювач вологості повітря біля гармати,

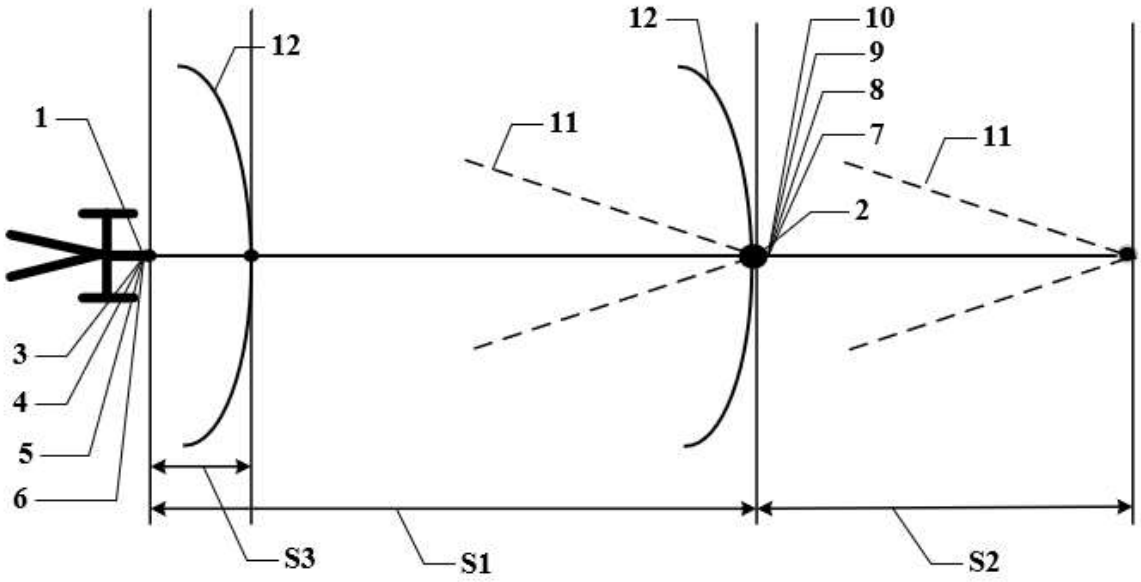

Рис.1.2. Схема розташування гармати і вимірювального обладнання

Джерело: [21]

6 - вимірювач напрямку та швидкості вітру, 7 - вимірювач температури повітря біля мікрофона або мікрофонів (2), 8 - вимірювач тиску повітря біля мікрофона або мікрофонів (2), 9 - вимірювач вологості повітря біля мікрофона або мікрофонів (2), 10 - вимірювач напрямку та швидкості вітру біля мікрофона або мікрофонів (2), 11 - балістична хвиля, 12 - дульна хвиля, S1 - відстань від гармати

до мікрофона або мікрофонів (2) у напрямку стрільби, S2 - відстань від мікрофона або мікрофонів (2) до знаходження балістичної хвилі (11) у напрямку стрільби в момент реєстрації мікрофоном або 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 мікрофоном або мікрофонами (2) на відстані S1.

На рис. 1.3 показано: 13 - момент часу реєстрації дульної хвилі $t_{дул}$., 14 - момент часу реєстрації балістичної хвилі $t_{бал}$., 15 - інтервал часу, зареєстрований мікрофоном або мікрофонами (2) між часом проходженням балістичної $t_{бал}$ і дульної хвиль $t_{дул}$.

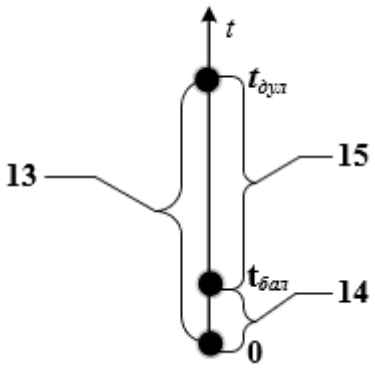

Рис.1.3. Діаграма часу реєстрації хвиль в місці розташування мікрофона.

Джерело: [21]

Рекомендований метод здійснюється в такому порядку.

Крок 1. На вогневу позицію ставлять гармату (1), яку перевіряють, з стволом і зарядною каморою. Зношеність гармати в першому наближенні оцінюють загальною кількістю пострілів з гармати. Потім заряджають певним снарядом і з певним пороховим зарядом.

Крок 2. Розміщують на лінії вогню на відстані 50 ... 500 метрів від гармати (1) мікрофон або мікрофони (2). Мікрофон або мікрофони (2) розташовані по лінії напрямку стрільби при реєстрації балістичної (11) і дульної (12) хвиль. За допомогою вимірювача 3 проводять вимірювання температури повітря, тиск

повітря вимірюють за допомогою вимірювача (4), вологість повітряного середовища вимірюють за допомогою вимірювача (5), напрямок і швидкість вітру біля гармати (1) вимірюють за допомогою вимірювача (6). Проводять вимірювання температури повітря за допомогою вимірювача (7), тиск повітря вимірюють за допомогою вимірювача (8), вологість повітряного середовища вимірюють за допомогою вимірювача (9), а також вимірюють напрямок і швидкість вітру біля мікрофона або мікрофонів (2) за допомогою вимірювача (10), усереднюють виміряні параметри і визначають поправку на швидкість поширення дульної хвилі в навколишньому середовищі за наявних умов. Визначають швидкість дульної хвилі від гармати (1) до мікрофона або мікрофонів (2).

Крок 3. Проводять постріл з гармати (1) за напрямком стрільби.

Крок 4. За допомогою мікрофона або мікрофонів (2) фіксують спочатку балістичну хвилю (11), в цей момент часу $t_{бал}$(14) дульна хвиля (12) знаходиться на відстані S3 від гармати (1), а через час $t_{дул}$(13) мікрофон або мікрофони (2) реєструє/реєструють дульну хвилю (12) від пострілу, в цей час балістична хвиля (11) знаходиться на сумарній відстані S1 і S2 від гармати (1).

Крок 5. За отриманими часовими картинами сигналів визначають амплітуду і тривалість сигналу балістичної хвилі (11) і амплітуду, а також тривалість першого півперіоду дульної хвилі (12) в місці розташування мікрофона або мікрофонів (2) на відстані S1 від гармати (1).

Крок 6. З мікрофона або мікрофонів (2) передають сигнали на аналого-цифровий перетворювач, а потім на комп'ютер, які переводять сигнали в спектральну сферу шляхом обчислення перетворення Фур'є. У спектральній сфері отримують щільність потужності (або просто спектр), яка характеризує розподіл енергії сигналу по різних частотах.

Крок 7. Для отриманих спектрів фіксують ширину на рівні 0,707 для сигналу балістичної хвилі (11) і центральну частоту (частоту максимуму) для дульної хвилі (12).

Крок 8. Визначають час проходження дульної хвилі $t_{дул}$(13) від гармати (1) до мікрофона або мікрофонів (2) за виміряною відстанню від гармати (1) до мікрофона або мікрофонів (2) S1 і обчисленою швидкістю поширення дульної хвилі (12);

Крок 9. Визначають час проходження балістичної хвилі $t_{бал}$(14) від гармати (1) до мікрофона або мікрофонів (2) як різницю часу проходження дульною хвилею $t_{дул}$(13) мікрофона або мікрофонів (2) і часового інтервалу (15) під час реєстрації мікрофоном або мікрофонами (2) проходження дульної хвилі $t_{дул}$(13) від гармати (1) до мікрофона або мікрофонів (2) і реєстрації мікрофоном або мікрофонами (2) проходження балістичної хвилі (11) від носика снаряда, який летить над мікрофоном або мікрофонами (2).

Крок 10. Визначають швидкість балістичної хвилі (11) (вона відповідає реальній швидкості снаряда) за часом $t_{бал}$(14) реєстрації її мікрофоном або мікрофонами (2) на відстані S1 від гармати (1) до мікрофона або мікрофонів (2).

Крок 11. Порівнюють обчислену початкову реальну швидкість снаряда - 558,2 м/с (див. п. 17 табл. 1.2) і розрахункову початкову швидкість снаряда - 560 м/с (див. п. 16 табл. 1.2), і роблять висновок про ступінь зношеності ствола й зарядної камори на підставі зміни швидкості снаряда.

Потім на вогневій позиції з цієї ж гармати (1) роблять другий постріл і проводять усі операції, зазначені вище.

За даними, наведеними з таблиці 1.2, видно, що перша гармата (п. 2 табл. 1.2) не має великої різниці в обчисленій реальній - 558,2 м/с і 556,9 м/с (див. п.17 табл.1.2) і розрахунковій початковій - 560 м/с (див. п. 16 табл.1.2) швидкостях снарядів.

Різниця між розрахунковою початковою швидкістю снаряда і обчисленою реальною початковою швидкістю снаряда становить 0,32% і 0,55%.

Таблиця 1.2 − Показники зношеності ствола та зарядної камори артилерійської гармати

№	Найменування показника, од. виміру	Значення показника гармати			
		Перша		Друга	
1.	Номер експерименту	1	2	3	4
2.	Загальна кількість пострілів з гармати	91		1968	
3.	Номер пострілу з гармати	1	2	1	2
4.	Відстань від гармати до вимірювального мікрофона, м	300			
5.	Таблична дальність стрільби по прицілу, м	9000			
6.	Сумарна поправка на метеоумови, м	-137	-157	-215	-215
7.	Балістичні поправки, м	+12			
8.	Розрахункова дальність стрільби, м	8875	8855	8797	8797
9.	Фактична дальність стрільби, визначена далекоміром, м	9165	9082	8665	8671
10.	Амплітуда балістичної хвилі, Па	380		240	
11.	Тривалість сигналу балістичної хвилі, мс	4,8		4,1	
12.	Амплітуда дульної хвилі, Па	140		90	
13.	Тривалість першого півперіоду дульної хвилі, мс	22		14	
14.	Ширина спектру на рівні 0,707 сигналу балістичної хвилі, Гц	180		250	
15.	Центральна частота (частота максимуму) спектру сигналу дульної хвилі, Гц	12		16	
16.	Розрахункова початкова швидкість снаряда, м/с	560			
17.	Обчислена реальна початкова швидкість снаряда, м/с	558,2	556,9	504,2	504,5

Джерело: [21]

Зношеність першої гармати незначна (табл. 1.2), оскільки різниця між розрахунковою початковою швидкістю снаряда і обчисленою реальною початковою швидкістю не знаходиться в межах 8-10%.

У подальшому на вогневу позицію ставлять другу гармату і проводять усі перераховані вище операції. Отримані дані заносять в таблицю. Для другої гармати (табл. 1.2) обчислені реальні швидкості снарядів становлять 504,2 м/с і 504,5 м/с, а розрахункова початкова швидкість снаряда - 560 м/с, що становить 9,96% і 9,91%.

Отже, в результаті виконання зазначених послідовних операцій для двох гармат (п.2 табл. 1.2), кожна з яких виконала по два постріли (п.3 табл. 1.2), отримали набір параметрів, що характеризують збурення атмосферного середовища, привнесені пострілом і розраховані за часом реєстрації дульної $t_{дул}$(13) і балістичної $t_{бал}$(14) хвиль, на основі яких зробили висновок про рівень зношеності каналу ствола і зарядної камори кожного з гармат (див. п.п. 10-17 табл. 1.2). Зношеність другої гармати значна, оскільки обчислена реальна швидкість снарядів в двох пострілах на 9,96% і 9,91% менша, ніж розрахункова початкова швидкість снаряда. Зношеність ствола і зарядної камори другої гармати є значною, тому що різниця між розрахунковою початковою швидкістю снаряда і обчисленою реальною початковою швидкістю знаходиться в межах 8-10%, що підтверджено даними, наведеними в пунктах 5, 8 і 9 табл. 1.2.

Розглянутий метод є точним і достовірним. Раніше вважалося, що нарізні стволи артилерійської гармати не придатні для подальшого використання, якщо сумарна втрата початкової швидкості снаряда внаслідок зношеності каналу ствола становить 10% і більше від табличної [65].

1.4. Метод визначення енергетичної ефективності артилерійської гармати

Відомими є дослідження в галузі автоматизованих систем керування, які довели можливість за швидкістю снаряда, який виходить з каналу ствола та дульному викиду, проводити автоматизовану діагностику стану системи «заряд−зарядна камора −ствол−ефективний постріл» [17, 33, 60, 66].

В основу методу поставлено задачу визначення енергетичної ефективності артилерійської гармати, якою забезпечується суттєве підвищення достовірності й точності знаходження поточного стану. Метод пояснюється певним розташуванням обладнання, яке наведено на рис.1.3, рис.1.4, рис.1.5.

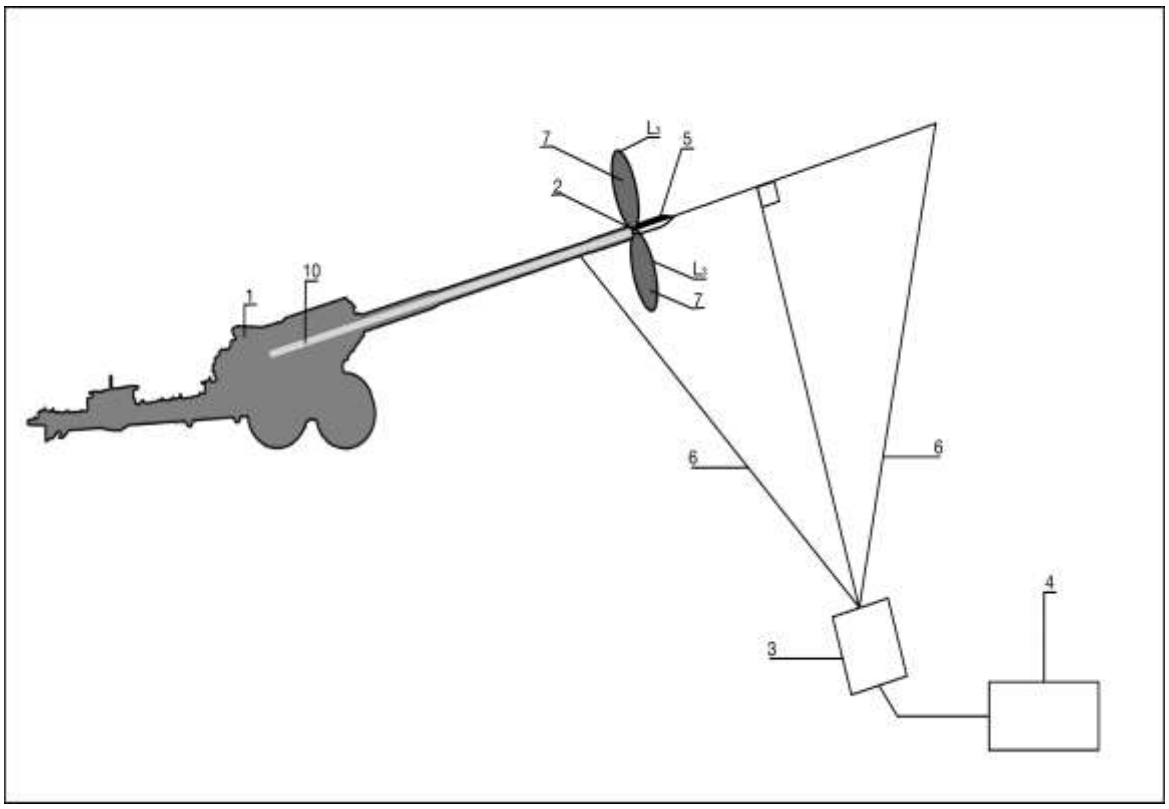

Рис. 1.3. Схема розміщення устаткування.

Джерело: сформовано автором за [23]

Артилерійська гармата – 1, зріз каналу ствола гармати – 2, цифрова високочастотна ширококутова відеокамера зі зніманням у видимому та інфрачервоному спектрі – 3, персональний комп'ютер з обробним програмним комплексом – 4, снаряд, яким здійснюється постріл – 5, межа зйомки відеокамери – 6, проєкція поверхні недогорілих порохових газів з тиском, вищим за атмосферний, що утворюють ударну дульну хвилю – 7, проєкція поверхні полум'я догорілих порохових газів з тиском, вищим за атмосферний – 8, проєкція поверхні догорілих порохових газів, які розширилися до атмосферного тиску, і утворюють

акустичну дульну хвилю – 9, внутрішній об’єм труби ствола – 10, діаметр-калібр снаряда – D, центр маси снаряда – M, поле білого кольору бінарно пофарбованого снаряда – W, поле чорного кольору бінарно пофарбованого снаряда – B, довжина снаряда – L1, відстань між центром маси снаряда 5 і зрізом каналу гарматного ствола – L2, крива лінія, межа між проєкцією поверхні недогорілих порохових газів з тиском, вищим за атмосферний, які утворюють ударну дульну хвилю, і атмосферою – L3, крива лінія, межа

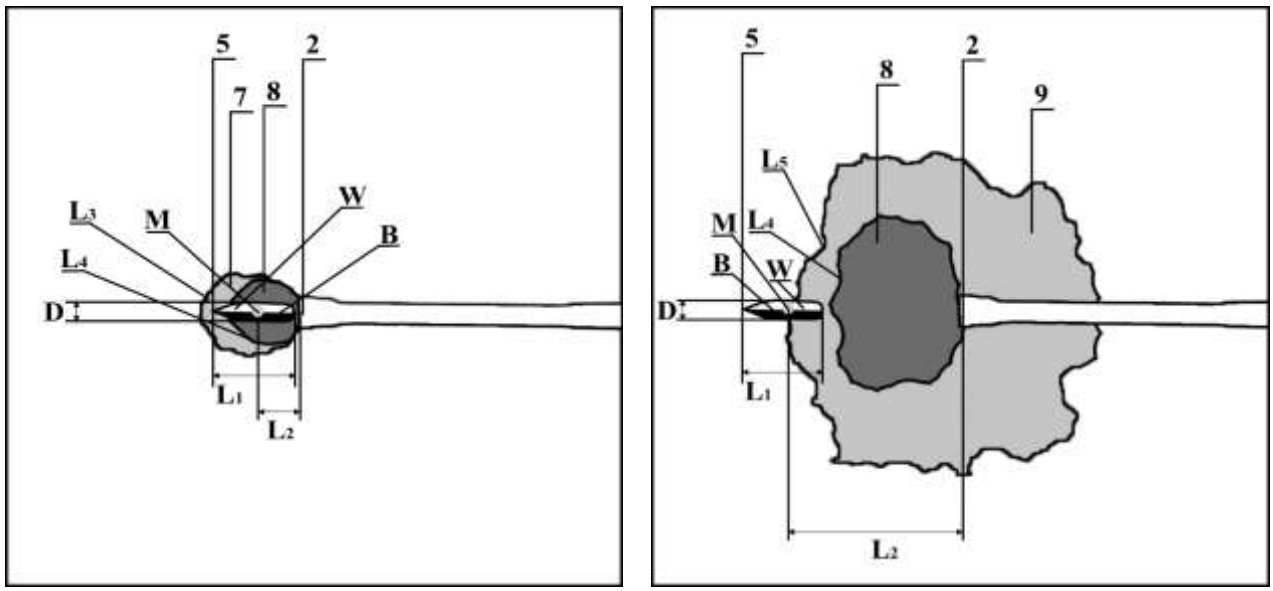

Рис. 1.4. Схема двох кадрів відображення полів, які реєструють температури і тиск після виходу снаряда з каналу ствола. (Ліворуч – поточний *i*-ий кадр з відеопотоку показує момент виходу снаряда зі зрізу каналу гарматного ствола, праворуч – поточний *k*-ий кадр з відеопотоку показує момент максимального обсягу полум'я догорілих порохових газів під час їх розширення до атмосферного тиску)

Джерело: сформовано автором за [23]

між проєкцією поверхні полум'я догорілих порохових газів з тиском, вищим за атмосферний, і недогорілими пороховими газами з тиском, вищим за атмосферний – L4, крива лінія, межа між проєкцією поверхні полум'я догорілих порохових газів з тиском, вищим за атмосферний, і атмосферою – L5, об'єм, який займають порохові гази високого тиску в момент часу, коли через зріз каналу гарматного ствола (2) пройшов снаряд (5) (внутрішній об’єм труби ствола (10) – V.

Метод визначення енергетичної ефективності артилерійської гармати здійснюється у такому порядку.

Крок 1. На вогневій позиції розміщують артилерійську гармату (1) таким чином, щоб зріз каналу гарматного ствола (2) був перпендикулярний лінії, на якій розміщують цифрову високочастотну ширококутову відеокамеру (3) (в будь-якій частині простору, зліва чи справа, зверху чи знизу від артилерійської гармати (1), сторона розташування не має значення), яка з'єднана з персональним комп'ютером, з обробним програмним комплексом (4).

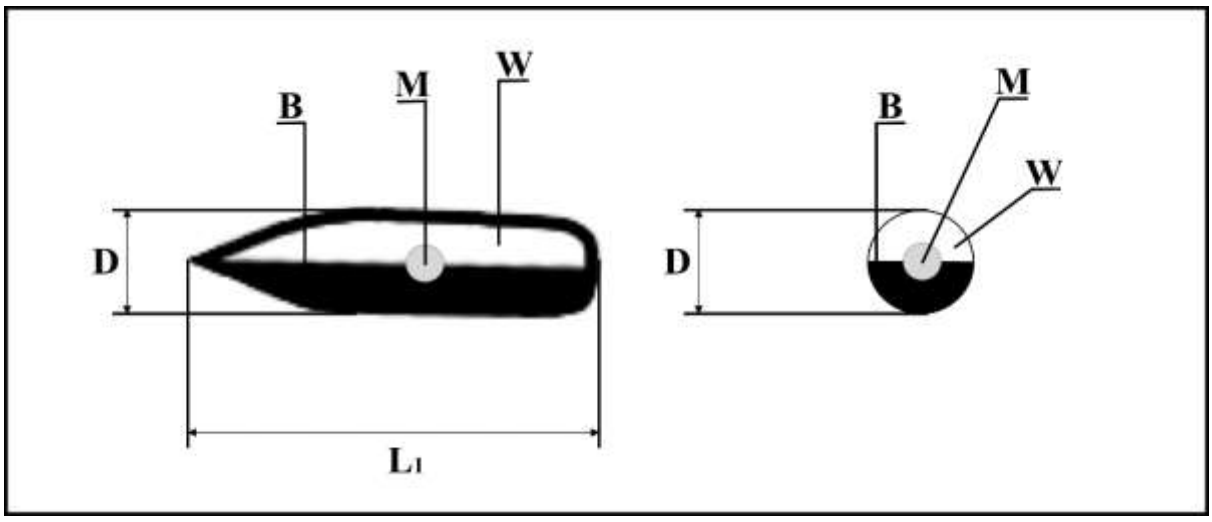

Рис. 1.5. Схема бінарного фарбування снаряда.
Джерело: сформовано автором за [23]

Крок 2. Підготовлений для стрільби снаряд (5), фарбують в два кольори: білий і чорний, лінія розмежування кольорів проходить через носик снаряда по твірній вздовж по обведенням (див. рис. 1.5).

Крок 3. Вмикають відеокамеру (3), здійснюють постріл бінарно пофарбованим снарядом (5), починають зйомку відеокамерою (3) у видимому і інфрачервоному спектрах і передають одержуваний цифровий відеопотік в режимі реального часу в персональний комп’ютер з оброблювальним програмним комплексом (4).

Крок 4. Після прольоту снаряда (5) через межу зйомки відеокамери 6 припиняють зйомку і вимикають відеокамеру (3).

5. За допомогою персонального комп’ютера з оброблювальним програмним комплексом (4) опрацьовують в (4) цифровий відеопотік і перетворюють його в послідовність кадрів.

Крок 6. Проводять аналіз кожного кадру для пошуку відображення снаряда і відбирають в окремий масив ті тимчасові кадри, на яких знаходять відображення снаряда від моменту часу його відділення від фіксації зрізу каналу гарматного ствола (2) до моменту часу, де відсутнє відображення снаряда, оскільки він покинув межу зйомки (6) відеокамери (3).

Крок 7. У персональному комп’ютері з оброблювальним програмним комплексом (4) для кожного часового кадру:

- знаходять на зображенні точку розташування центру маси снаряда M,

- в точці M визначають коефіцієнт геометричного перерахунку лінійних величин за апріорі відомими характеристиками (діаметр і довжина снаряда) в кожному часовому кадрі,

- визначають лінійну відстань між центром маси снаряда (5) і зрізом каналу гарматного ствола від зображення точки зрізу каналу ствола гармати (2) до точки M зображення снаряда (5) з урахуванням коефіцієнта геометричного перерахунку,

- визначають миттєву лінійну швидкість снаряда (5),

- визначають статистично достовірну початкову лінійну швидкість снаряда (5)v_{start} за першими часовими кадрами,

- визначають поточний колір бінарного пофарбування снаряда (5) (W або B) з відповідним часом і складають часовий бінарний ряд,

- в часовому бінарному ряді визначають кількість обертів снаряда (5) в одиницю часу або кутову швидкість w_{start} снаряда 5,

- визначають довжину кривої лінії – межі між проєкцією поверхні недогорілих порохових газів вищого тиску, ніж атмосферний, що утворюють ударну дульну хвилю, і атмосферою (L3), та кривої лінії – межі між проєкцією поверхні полум'я догорілих порохових газів вищого тиску, ніж атмосферний, та

недогорілими пороховими газами вищого тиску, ніж атмосферний (L4), і складають часові ряди довжин та площ,

- за складеними часовими рядами довжин та площ визначають градієнти зміни тиску, відсутність градієнта тиску показує утворення кривої лінії – межі між проєкцією поверхні полум'я догорілих порохових газів і атмосферою, (лінії L5).

Крок 8. За допомогою персонального комп'ютера з оброблювальним програмним комплексом (4) визначають для кожного *i*-го часового кадру об'єм порохових газів ($V_{ПГі}$), температуру порохових газів ($T_{ПГі}$), яку вимірюють цифровою високочастотною ширококутовою відеокамерою зі зйомкою у видимому та інфрачервоному спектрі (3), і обчислюють тиск порохових газів ($P_{ПГі}$) у фронті ударної дульної хвилі. За цими значеннями встановлюють вид залежності P(V)=f(V).

Крок 9. Визначають об'єм догорілих порохових газів (V*) при атмосферному тиску по кривій лінії – межі між проєкцією поверхні полум'я догорілих порохових газів з тиском, вищим за атмосферний, і атмосферою (L5), градієнту тиску, що утворюються при пострілі.

Крок 10. Визначають кінетичну енергію снаряда (5), масою m, що рухається по траєкторії, ($E_{сн}=1/2\cdot m\cdot v^2_{start}$) від зрізу каналу ствола гармати (2), енергію обертання снаряда ($E_{оберт}=1/2\cdot(D/2)^2\cdot m\cdot w^2_{start}$), роботу розширення газу ($E_г=\int P(V)dV$), інтеграл визначають в межах від V (об'єм, який займають порохові гази високого тиску в момент часу, коли через зріз каналу гарматного ствола (2) пройшов снаряд 5 (внутрішній об'єм труби ствола – 10) до V * (об'єм догорілих порохових газів при атмосферному тиску та енергію заряду (енергія вибуху бризантної речовини заряду).

Енергетичну ефективність артилерійської гармати (eff) визначають за формулою:

$eff = (E_{сн} + E_{оберт} + E_г) / E_з$, де:

$E_{сн}$ - енергія снаряда, що рухається за траєкторією,

$E_{оберт}$ - енергія обертання снаряда,

$E_г=\int P(V)dV$ – робота розширення порохових газів, що догоряють, інтеграл, який визначається в межах від V до V *, де:

V - об'єм, який займають порохові гази високого тиску в момент часу, коли через зріз каналу гарматного ствола пройшов снаряд (внутрішній об’єм труби ствола),

V * - об’єм догорілих порохових газів при атмосферному тиску,

$E_з$ - енергія заряду, яким був здійснений постріл снаряда, $E_з = m_з Q_{виб.}$, яким був здійснений постріл снаряда (5), де $m_з$-маса заряду і $Q_{виб.}$-питома енергія вибуху заряду.

У таблиці 1.3 наведено визначення геометричних розмірів кривої лінії L3 і проєкцій поверхонь порохових газів та об’єму газу, що догорає, $V_{ПГі}$, з моменту часу відділення снаряда від зрізу каналу гарматного ствола до моменту часу 100 мс, шляхом цифрової обробки відеопотоку, який одержано від цифрової високочастотної ширококутової відеокамери (2000 $с^{-1}$) з фіксацією інформації у видимому та інфрачервоному спектрі.

Таблиця 1.3 − Визначення геометричних розмірів кривої лінії L3

Номер *i*-го кадру відео-потоку	Час зйомки, с.	Довжина кривої лінії L3, м.	Площа проєкції поверхні 9, $м^2$	Об’єм порохових газів, $V_{ПГі}$, $м^3$
002	0,001	2,79	0,39	001,2
010	0,005	13,74	9,65	144,4
020	0,010	15,47	12,23	206,1
049	0,020	16,88	14,56	267,8
060	0,030	17,61	15,84	303,9
080	0,040	18,09	16,72	329,5
100	0,050	18,45	17,38	349,4
120	0,060	18,73	17,92	365,6
140	0,070	18,96	18,36	379,3
160	0,080	19,16	18,74	391,2
180	0,090	19,33	19,08	401,7
200	0,100	19,48	19,37	411,1

Джерело: сформовано автором за [23]

У таблиці 1.4 наведено визначення температури та надлишкового тиску над атмосферним догорілих порохових газів з моменту часу відділення снаряда від зрізу каналу гарматного ствола до моменту часу 100 мс шляхом обробки відеопотоку, який одержано від цифрової високочастотної ширококутової відеокамери (2000 $с^{-1}$) з фіксацією інформації у видимому та інфрачервоному спектрі.

Таблиця 1.4 − Визначення температури та надлишкового тиску над атмосферним порохових газів.

Номер і-го кадру відео-потоку	Час зйомки, с.	Температура газів $Т_{ПГі}$, К.	Розрахований надлишковий тиск порохових газів, $Р_{ПГі}$, Па
002	0,001	303	66273
010	0,005	486	1010
020	0,010	669	973
049	0,020	829	928
060	0,030	832	821
080	0,040	765	696
100	0,050	673	578
120	0,060	580	476
140	0,070	497	393
160	0,080	428	328
180	0,090	372	277
200	0,100	328	239

Джерело: розроблено автором за [23]

За наведеними даними видно, що енергетична ефективність артилерійської гармати $eff=(E_{сн} + E_{обер} + E_{г})/E_{з}$ складає 0,31 (див. п. 17 табл.1.5), а саме $eff=(1{,}96\cdot10^{7}+5{,}6\cdot10^{4}+8{,}9\cdot10^{5})/6{,}62\cdot10^{7}=0{,}31$, і в разі порушення значення будь-якого доданку в чисельнику (див. п. 10 «$Е_{сн}$», п. 11 «$Е_{оберт}$», п. 13 «$Е_{г}$» табл.1.5) або знаменнику (див. п. 16 «$Е_{з}$» табл.1.5) в формулі розрахунку eff (енергетичної ефективності артилерійської гармати) буде отримано інше значення цієї величини, що свідчитиме, що поточний постріл відрізняться від попередніх і його не слід враховувати, що дозволить скоротити час пристрілки.

Таблиця 1.5 − Визначення енергетичної ефективності артилерійської гармати

№	Назва показника, одиниця виміру	Розраховане значення
1.	Маса снаряда, m, кг	46
2.	Діаметр снаряда, D, м	0,152
3.	Кадри відео-потоку, що були проаналізовані	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 ,9, 10
4.	Проміжок часу, τ, мс	4
5.	Відстань, яку подолано снарядом, L2, м	3,7
6.	Середня початкова лінійна швидкість снаряда, v_{start} , м/с	925
7.	Кількість обертів за проміжок часу, τ	2,6
8.	Кутова швидкість снаряда, w_{start}, c^{-1}.	650
9.	Вид залежності P(V)=f(V), отриманий з Таблиці 2.	$P(V)=85042 \cdot V^{-0,882}$
10.	Кінетична енергію снаряда, $E_{сн}=1/2 \cdot m \cdot v^2_{start}$, Дж	$1,96 \cdot 10^7$
11.	Енергія обертання снаряда $E_{оберт}=1/2 \cdot (D/2)^2 \cdot m \cdot w^2_{start}$, Дж	$5,6 \cdot 10^4$
12.	Межі інтегрування: V – внутрішній об'єм труби ствола, V* - об'єм порохових газів при атмосферному тиску, $м^3$	0,148; 411
13.	Робота розширення газу $E_г=\int 85042V^{-0,882}dV$, Дж	$8,9 \cdot 10^5$
14.	Маса заряду, $m_з$, кг	18,4
15.	Питома енергія вибуху заряду $Q_{виб.}$, Дж/кг	$3,6 \cdot 10^6$
16.	Енергія заряду, яким було здійснено постріл снаряда, $E_з = m_з Q_{виб.}$, Дж.	$6,62 \cdot 10^7$
17.	Енергетична ефективність артилерійської гармати, $eff=(E_{сн} + E_{обер} + E_г)/E_з$	0,31

Джерело: сформовано автором за [23]

1.5 Метод верифікації координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею

Є відомими дослідження в галузі автоматизованих систем керування, які довели можливість за швидкістю снаряда, який рухається вільною траєкторією, проводити автоматизовану діагностику стану системи «ефективний постріл− снаряд – траєкторія снаряда – зіткнення з поверхнею» [19, 20, 67-70].

Тому такий метод верифікації можна вважати останньою ланкою для ефективного функціонування сучасних автоматизованих систем керування вогнем артилерії, які засновані на постійному моніторингові всіх станів

артилерійської системи «заряд – зарядна камора – ствол – снаряд – траєкторія снаряда – зіткнення з поверхнею». В основу методу покладено завдання визначення координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею шляхом звукової реєстрації акустичного поля, утвореного снарядом, що рухається вільною траєкторією і був випущений з артилерійської гармати рис.1.6.

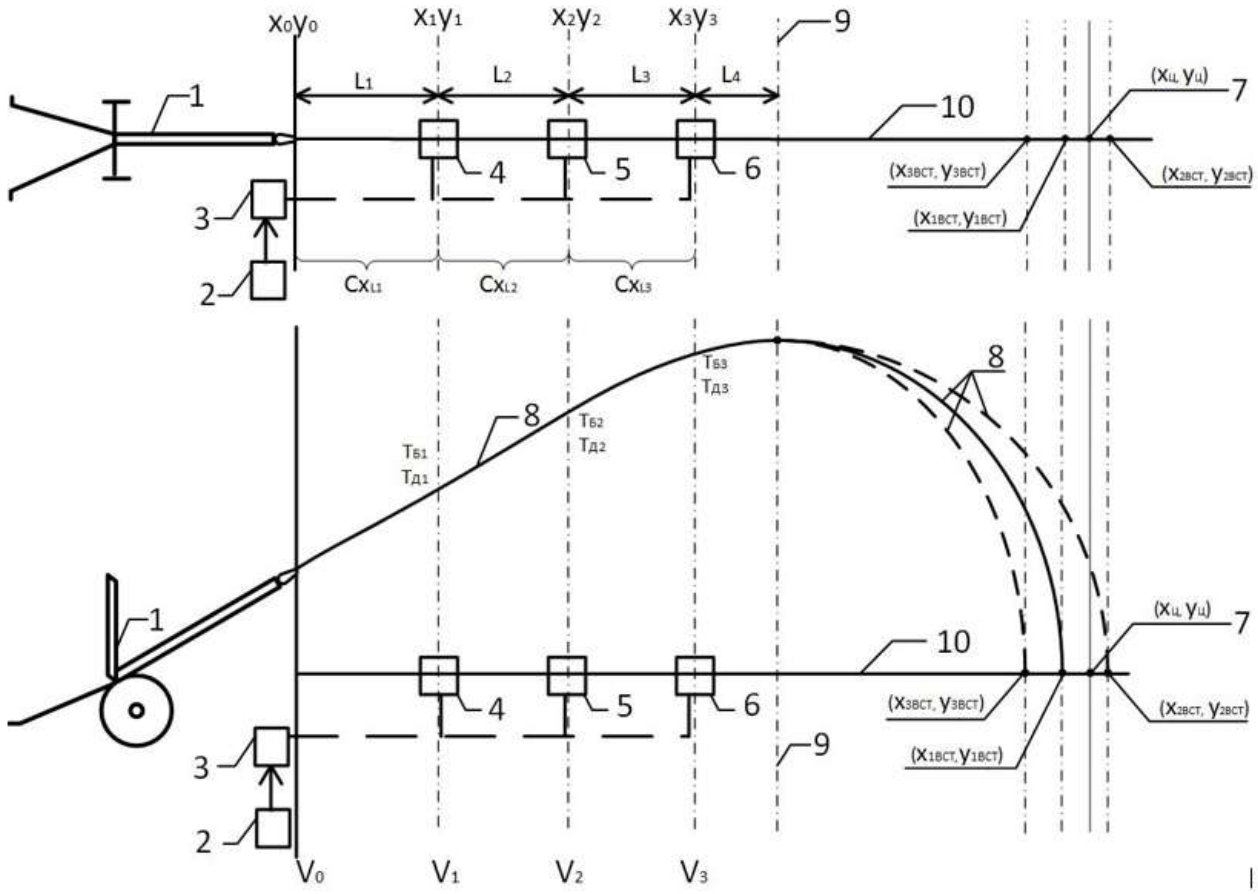

Рис.1.6. Схема розміщення обладнання, вид зверху та збоку
Джерело: сформовано автором за [24]

Запропонований метод здійснюється в такому порядку.

Крок 1. Розміщують гармату (1), станцію виміру метео (2), розрахунковий пристрій (3). Отримують координати гармати (1) (X_0, Y_0), і цілі (7) ($X_ц$, $Y_ц$) та вводять в розрахунковий пристрій (3).

Крок 2. По лінії стрільби від гармати (1) до передбачуваної табличної відстані (9), розміщують вимірювальні мікрофони (4), (5), (6), які включають з розрахунковим пристроєм (3). Місце розміщення визначають з міркування рівності відстаней від гармати (1) до першої групи L_1, відстаней між групами L_2, L_3 і від останньої групи до межі (9) втрати снарядом надзвукової швидкості L_4.

Крок 3. Отримують координати вимірювальних мікрофонів (4), (5),(6), які перебувають на лінії стрільби (X_1, Y_1), (X_2, Y_2), (X_3, Y_3).

Крок 4. Вимірювальні мікрофони (4),(5),(6) через комутуюче обладнання з'єднують з розрахунковим пристроєм (3), синхронізують за часом між собою і вводять метеодані (2).

Крок 5. З гармати (1) проводять постріл і снаряд летить по траєкторії (8) в ціль (7), з координатами ($X_ц$, $Y_ц$),. В результаті руху снаряда над лінією стрільби (10) утворюється акустичне поле з балістичної і дульної хвиль. Обидві хвилі реєструються вимірювальними мікрофонами (4), (5), (6). Балістична хвиля рухається з надзвуковою швидкістю, яка зменшується, дульна хвиля рухається зі звуковою постійною швидкістю.

Крок 6. Кожен вимірювальний мікрофон (4), (5), (6) спочатку реєструє балістичну хвилю − ($T_{Б1}$, $T_{Б2}$, $T_{Б3}$), а потім дульну хвилю ($T_{Д1}$, $T_{Д2}$, $T_{Д3}$).

Крок 7. Розраховують інтервал часу між подіями реєстрації балістичної і дульної хвиль вимірювальними мікрофонами (4), (5), (6), ближнього до гармати 1 вимірювального мікрофона (4), (5), (6) і дальнього від гармати 1.

Крок 8. За час реєстрації дульної ($T_{Д1}$, $T_{Д2}$, $T_{Д3}$) і балістичної ($T_{Б1}$, $T_{Б2}$, $T_{Б3}$) хвиль через всі вимірювальні мікрофони (4), (5), (6) розраховують швидкість балістичної хвилі (V_1, V_2, V_3,) яка і є поточною швидкістю снаряда в момент реєстрації кожним вимірювальним мікрофоном (4), (5), (6) балістичної хвилі, яка проходить над ними.

Крок 9. Визначають початкову швидкість снаряда під час пострілу з гармати (1) - V_0 за таблицями стрільби для даного виду заряду.

Крок 10. Розраховують коефіцієнт лобового опору снаряда (C_x) між двома найближчими групами мікрофонів.

Інтегральний коефіцієнт опору снаряда, що летить на ділянці, розраховується за виразом.

$$C_x=2*F_{тр}/(M*S*p*V^2)$$

$F_{тр}$ - сила тертя снаряда масою m з повітрям на контрольованій ділянці; S - площа міделевого перетину снаряда; p - густина повітря; V- середня швидкість снаряда на ділянці між двома точками вимірювань, M - число Маха.

Імпульс сили для двох різних точок вимірювання, наприклад, першої (індекси i) і другої (індекси j). Для першої: $F_i*t_i=m*V_i$, тоді $F_i=m*V_i/t_i$ і для другої $F_j*t_j=m*V_j$,тоді $F_j=m*V_j/t_j$. V_i і V_j - поточні швидкості снаряда над точками вимірювання. t_i і t_j - часи руху снаряда від гармати (1) до точок вимірювання відомі, тоді $F_{тр}= F_i- F_j$.

Крок 11. Визначають апроксимуючі коефіцієнти траєкторії для координат розташування (за швидкістю, часом, довжиною траєкторії): артилерійської гармати (1) - a_1, першого вимірювального мікрофона або першої групи вимірювальних мікрофонів з комутуючою апаратурою (4) - a_2, другого вимірювального мікрофона або другої групи вимірювальних мікрофонів з комутуючою апаратурою (5) - a_3, третього вимірювального мікрофона або третьої групи вимірювальних мікрофонів з комутуючою апаратурою (6) - a_4.

Крок 12. Обчислюють три параболи за виміряними параметрами.

Параболи першого виду утворюється апроксимаційним коефіцієнтом траєкторії a_1 за координатами гармати (1) X_0 і координатами мікрофонів першої X_1 і другої X_2 групи, також апроксимується коефіцієнтами траєкторії a_2, a_3. За параболічною залежністю визначають координату зіткнення снаряда з поверхнею $X_{1вст}$. Параболи другого виду утворюється апроксимаційним коефіцієнтом траєкторії a_1 за координатами гармати (1) X_0, і координатами мікрофонів першої X_1 і третьої X_3 групи, також апроксимується коефіцієнтами траєкторії a_2, a_4. За

параболічною залежністю визначають координату зіткнення снаряда з поверхнею $X_{2вст}$. Параболи третього виду утворюється апроксимаційним коефіцієнтом траєкторії a_1 за координатами гармати (1) X_0, і координатами мікрофонів другої X_2 і третьої X_3 групи, також апроксимується коефіцієнтами траєкторії a_3, a_4. За параболічною залежністю визначають координату зіткнення снаряда з поверхнею $X_{3вст}$. Крок 13. За рахунок обертального руху снаряда для трьох параболічних залежностей розраховують координати $Y_{1вст}$, $Y_{2вст}$, $Y_{3вст}$ бічного відхилення.

Крок 14. Розраховують середню арифметичну величину трьох координат зіткнення снаряда з поверхнею ($X_{1вст}$, $Y_{1вст}$), ($X_{2вст}$, $Y_{2вст}$), ($X_{3вст}$, $Y_{3вст}$), яка характеризує координату зіткнення снаряда з поверхнею за розглянутим методом.

У таблиці 1.6 і таблиці 1.7 наведені дані, що підтверджують спосіб визначення координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею шляхом звукової реєстрації акустичного поля, яке складається з балістичної і дульної хвиль, утворених снарядом, випущеним з артилерійської гармати.

Таблиця 1.6 Визначення коефіцієнтів апроксимуючої параболи

Назва параметра, що визначається		Значення параметрів для номеру мікрофона на лінії стрільби		
		1	2	3
1. Відстань до цілі, км;		15		
2. Відстань від гармати до мікрофона (L), м;		5436	7789	9896
3. Швидкість снаряда в точці вимірювання, м / с.		674,2	583,3	519,4
4. Довжина траєкторії снаряда до точки вимірювання, м.		7111	10188	12944
3. Час реєстрації балістичної хвилі, с;		10	15	20
4. Час реєстрації дульної хвилі, с;		16,4	23,5	29,8
5. Інтервал часу між реєстрацією балістичної і дульної хвиль, с;		6,4	8,5	9,8
6. Інтегральний коефіцієнт лобового опору на ділянці;		0,025940	0,016011	0,010749
7. Коефіцієнти апроксимуючої параболи $y=A*L^2+B*L$	A	-0,000096	-0,000088	-0,00008
	B	1, 3182	1, 2772	1, 1937

Джерело: сформовано автором за [24]

Таблиця 1.7 − Визначення координати зіткнення снаряда з поверхнею

Назва параметра, що визначається	Показники, що відповідають коефіцієнтам апроксимуючої параболи		
	-0,000096	-0,000088	-0,00008
	1, 3182	1, 2772	1, 1937
1. Розрахункові координати зіткнення снаряда з поверхнею, м;	13794	14511	15001
2. Координати бічного відхилення	29	33	36
3. Усереднена координата зіткнення снаряда з поверхнею, м.	(14435; 33)		

Джерело: сформовано автором за [24]

1.6. Постановка завдань дослідження

Представлений матеріал було узагальнено й структуровано відповідно до життєвого циклу артилерійського пострілу на поточній позиції ведення стрільби, який відповідає ланцюгу «заряд – зарядна камора – ствол – траєкторія – ціль». Життєвий цикл будемо вважати ефективним у випадку, коли кожна ланка циклу відповідатиме прийнятому для неї показнику ефективності та якщо на ціль нанесено заплановану дію згідно з прийнятим критерієм.

Дослідження матеріалу, що викладено в п.п. 1.1–1.4, дозволило представити мету дисертаційного дослідження, яка полягає в підвищенні ефективності та зменшенні часу виконання бойової роботи КІСУ практичними стрільбами гарматою під час виникнення різних збурень. Результат досягається за рахунок удосконалення імітаційної моделі пострілу і методів верифікації ланок ланцюга станів життєвого циклу кожного артилерійського пострілу, які утворюють зворотний зв’язок у здійсненні ефективного пострілу.

На першому кроці планується здійснити аналіз використання НЦП у стрілецькій зброї та ствольній артилерії. Властивості НЦП можуть змінюватися в часі, що впливає на властивості пороху в процесі його зберігання. Швидкість поповнення запасів пороху визначається виробничими та фінансовими можливостями. Обсяги накопичення, терміни зберігання, якість запасів, які

використовуються, визначаються зовнішніми обставинами.

Під час планового використання пороху з арсеналів (за мирного часу) є можливість забезпечення необхідних умов зберігання, проведення лабораторних досліджень якості пороху, плановій ротації зарядів та їх утилізації за необхідності. Але ніякі дії не дозволяють уникнути деградації пороху з часом.

У разі інтенсивного, навіть екстремального, використання зарядів одночасно, які доставляються на різні ділянки бойових дій, ситуація ускладнюється тим, що порох може надходити з різних джерел з певними вимогами та забезпеченням умов зберігання. Можуть доставлятися заряди з післягарантійними термінами зберігання або навіть із такою зміною характеристик, яка б вимагала їх утилізації за мирного часу. Використання таких зарядів без оцінювання поточного стану та внесення необхідних поправок до параметрів стрільби веде до їх підвищеної витрати. Збільшення необхідної кількості пострілів веде до додаткового зношення стволів. А збільшення часу знаходження на бойовій позиції – до зниження бойової стійкості підрозділу.

Протягом всього часу існування та застосування НЦП розроблялися та вдосконалювалися різні методи технічного аудиту їх стану .

Прогнозування є одним з можливих напрямів в оцінюванні поточного стану метальних зарядів. У межах його розвитку виконувалися дослідження з визначення впливу факторів навколишнього середовища на властивості целюлози. Незважаючи на багаторічні дослідження, залишається багато питань щодо механізму термічного розкладання, що відіграє ключову роль у загальних процесах. Подальший розвиток таких досліджень у [71] об'єднав метод термогравіметрії з методами інфрачервоної (TG-FTIR) мас-спектроскопії (TG-MS). Ці методи дозволяють досліджувати гази, що виділяються при термічному розкладанні, простежити механізми хімічного розкладання. В [72] на основі теорії Франка−Каменецького (Frank−Kamenetskii) досліджувався вплив обсягу НЦ на її температуру розкладання та на температуру теплового вибуху. У [73]

досліджувався вплив старіння пороху на швидкість горіння. Штучне старіння проводилося шляхом нагріву пороху при заданій температурі впродовж певного проміжку часу. Виявлено збільшення швидкості горіння за низького тиску та уповільнення за високого. В [74] вивчалася деградація нітрату целюлози під дією ультрафіолетового випромінювання. Інфрачервоний спектроскопічний аналіз виявив виникнення денітрування у виникненні фотопродуктів окислення. Вплив цих процесів на механічні та термічні властивості плівок нітрату целюлози включає крихкість і більш низькі температури займання. У [75] розглядався новий біологічний метод переробки НЦ за допомогою гриба Chaetomiumelatum. Цей гриб було виділено з двохосновного метального заряду стрілецького зброї, який зберігався у вологому середовищі. У [75] розглядалася можливість утилізації НЦ (зниження ступеня нітрації) за допомогою цього гриба. Але такий процес можливий і в процесі зберігання НЦ порохів.

У роботах [71–75] розглянуто різні фактори впливу навколишнього середовища на процес деградації НЦ порохів. Облік їх впливу важливий. Вони визначають напрямок та на якісному рівні інтенсивність зміни стану порохів. Але неможливість кількісного обліку їх впливу на весь час зберігання НЦП не дозволяє з необхідною точністю визначати їх стан у поточний момент часу.

Деградація НЦ пороху – неминучий процес. Збереження необхідних властивостей порохових зарядів впродовж тривалого часу може бути забезпечене не лише за рахунок створення сприятливих умов зберігання, а також шляхом відновлення деяких втрачених ними властивостей. Такий спосіб пропонується у роботі [76]. Розглядається можливість обробки НЦП, що деградував, перекисом водню (H_2O_2). Було показано, що під час регенерації порохових нітроцелюлозних зарядів пероксидом водню відбувається заповнення маси і збільшується теплотвірна здатність вихідного матеріалу. Такий результат може дозволити збільшити термін збереження балістичних характеристик порохових зарядів. Але, як і у вище розглянутих випадках, неможливість кількісного обліку результатів

впливу перекису водню не дозволяє з необхідною точністю визначати стан порохових зарядів в даний момент часу.

З необхідною точністю стан зарядів може бути визначено як залежність від їх поточного складу за енергетичним складником. Це вимагає одночасного використання кількох методів. Автори досліджень експериментують з різною їх комбінацією. У [76] наводяться результати дослідження обробки палива, яке деградувало, але воно має іншу енергетичну структуру походження. Вплив додаткового елемента, як і у випадку [76], дозволить збільшити термін збереження характеристик носія енергетичного потенціалу.

У [77] проводиться огляд наявних методів з констатацією переваг та недоліків. Ретельне визначення їх параметричної характеристики має ключове значення для забезпечення умов зберігання та безпеки під час життєвого циклу. При всій інформативності розглянуті методи вимагають високотехнологічного обладнання, висококваліфікованого дослідницького персоналу та значного часу на проведення досліджень та аналіз отриманих результатів. Ця особливість виключає використання розглянутих методів в умовах, близьких до бойових.

У [78] розглядається можливість визначення складу порохового заряду на основі аналізу продуктів згорання з місця вибуху. Розглядається випадок саморобних вибухових пристроїв. Потенційно у методологічному плані пропонований підхід є раціональним. Саме так може бути визначено склад заряду, який він мав безпосередньо перед спрацьовуванням. Але у бойових умовах для внесення поправок склад повинен бути відомим до пострілу.

Енергетику пострілу визначає сила пороху. Під час деградації пороху цей параметр також зазнає змін. За класичною методикою його величина визначається за допомогою, наприклад, манометричної бомби [79] за зареєстрованою кривою тиску або з використанням адіабатичного бомбового калориметра [80], наприклад, IKA C2000 Basic. За визначенням, сила пороху дорівнює добутку температури продуктів згорання на газову постійну цих продуктів. В іншому формулюванні

сила пороху – це робота, яку здійснюють порохові гази при розкладанні 1 кг пороху та їх розширенні до постійного атмосферного тиску. У будь-якому випадку сила пороху залежить від величини газової постійної та від складу продуктів згорання. Внаслідок деструкції порохів буде змінюватись і склад ПГ. Отже, без визначення складу ПГ або поточного складу пороху визначення тільки його енергетичної характеристики не дозволяє коректно визначити силу пороху.

Про склад пороху та його енергетичні характеристики можна дізнатись за складом та фізичними параметрами продуктів термодеструкції порохових газів. Але навіть про якісний склад ПГ немає єдиної думки. Більшість НЦП мають негативний кисневий баланс. Виникає питання, яким чином кисень, що входить до складу пороху, пов'язаний з вуглецем та воднем у ПГ. Так, у низці джерел, наприклад [81], стверджується, що до складу ПГ входять в основному газоподібні продукти реакції у вигляді H_2O, CO, CO_2, H_2, N_2. Це відповідає правилу Кістяковского−Вілсона (Kistiakowsky−Wilson rule). Негативність кисневого балансу проявляється в утворенні вільного водню. Таке припущення не підтверджується складом продуктів реакції горіння та вибуху нітрованих високоенергетичних матеріалів. Так, у роботах [82, 83] зазначається наявність сажі у продуктах вибуху. У [84] не тільки фіксується наявність сажі в дульному викиді, але й робиться спроба її кількісної оцінки у процесі вивчення дульного спалаху (MuzzleFlash). Наявність великої кількості сажі фіксується до моменту початку дульного спалаху. Надалі у процесі спалаху сажа вигорає у кисні повітря.

У [85] пропонується використовувати модифіковане правило Кістяковського−Вілсона (Kistiakowsky−Wilsonrule). Відповідно до нього кисень з нітросполук спочатку повністю пов'язує атоми водню з утворенням H_2O. Далі пов'язує атоми вуглецю до утворення CO. І лише потім кисень, що залишився, доокислює CO до CO_2. При негативному кисневому балансі кисню не вистачає навіть для повного зв'язування атомів вуглецю до CO. На цій підставі можна пояснити появу в ПГ вільного вуглецю у вигляді сажі. Але така схема не

передбачає утворення H_2 та значної кількості CO_2.

Насправді склад ПГ не відповідає ні основному, ні модифікованому, рекомендованих правилом Кістяковского-Вілсона. До їх складу входять, крім CO і H_2O, також CO_2, H_2 і вільний вуглець у вигляді сажі.

На склад ПГ, крім хімічного фактору у вигляді негативного кисневого балансу, потенційно можуть впливати і фізичні параметри процесу пострілу. Так, в [83] зазначено, що на кількість вільного вуглецю, що утворився в процесі вибуху, впливає величина тиску. У [17] виявлено можливість на кінцевій стадії руху снаряда в стволі гармати (термодинамічна стадія) створення умов для тривання реакції диспропорціонування монооксиду вуглецю, так звана реакція Будуара-Белла (Boudouard-Bellreaction). У цей момент за умов збереження високого тиску ПГ величина їх температури зменшується до значення 1200К і менше. Особливістю тривання такої реакції є зменшення кількості речовини в газовому складнику ПГ, що позначається на величині термодинамічної роботи та впливає на екзотермічність тривання реакції, тим самим збільшуючи термодинамічну роботу ПГ.

У переважній більшості випадків в умовах експерименту в лабораторних умовах не вдається відтворити в сукупності параметри, що відповідають термодинамічній стадії пострілу. У доступній літературі не виділяються умови забезпечення відповідності результатів експериментальних досліджень параметрам процесу пострілу. Проведений аналіз показує необхідність пошуку методу верифікації складу піротехнічної суміші методом бібліотеки на основі удосконалення моделі рівноважної термодеструкції за температурою суміші інертного та порохових газів;

Другий крок передбачає проведення аналізу сторони, яка веде наступ, з точки зору ефективності артилерійської стрільби. Така сторона у використанні гармат має початкову інформацію про координати цілей сторони, що веде оборону. Сторона, яка веде наступ, вже після першого пострілу гармати визначає

своє приблизне місце. Через деякий час зі збільшенням пострілів стають відомими координати установок і сторона, що веде оборону відкриє вогонь на ураження. Будь-яка логіка ведення бойової роботи передбачає переміщення артилерійських установок на нову вогневу позицію для збереження боєздатності.

Аналіз результатів, представлених в [19, 20, 67, 68], показав можливість збереження боєздатності причіпних артилерійських гармат. Зроблено висновок, що тактика витрати пострілів зі знищення цілі в кількості 4-ох пострілів відповідає бойовим діям при наступі. Тому таку тактику для наступу було названо «сховався і вистрілив» «hidandshot».

На сьогодні тактика бойового застосування причіпних систем артилерії великих калібрів ґрунтується на концепції «shoot and scoot» [16]. У джерелах детально розглянуто різні аспекти тактики застосування таких артилерійських систем з урахуванням завдань контрбатарейної боротьби [40, 20].

Значно менше уваги приділяється розгляду іншого вагомого аспекту інновації артилерійського компонента сучасного бою. Впродовж останнього десятиріччя провідними світовими виробниками артилерійського озброєння створено самохідні артилерійські системи нового покоління (далі самохідні артилерійські системи САС). Однією з особливостей САС є перехід до колісного самохідного шасі як елементу комплектування. Самохідні артилерійські системи на колісному шасі мають декілька ключових переваг:

– мобільність (колісне шасі забезпечує високу швидкість пересування дорогами та гарну маневреність на місцевості, що дозволяє швидко змінювати позиції та уникати виявлення);

– прохідність (хоча колісні САС менш прохідні складними ландшафтами порівняно з гусеничними, сучасні моделі часто мають покращені характеристики прохідності);

– зручність експлуатації (колісні шасі зазвичай потребують менше технічного обслуговування та простіші в експлуатації, що зменшує витрати на їх

утримання);

– маса та розміри (як правило, САС на колісному шасі легші та компактніші, що дозволяє їх використовувати у міських умовах та в обмеженому просторі);

– швидкість розгортання (швидке встановлення та підготовка до стрільби дозволяє ефективно реагувати на зміни в бойових умовах).

Ці переваги роблять самохідні артилерійські системи на колісному шасі привабливими для сучасних збройних сил, особливо за умов високомобільних операцій.

Іншою особливістю САС є система заряджання з автоматичним магазином та модульна система зарядів, що дозволяє стрімко нарощувати їх. САС оснащена комп'ютерною системою керування вогнем, куди завантажуються всі необхідні дані.

Значною перевагою САС є можливість стрільби в режимі MRSI (multiple rounds simultaneous impact) або псевдозалпу (stonk). У такому порядку САС здійснює низку послідовних пострілів по одній цілі під різними кутами піднімання ствола. Снаряди летять до цілі як за настильними, так і за навісними траєкторіями з майже одночасним прибуттям в точку розміщення цілі. Доведено, що стрільба САС у режимі MRSI за вогневою потужністю еквівалентна стрільбі батареї послідовними пострілами на ураження цілі.

Зазначені переваги САС роблять їх найефективнішою артилерійською зброєю сучасного бою. Це підтверджено бойовим досвідом застосування їх у визвольній війні в Україні [41-46]. Однак концептуальної інформації щодо тактичних моделей застосування САС та їх ефективності в доступній літературі немає.

Наявні в наукових джерелах методи оцінювання ефективності бойового застосування артилерії ґрунтуються на теоретичному прогнозуванні характеристик ураження цілей [47-49]. Водночас нагальною проблемою залишається дослідження динамічного оцінювання ефективності бойового

застосування артилерійських систем з урахуванням витрат ресурсів у процесі вогневої діяльності.

Реалістичність і правдоподібність моделювання бойових дій є ключовими аспектами сучасної підготовки до ведення бойової роботи. Одним із найскладніших і водночас найцікавіших завдань є моделювання артилерійських операцій, де необхідно враховувати численні фактори, що впливають на ефективність бойової роботи причіпних артилерійських установок.

У традиційних підходах до моделювання бойових дій часто використовуються детерміновані моделі, які не враховують випадковий характер багатьох параметрів, таких як швидкість снаряда, час на перезарядку, ймовірність виявлення ворожими силами та ін. Це призводить до спрощення моделі та зниження її реалістичності, що негативно впливає на практичний досвід.

Додатковою складністю є необхідність моделювання зміни вогневої позиції причіпних артилерійських установок у протистоянні супротивнику. Зміна позиції вимагає врахування часу на транспортування, можливих втрат боєздатності під час руху, а також ризику виявлення та атаки з боку ворога. Традиційні моделі не завжди можуть адекватно врахувати ці фактори, що призводить до недостовірних результатів моделювання бойових дій.

Урахування зовнішніх збурень, таких як погодні умови, технічний стан причіпних артилерійських установок та інших факторів, також є важливим аспектом, що впливає на достовірність моделювання. Випадковий характер цих збурень ускладнює створення детермінованих моделей, що здатні точно відтворити реальні умови бойової обстановки.

Для розв’язання цих завдань у даному дослідженні пропонується використовувати стохастичні моделі для відтворення бойової роботи. Отже, в розділі розглядається удосконалення методів і моделей керування бойовою роботою причіпних артилерійських установок за умов зміни вогневої позиції та наявності зовнішніх збурень. Запропонований підхід на основі стохастичних

моделей дозволить підвищити реалістичність та ефективність моделювання бойових дій, що сприятиме формуванню достовірного бойового досвіду.

Сучасні моделі стають дедалі більш складними та реалістичними, вимагаючи від дослідників використання передових технологій та методів для моделювання різних аспектів. Бойові дії, зокрема артилерійські операції, є однією з найважливіших складових багатьох стратегічних та військових дій. Відтак, удосконалення моделей і методів моделювання таких операцій є надзвичайно важливим завданням.

Традиційні детерміновані моделі, що використовуються для моделювання бойових дій, часто не здатні врахувати всю різноманітність і складність реальних бойових умов. Це призводить до спрощення бойових сценаріїв та зниження рівня адекватності моделі від поточної реальності. Натомість використання стохастичних моделей, зокрема Марківських процесів, дозволяє враховувати випадковий характер багатьох параметрів, таких як швидкість снаряда, час на перезарядку, ймовірність виявлення супротивником та інші.

Зміна вогневих позицій артилерійських установок є ще одним важливим аспектом, який вимагає точного моделювання. Реалістичне моделювання цього процесу для проведення бойових дій вимагає врахування часу на транспортування, можливих втрат боєздатності під час руху, ризику виявлення та атаки з боку ворога. Традиційні моделі часто не здатні адекватно врахувати ці фактори.

Крім того, врахування зовнішніх збурень, таких як погодні умови, технічний стан артилерійських установок та інші фактори, є важливим аспектом для підвищення реалістичності моделювання. Використання стохастичних моделей дозволяє точно відтворити ці збурення та їх вплив на бойову роботу причіпних артилерійських установок.

Для цього необхідно удосконалити методи і моделі автоматизованого керування бойовою роботою причіпних артилерійських установок стосовно

використання стохастичних процесів, на основі яких розробити моделі бойової роботи окремих самохідних артилерійських систем для забезпечення верифікації ефективного пострілу.

На третьому етапі потрібно буде провести аналіз траєкторії польоту снаряда за допомогою складних балістичних моделей, що спирається на спеціалізовані методи стрімкого оцінювання та прогнозування точності в польових умовах [86, 87]. Крім того, спеціалізовані засоби [88] та геоінформаційні системи [89, 90] зараз використовуються для розробки таблиць стрільби та виготовлення карт-планшетів для командирів артилерійських підрозділів. Підвищити точність стрільби та мінімізувати час перебування на вогневих позиціях можна досягти шляхом уточнення процесу перевірки результатів пострілу, зокрема підтвердження потрапляння снаряда в ціль або визначення його відхилення від точки прицілювання [91]. Такий технологічний підхід передбачає створення інформаційного зворотного зв’язку між послідовними пострілами артилерійської установки [33, 92]. Після кожного пострілу початкові параметри стрільби коригуються для наступного раунду. Як зазначено в [92], існує дві категорії процедур зворотного зв’язку з інформацією: «стріляй-дивись-стріляй» для цілей, видимих з вогневої позиції, і «стріляй-регулюй-стріляй» для прихованих позицій. Обидва підходи вимагають оцінювання координат розриву снаряда, що ускладнює процес перевірки та збільшує час. З метою істотного підвищення ефективності перевірки артилерійських пострілів в умовах різноманітних перешкод у роботі [19, 68] розроблено метод, який дозволяє перевірити постріл до того, як снаряд приземлиться і розірветься. Цей метод заснований на реєстрації балістичних і звукових хвиль, створюваних снарядом, що летить за траєкторією, за допомогою системи розподілених у просторі акустичних датчиків. Реалізація даного методу дозволяє значно обмежити час ведення вогню зброї та зменшити витрату снарядів при компенсації випадкових збурень порівняно з традиційним прицілюванням. Повномасштабні випробування повністю підтвердили

правильність основних науково-технічних положень, покладених в основу цього методу [68]. Для реалізації розглянутого вище методу перевірки артилерійського пострілу з випадковими збуреннями необхідна наявність спеціалізованої вимірювальної системи, що складається з метеостанції, не менше трьох акустичних датчиків, блоку розрахунку та інших допоміжних елементів. Крім того, ефективність використання цього методу та розглянутої системи визначення координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею в основному залежить від точності реєстрації пострілу балістичної хвилі трьома наведеними вище акустичними вимірювальними приладами. У свою чергу, на точність реєстрації балістичної хвилі та успішність подальшої параболічної апроксимації впливає низка факторів, зокрема похибка вимірювання та ймовірність працездатності акустичних датчиків, їх розташування відносно лінії, напрямок вогню тощо. Оскільки акустичні вимірювальні прилади розміщуються в зоні стрільби заздалегідь, а положення артилерійських знарядь і координати цілей під час стрільби можуть змінюватися в залежності від отриманих вогневих завдань. Головне ж завдання, яке необхідно вирішити перед кожним пострілом, полягає у виборі трьох вимірювальних приладів з наявного набору, які б найкраще підходили для реєстрації балістичної хвилі. Для вирішення цього складного завдання доцільно використати метод визначення трьох акустичних датчиків реєстрації балістичної хвилі артилерійського пострілу, розробці якого присвячено дане дослідження. Отже, необхідно розробити модель і метод пошуку заданої кількості важливих вимірювачів серед великої кількості наявних по лінії стрільби, які б забезпечили реєстрацію балістичної і дульної хвиль для побудови сенсорної системи верифікації пострілів у зоні ведення артилерійської стрільби.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ВЕРИФІКАЦІЇ СКЛАДУ ТА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПІРОТЕХНІЧНОЇ СУМІШІ МЕТОДОМ БІБЛІОТЕКИ

В матеріалах розділу будуть представлені результати дослідження методу верифікації артилерійського заряду для підвищення ефективності стрільби на основі удосконалення моделі рівноважної термодеструкції порохової суміші за температурою суміші інертного та порохових газів у ємності фіксованого обсягу.

У розділі висвітлюватимуться результати таких досліджень. Насамперед буде представлено класичний метод і модель розв’язання задачі інтерпретації через зворотну задачу з визначення складу пального для використання в енергетичних додатках. Далі буде показано удосконалення такої моделі для рівноважної термодеструкції порохової суміші. Також буде наведено розроблену модель визначення температури суміші інертного газу та порохових газів у ємності фіксованого обсягу з випадковими збуреннями. Проведено верифікацію та валідацію методу розрахунку складу ПГ.

2.1 Метод розв’язання задачі інтерпретації через зворотну задачу визначення складу пального.

Не існує єдиного методу вирішення всього різноманіття зворотних некоректно поставлених задач. Кожен їх вид вимагає індивідуального підходу. В розділі розглядається метод розв’язання задачі інтерпретації через зворотну задачу з визначенню складу пального [26, 39]. Послідовність розв’язання. По-перше, визначення методу розв'язання задачі контрольованого спалювання газоподібного палива змінного складу. По-друге, метод пошуку розв’язання зворотної задачі інтерпретації.

2.1.1 Метод заповнення бібліотеки.

У процесі формування бібліотеки систематично накопичуються дані, які є розв'язками прямої задачі на основі шести ключових параметрів . Ці параметри включають кількість атомів основних хімічних елементів, що входять до складу брутто-формулі палива (b_C, b_H, b_O, b_N,). Крім того, враховується коефіцієнт надлишку повітря α, та ентальпія палива I_t,. Ці шість параметрів є фундаментальними для розрахунків, оскільки вони дозволяють вичерпано визначати основні хімічні та термодинамічні характеристики палива, необхідні для аналізу процесу горіння та його ефективності.

Якщо до складу палива азот *(N)* надходити виключно з повітря, тоді кількість b_N можна виключити зі списку змінних величин, оскільки вона буде розрахована через коефіцієнт надлишку повітря α. За рахунок цього кількість змінних у задачі може бути зменшена шляхом їх нормування , як зазначено у [26, 39]. Для впровадження оптимального процесу окислення палива немає потреби точно знати його брутто-формулу, адже достатньо визначити відношення кількості атомів відповідних хімічних елементів , що дає змогу знизити складність розрахунків.

Метод, що застосовується для таких завдань, передбачає, що кількість атомів вуглецю вважається рівною одиниці з метою нормування. Таким чином, брутто-формула палива набуває вигляду стандартизоване одиничне відношення атомів вуглецю, до водню, кисню та азоту, що значно спрощує моделювання та розрахунки. Це забезпечує можливість більше ефективного уявлення вихідних даних для наступних обчислень:

$$C_1 H_{(b_H/b_C)} O_{(b_O/b_C)} N_{(b_N/b_C)} \text{ або } C_1 H_{d_H} O_{d_O} N_{d_N} \tag{2.1}$$

Розглянемо метод представлення отриманих результатів у зручній формі для пошуку розв’язку.

1. Основний обсяг результатів розрахунку під час розв’язання прямої задачі складають парціальні тиски газів в суміші продуктів згорання.

2. Шляхом варіювання d_H, d_O, d_N і з (2.1) для кожного варіанта розв'язання прямої задачі задається певний склад і обчислюється молярний стехіометричний коефіцієнт співвідношення компонентів χ_0. З урахуванням $\chi = \alpha \cdot \chi_o$ і $\chi = \dot{V}_{ox}/\dot{V}_f$ зміна величини коефіцієнта α перераховується в зміну відношення вимірюваних об’ємів окиснювача ($\dot{V}_{ox}$) і пального ($\dot{V}_f$) $\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f$.

3. Для всіх можливих поєднань вихідних даних $\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f$ (α), d_H, d_O, d_N і I_t, що виникають при варіюванні цих величин, розв’язується пряма задача визначення температури утворених газоподібних продуктів. Існують розрахункові випадки, коли співвідношення складу пального і його ентальпія є несумісними з фізичної точки зору. Такі варіанти розв’язку не враховуються.

4. Для всіх наявних розв’язань прямої задачі множину вихідних даних d_H, d_O, d_N і I_t записують в нормованому вигляді. Для водню нормований вираз такий:

$$\bar{d}_H = \frac{d_H - d_H^l}{d_H^r - d_H^l} \cdot 100. \qquad (2.2)$$

5. Значення, що були нормовані, інтегрують в одне число «E_k» на основі позиційного принципу представлення десяткових чисел шляхом установки знайдених величин на відповідні його розряди. Було прийнято для визначеності в перші два розряди розмістити значення ентальпії, у другі два розряди розмістити значення нормованих результатів розрахунку кількості водню, у треті два розряди розмістити значення нормованих результатів розрахунку кількості кисню, у четверті два розряди розмістити значення нормованих результатів розрахунку кількості азоту. У результаті утворюються комплекси, в яких кожній парі значень результатів розв'язання прямої задачі (T і $\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f$) відповідає число-згортка, в якому існують значення відповідних їм вихідних даних.

6. Результати розрахунку (T і $\frac{\dot{V}_{ox}}{\dot{V}_f}$) піддаються структуризації в такий спосіб. Визначаються max [T^r, $(\frac{\dot{V}_{ox}}{\dot{V}_f})^r$] і min [$T^l$, $(\frac{\dot{V}_{ox}}{\dot{V}_f})^l$] значення. Діапазони їх зміни розбиваються на кілька інтервалів. Кількість інтервалів і, відповідно, величина кроку зміни кожної величини визначається доступною технологічною точністю вимірювання величин (T и $\frac{\dot{V}_{ox}}{\dot{V}_f}$) в процесі створення бібліотеки (рис. 2.1).

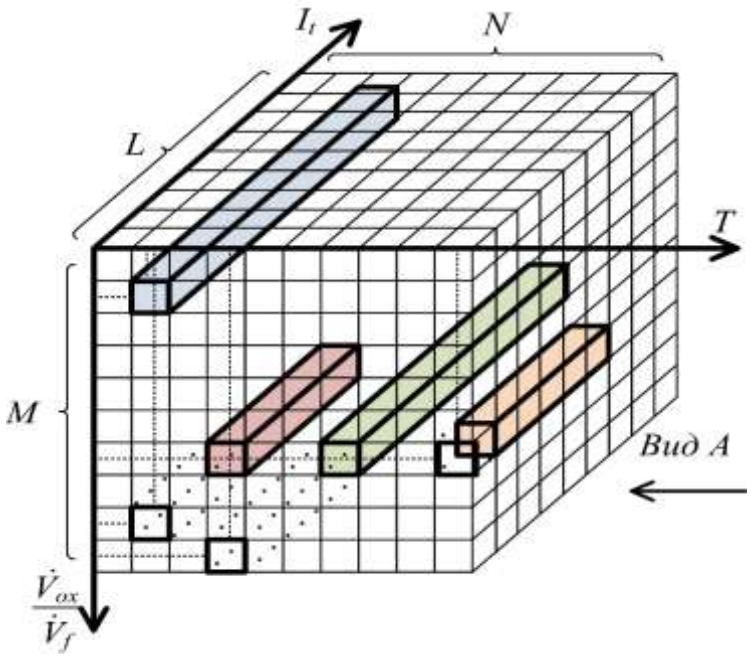

Рис. 2.1. Схема тривимірного масиву

Джерело: розроблено автором за [26]

7. Розв'язки (T и $\frac{\dot{V}_{ox}}{\dot{V}_f}$) прямої задачі і відповідні їм початкові умови, зведені в єдине число «E_k», на основі представлених даних заповнюється тривимірний масив (див.рис. 2.1). Площина $T - \frac{\dot{V}_{ox}}{\dot{V}_f}$ складається з комірок які мають розмір:

$$\Delta T = \frac{T^r - T^l}{N}; \Delta V = \frac{(\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f)^r - (\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f\,(\alpha))^l}{M}. \quad (2.3)$$

Границі комірок визначаються зі співвідношень:

$$\begin{cases} T_i^l = T^l + \Delta T \cdot (i-1); T_i^r = T^r + \Delta T \cdot i; i \in [0, N]. \\ (\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f)_j^l = (\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f)^l + \Delta V \cdot (j-1) \\ (\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f)_j^r = (\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f)^r + \Delta V \cdot j; j \in [0, M], \end{cases} \quad (2.4),$$

де *i, j* – номери комірок по осях T і $\frac{\dot{V}_{ox}}{\dot{V}_f}$ відповідно

8. Кожній комірці ставиться у відповідність вектор розмірності L, елементами якого є числа *«*E_k*»*. Розмір числа визначається значенням в першому (старшому) розряді. У разі значення у перших розрядах визначаються величиною ентальпії . Тому вісь векторів позначена як вісь ентальпій I_t. Крок зміни величини елементів з вектору визначається таким же способом (2.3), як і для T або $\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f$:

$$\Delta I_t = \frac{I_t^r - I_t^l}{L}, \quad (2.5)$$

а діапазон зміни ентальпій, що відповідає кожному з елементів вектору, визначається зі співвідношень:

$$(I_t^l)_k = I_t^l + \Delta I_t \cdot (k-1); (I_t^r)_k = I_t^r + \Delta I_t \cdot k; k \in [0, L]. \quad (2.6)$$

9. В елементах вектору розміщуються значення *«*E_k*»*, які знаходяться у відповідних їм межах:

$$E_k \in [(I_t^l)_k,\ (I_t^r)_k]. \quad (2.7)$$

Деякі елементи векторів виявляються незаповненими, тому що не всі комбінації складу палива $(\bar{d}_H,\ \bar{d}_O,\ \bar{d}_N)$ можуть бути реалізовані при розглянутому переліку ентальпій I_t. Елементи векторів упорядковані в напрямку зростання. Тому значення чисел *«*E_k*»* в межах кожного вектору також впорядковані в напрямку зростання. Отже, на основі розв’язання прямих задач сформований робочий масив.

2.1.2 Метод пошуку розв'язання зворотної задачі.

Методологія визначення складу речовини за допомогою організованого робочого тривимірного масиву «бібліотеки» передбачає системний підхід, спрямований на точне визначення властивостей палива.

1. Метод починається з регулювання та встановлення співвідношення обсягів споживання окиснювача та палива для кожного експериментального екземпляра, позначеного як $(\frac{\dot{V}_{ox}}{\dot{V}_f})_i$. За допомогою цього регулювання температура продукту згоряння T_i вимірюється для кожного випадку. Кількість змін і вимірювань узгоджується зі стандартизованими значеннями, що означає, що для палива, представленого типом (2.1), необхідні принаймні чотири чіткі вимірювання зворотного зв'язку. Отже, цей крок включає чотири послідовні серії вимірювань для формування повного набору даних $(\bar{d}_H,\ \bar{d}_O,\ \bar{d}_N,\ I_t)$, гарантуючи, що всі нормалізовані значення представлені точно.

2. Методичне змінювання та встановлюючи відношення окиснювача до об'єму палива, яке позначається як $(\frac{\dot{V}_{ox}}{\dot{V}_f})_i$, можна виміряти кінцеві температури згоряння, T_i для кожного окремого випадку. Загальна кількість вимірювань відповідає кількості нормалізованих значень, необхідних для ретельного аналізу. Наприклад, тип палива, визначений виразом (2.1), вимагає вимірювання зворотного зв'язку для чотирьох різних конфігурацій, що вимагає загалом чотирьох серій вимірювань для збору вичерпних даних. Кожна серія вимірювань дозволяє сформувати детальний набір даних, важливий для моделювання властивостей палива.

На основі зібраних вимірювань ідентифіковано чотири конкретні комірки в робочому тривимірному бібліотечному масиві на $T - \frac{\dot{V}_{ox}}{\dot{V}_f}$ - площині. Кожна комірка, позначена пунктирними контурами, як показано на малюнку 2.1, пов'язана кольоровими векторами, щоб візуально розрізняти відповідні точки даних. На поточному етапі цього методу аналізуються лише вектори, пов'язані з

цими виділеними клітинками, тоді як дані з інших векторів тимчасово відкладаються. У кожному векторі, позначеному E_k, зберігаються всі можливі комбінації значень, які забезпечують спостережувану температуру T_i для змінних $\bar{d}_H,\ \bar{d}_O,\ \bar{d}_N,\ I_t$), і значень у вказаних комірках. Ці вектори по суті діють для діапазону можливих станів, співвідносячи виміряні дані з потенційними конфігураціями.

3. Вибрані вектори, як показано на зображенні А на рис. 2.1, згодом проектуються на площину $\frac{\dot{V}_{ox}}{\dot{V}_f}$ – I_t. Ця проекція, представлена на рис. 2.2, підкреслює потенційне розміщення векторів у визначеній системі координат, пропонуючи чітку візуальну організацію даних. Структуруючи інформацію таким чином, можна простежити зв’язки між різними виміряними параметрами та співвідносити температурні дані зі значеннями ентальпії, забезпечуючи розуміння термічної динаміки. Ця систематична проекція закладає основу для більш точної інтерпретації даних.

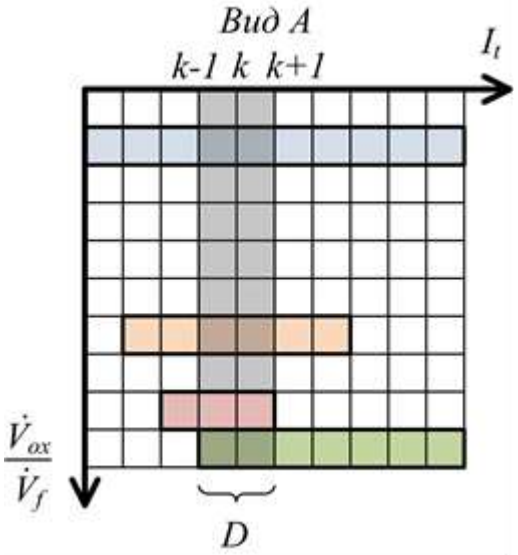

Рис. 2.2. Проєкції обраних векторів

Джерело: розроблено автором за [26]

4. У всіх комбінаціях об'ємна витрата паливного складу і його ентальпія залишаються постійними. Тому значення E_k чисел у всіх розглянутих векторах повинні бути однаковими і їм відповідати. На цій основі виділяються відповідні

елементи E_k чисел, які відображені ділянкою D на рис. 2.2. Значення ентальпії палива відображаються у верхніх цифрах. Тому в кожному інтервалі (k-1↔k і k↔k+1) елементи векторів містять набори вихідних даних (чисел E_k) з однаковими значеннями ентальпії. Точніше, ентальпії знаходяться в інтервалах $(I_t)_{k-1} \leftrightarrow (I_t)_k$ і $(I_t)_k \leftrightarrow (I_t)_{k+1}$ і визначаються точністю їх визначення.

5. Усі вибрані числа (ділянка D , рис. 2.2) заносяться до стека. Значення зі старших розрядів переноситься в кінець числа. Значення наступного значення переносяться у старші розряди. У межах розглянутих векторів решта чисел сортуються, наприклад, у порядку зростання. У результаті формується масив залишкових чисел.

6. Дії з пункту 4 повторюються, поки не будуть використані всі значення зі списку визначених значень (I_t, $\bar{d}_H$, $\bar{d}_O$, $\bar{d}_N$). Таким чином, на кожному кроці вибираються числа з двома однаковими старшими цифрами, які в даний момент відповідають одному із заданих значень. Так, при другому проході це $\bar{d}_H$, при третьому - $\bar{d}_O$ і так далі. З кожним проходом кількість чисел, що залишилися, зменшується. Зрештою, залишається одне. Він містить необроблені дані, які відповідають усім виміряним T_i при заданому $\frac{\dot{V}_{ox}}{\dot{V}_f}$. Це число є результатом розв'язання оберненої задачі.

2.2 Удосконалення моделі рівноважної термодеструкції порохової суміші.

2.2.1 Загальні положення зі створення моделі рівноважної термодеструкції НЦ порохів.

У ствольній артилерії для метальних зарядів використовують порохи на основі нітроцелюлози (НЦ). Властивості НЦ можуть змінюватися з часом, який впливає на властивості пороху під час його зберігання. Швидкість поповнення запасів порохів визначається виробничими та фінансовими можливостями.

Обсяги накопичення, терміни зберігання, якість запасів, що зберігаються і використовуються, визначаються зовнішніми чинниками.

Під час планового використання порохів із арсеналів за мирного часу є можливість забезпечення необхідних умов зберігання, проведення лабораторних досліджень їх якості, планової ротації зарядів, їх утилізації за потреби, однак це не допомагає уникнути процесу деградації НЦ в часі.

Під час інтенсивного, навіть екстремального (бойового) використання зарядів, які одночасно надходять на різні ділянки бойової роботи, поточний стан ускладнюється тим, що порохи можуть надходити від різних джерел (виробників) з різними вимогами по забезпеченню умов зберігання. В окремих випадках можуть поставлятися заряди з післягарантійними термінами зберігання або навіть з такою зміною характеристик, яка б вимагала їх утилізації за мирних умов. Використання таких зарядів без оцінкювання поточного стану та внесення необхідних поправок до параметрів стрільби веде до низької ефективності ураження цілей. А збільшення необхідної кількості пострілів веде до стрімкого зношення стволів. Водночас збільшення часу перебування на позиції бойових порядків призводить до зниження їх бойової стійкості.

Необхідність мінімізації часу та матеріальних ресурсів для вирішення бойових завдань потребує оцінювання стану наявних зарядів та, залежно від цього, внесення поправок до параметрів стрільби.

Протягом усього часу існування та застосування НЦ порохів розроблялися та вдосконалювалися різні методи верифікації в залежності від стану, в якому вони опинилися.

У роботах [71–75] розглянуто різні фактори впливу оточення на процес деградації НЦ порохів і зазначається на важливості врахування такого впливу. Розглянуті фактори визначають напрямок та на якісному рівні дають можливість розглядати умови, які роблять можливим зміну стану порохів. Але такий стан речей унеможливлює кількісне врахування зміни властивостей та вплив за весь

термін часу зберігання метальних зарядів. Тому неможливо для НЦ порохів, які надходять в бойові порядки з необхідною точністю, визначати їх стан та властивості в поточний момент часу.

Деградація НЦ пороху є неминучим процесом. Збереження необхідних кондицій порохових зарядів протягом більш тривалого часу може бути забезпечене не тільки за рахунок створення сприятливих умов зберігання, але й способом відновлення деяких втрачених ними властивостей. Такий шлях реалізації пропонується в роботі [76]. Розглядається можливість обробки НЦ пороху, що деградував, перекисом водню (H_2O_2). Було показано, що при регенерації порохових нітроцелюлозних зарядів H_2O_2 відбувається заповнення маси і збільшується теплотвірна здатність вихідного матеріалу. Такий результат може дозволити збільшити термін збереження балістичних характеристик порохових зарядів. Але, як і у вище розглянутих джерелах інформації, неможливе кількісне врахування результатів впливу перекису водню на визначення з необхідною точністю станів порохових зарядів в поточний термін часу.

З необхідною точністю станів зарядів може відбуватися оцінювання шляхом визначення їхнього поточного складу та енергетичного складника. Це потребує спільного використання кількох методів [76].

У [77] проводиться огляд наявних методів з оцінюванням переваг та недоліків. Ретельне визначення параметричної характеристики матеріалу має визначальне значення для забезпечення умов зберігання та дотримання безпеки протягом життєвого циклу. У разі повної інформативності розглянуті методи вимагають високотехнологічного обладнання, висококваліфікованого дослідницького персоналу та значного часу на проведення досліджень та аналіз отриманих результатів. Ця особливість унеможливлює використання розглянутих методів в умовах, близьких до польових або в бойових порядках.

У дослідженні [78] розглядається можливість визначення складу порохового заряду на основі аналізу продуктів згоряння з місця вибуху.

Розглядається модель виникнення саморобних кримінальних вибухових пристроїв. Потенційно в методологічному плані такий запропонований підхід є раціональним. Саме так може бути визначений склад заряду, визначений безпосередньо перед використанням. Але в бойових умовах для внесення додаткових поправок налаштувань гармат склад має бути відомим до пострілу.

Енергетику пострілу визначає сила пороху, яка при деградації пороху також змінюється. За класичною методикою випробувань його величина визначається за допомогою, наприклад, манометричної бомби [79] за зареєстрованою кривою тиску або з використанням адіабатичного бомбового калориметра [80], наприклад, IKA C2000 Basic . За визначенням сила пороху дорівнює добутку температури продуктів згоряння на постійну газову цих продуктів. В іншій формі визначення сили пороху фіксується як робота, яку можуть здійснити порохові гази (ПГ) при згоранні 1 кг пороху і розширенні їх при постійному атмосферному тиску. У будь-якому випадку сила пороху залежить від величини газової постійної та, зокрема, від складу продуктів згорання. Внаслідок деструкції порохів змінюватиметься склад ПГ. Отже, без визначення складу ПГ або поточного складу пороху виявлення лише його енергетичної характеристики не дозволяє коректно оцінити силу пороху.

Про склад пороху, його енергетичні характеристики можна судити за складом та фізичними параметрами продуктів термодеструкції ПГ. Але навіть про якісний склад ПГ немає єдиної думки. Більшість нітроцелюлозних порохів мають негативний кисневий баланс. Виникає питання, яким чином кисень, що входить до складу пороху, пов'язаний з вуглецем та воднем у ПГ. Так, у джерелі [81] стверджується, що до складу ПГ входять в основному газоподібні продукти реакції у вигляді пари H_2O, CO, CO_2, H_2 і N_2. Це відповідає правилу Кістяковського-Вілсона (Kistiakowsky-Wilson rule). Негативність кисневого балансу проявляється при аналізі утворення вільного водню. Таке припущення не підтверджується складом продуктів реакції горіння та вибуху

високоенергетичних нітрованих матеріалів. Зокрема, у роботах [82,83] відзначається наявність сажі у продуктах вибуху. У [84] як фіксується наявність сажі в дульному викиді, так і робиться спроба її кількісного оцінювання у процесі вивчення дульного спалаху (Muzzle Flash). Наявність великої кількості сажі відзначається на фотографіях дульного викиду (рис. 2.3) до початку дульного спалаху. Надалі в процесі спалаху сажа вигорає у кисні повітря.

У [85] пропонується використовувати модифіковане правило Кістяковського-Вілсона (Kistiakowsky-Wilson rule). Відповідно до нього кисень з нітросполук спочатку повністю зв'язує атоми водню з утворенням пари H_2O. Далі зв'язує атоми вуглецю до утворення CO. І лише потім кисень, що залишився, доокислює CO до CO_2 . При негативному кисневому балансі кисню не вистачає навіть для повного зв'язування атомів вуглецю до CO. На підставі цього можна пояснити появу в ПГ вільного вуглецю у вигляді сажі. Але така схема не передбачає утворення H_2 та помітної кількості CO_2 .

Рис 2.3 Приклад наявності сажі в дульному викиді під час пострілу з 152 мм гармати 2А36 «Гіацинт-Б».

Джерело: розроблено автором за [25]

Насправді склад ПГ не відповідає ні основному, ні модифікованому правилу Кістяковского-Вилсона. До їх складу входять, крім CO і пари H_2O, також CO_2 , H_2

і, як показано на рис. 2.3, вільний вуглець у вигляді сажі.

На склад ПГ, крім чинника хімічних процесів у вигляді негативного кисневого балансу, потенційно можуть впливати і теплофізичні параметри процесу пострілу. Так, в [83] зазначено, що на кількість вільного вуглецю, що утворився в процесі вибуху, впливає величина тиску. У [17] виявлено можливість створення умов для тривання реакції диспропорціонування *disproportionation* монооксиду *monoxide* вуглецю (реакція Будуара-Белла *Boudouard-Bellreaction)* на кінцевій стадії руху снаряда у стволі гармати. В момент проходження термодинамічної стадії (ПГ виконують роботу розширення) при відносному збереженні високого тиску ПГ величина їх температури зменшується до значення 1200К і менше. Особливістю перебігу реакції Будуара-Белла (2.8) є:

$$2CO\uparrow \rightarrow C\downarrow + CO_2\uparrow + (Q) \qquad (2.8)$$

– зменшення кількості речовини у газовій складовій ПГ, що впливає на величину утворення ними термодинамічної роботи;

– екзотермічність реакції, що збільшує утворенну ПГ термодинамічну роботу.

У переважній більшості випадків в умовах експерименту в лабораторних умовах не вдається відтворити в сукупності параметри, що відповідають термодинамічній стадії пострілу. У доступній літературі не виділяються умови забезпечення відповідності результатів експериментальних досліджень параметрам процесу пострілу.

Проведений аналіз показує необхідність розробки методу оперативної перевірки змін у часі поточного складу ПГ та енергетичної характеристики НЦ пороху.

2.2.2. Модель визначення температури суміші інертного газу та порохових газів у ємності фіксованого обсягу з випадковими збуреннями.

Для розв’язання поставленого завдання використано метод бібліотеки, який описано в [93] та в підрозділі 2.1. У [93] підкреслено принциповий розв'язок зворотної задачі – визначення вихідного складу та енергетичної характеристики (ентальпії) палива на основі вимірів технологічних параметрів продуктів згорання.

Метод бібліотеки [93] застосований для визначення складу газоподібного пального шляхом його спалювання в спеціальному пристрої проточного типу при різному співвідношенні пального та окислювача. Як окислювач використовувалося повітря. Для кожного співвідношення пального та окислювача фіксувалася температура продуктів згорання. За допомогою спеціального алгоритму зафіксовані величини співвідношення компонентів паливної суміші та відповідні значення температури продуктів згорання порівнювалися з показниками попередньо сформованої бази даних. Вона формувалася шляхом багаторазового розв’язання прямої задачі визначення складу та температури продуктів згорання за відомого складу паливної суміші пального та окислювача. Кількість атомів хімічних елементів у хімічній формулі пального (брутто-формулі), коефіцієнт надлишку окислювача та енергетична характеристика паливної суміші (ентальпія утворення) варіювалися в заданому діапазоні. Усі продукти згорання газоподібні.

Існує велика кількість пакетів програм, що дозволяють розраховувати склад та температуру продуктів згорання, що знаходяться як у газоподібному стані, так і за наявності конденсованої фази. Розробники прагнули до універсалізму створюваного програмного продукту, можливості використання широкого переліку вихідних горючих речовин. З огляду на це створювався інтерфейс з можливістю ідентифікації вихідної паливної речовини в ручному режимі. З іншого боку, здебільшого вихідні коди недоступні. Перелічені особливості

сприяли необхідності створення спеціалізованого, максимально простого програмного коду з можливістю автоматизованого завдання змінного складу досліджуваної речовини.

Застосування методу бібліотеки [93] для визначення складу та енергетичної характеристики порохового заряду неможливе без його модифікації. Це викликано низкою причин.

На відміну від [93] для формування бази даних повинна бути використана модель, яка враховує можливість (але не обов'язковість) утворення не тільки газоподібних продуктів реакції, а й конденсованої фази (сажі).

В основі запропонованого в [93] методу лежить зв'язок між співвідношенням кількості пального і окислювача паливної суміші, що спалюється, і температурою утворення продуктів згорання. У порохової суміші співвідношення окислювача та пального не може бути змінено. Порохова суміш знаходиться у твердому стані. Кількість пороху, що спалюється, не впливає на температуру порохових газів. Необхідно використання іншого механізму зв'язку температури порохових газів (продуктів згорання) з будь-яким змінним параметром вихідної порохової суміші.

Загальний підхід є стандартним під час складання таких моделей. З урахуванням обраного переліку можливих продуктів згорання кожного з них записуються рівняння, виходячи з закону діючих мас. Розглядається процес утворення елементарних хімічних елементів з відповідною константою хімічної рівноваги. Замість концентрацій продуктів термодеструкції використовуються їхні парціальні тиски [94]. Це зручно для реакцій, що протікають у газовій фазі. Кількість молей M_{pow} вихідної речовини (порохового заряду) вибирається таким чином, щоб чисельно парціальний тиск продуктів згорання дорівнювали їх концентраціям. Величина M_{pow} невідома і визначається в процесі розрахунку. Для замикання системи рівнянь використовується закон Дальтона – сума парціальних тисків газоподібних продуктів реакції дорівнює тиску камери згорання.

В цьому випадку як вихідна речовина, представлена порохова суміш, так і один із можливих продуктів сгоряння, сажа, існує в конденсованій фазі. Це інакше конденсований стан несе особливу складність, оскільки конденсовані речовини ведуть себе інакше, ніж гази в процесах згоряння, що впливають на динаміку теплопередачі та хімічних реакцій. Для простоти розрахунку і ясності більш практично виражати склад продуктів згорання в термінах мольних долей. Представлення компонентів продукту у вигляді мольних долей пропонує простий і стандартизований спосіб порівняння відносної кількості кожної речовини, що утворюється при згоранні, упрощаючи

Примітна особливість запропонованої моделі є її нетрадиційним підходом до вимірювання тиску. Замість використання більш типової одиниці паскаль (Па) ця модель використовує бари в якості одиниць для значень тиску. Цей вибір відповідає конкретній структурі розрахунку, що використовується в моделях, де частковий тиск газоподібних продуктів згорання встановлюється рівним їх мольним долям. Встановлюючи цю пряму пропорційність між частковим тиском і мольною долею, модель встановлює необхідність у перетвореннях між одиницями, оптимізуючи процес аналізу.

У довідковій літературі значення констант хімічної рівноваги K_P наводяться для запису рівнянь закону мас по парціальним тискам. При реалізації пропонованого підходу необхідно використання констант хімічної рівноваги за мольними частками K_X. Для оборотної реакції виду:

$$aA + bB \Leftrightarrow cC + dD \tag{2.9}$$

константи K_P і K_X пов'язані співвідношенням:

$$K_P = K_X \cdot P^{(c+d-a-b)} \quad \Rightarrow \quad K_X = \frac{K_P}{P^{(c+d-a-b)}}\,. \tag{2.10}$$

Тут $A\,, B\,, C\,, D$ – хімічні речовини, що беруть участь в реакції; $a\,, b\,, c\,, d$ –

мольні коефіцієнти; P – тиск суміші газоподібних продуктів реакції, виражений в Па; K_P – константа хімічної рівноваги за парціальними тисками (довідкова величина). Наприклад, для реакції виду:

$$H_2O \Leftrightarrow 2 \cdot H + O \quad \Rightarrow \quad K_X = \frac{K_P}{P^{(c+d-a-b)}} = \frac{K_P}{P^{(2+1-1)}} = \frac{K_P}{P^2} \, . \tag{2.11}$$

Однією з відмінностей від стандартного підходу є введення рівняння для визначення кількості сажі, що утворюється:

$$C_{crb} \Leftrightarrow C \quad \Rightarrow \quad \frac{P_C}{P_{C_{crb}}} = K_{X(C_{crb})}(T) \, . \tag{2.12}$$

Тут P_C , [бар] – парціальний тиск і одночасно мольна частка парів вуглецю, $P_{C_{crb}}$– мольна частка сажі, що утворюється, $K_{X(C_{crb})}(T)$– константа хімічної рівноваги для відповідної температури.

Різноманітність агрегатних складів для порохових газів і сажі несе особисті проблеми та унікальні можливості при формулюванні інших умов у рамках запропонованої моделі. Ці різні стани, зокрема конденсована фаза сажі в порівнянні з газоподібним станом пористих газів, вимагають корекції для точного впливу фізичного впливу кожного компонента під час горіння. При застосуванні закону збереження речовин, особливо у відношенні вуглецю, необхідно включити кількість сажі, що утворюється як частина продуктів згоряння. Сажа, що утворюється в результаті сгорання пороху, включається в урівноваження балансу, запропонованого підходу, використаного у моделі.

Закон Дальтона застосовується як заключне або остаточне уравнение в моделях. Це рівняння припускає, що газоподібні компоненти в совокупності вносять вклад в загальний тиск, пропорційний їх індивідуальним мольним долям, що відповідає властивостям ідеальних газів. Такий підхід покращує модель і дозволяє точно розрахувати склад газового згоряння, вільний від впливу конденсованої фази. Таким чином, остаточне ураження в цій моделі включає

мольні доли всіх компонентів утворення порохових газів (ПГ), що знаходяться при сгоранні, явно включаючи сажу як окрему сутність при розгляді загального складу. Цей підхід забезпечує більш повне представлення продукту сгорання, визнаючи при цьому обмежений вплив конденсованої фази.

Отримана система рівнянь є нелінійною. Використовуючи лінеаризацію рівнянь, розвязання системи виконуємо ітераційним методом. При лінеаризації також необхідно враховувати особливості рівнянь закону діючих мас внаслідок різного агрегатного стану ПГ та сажі. У вихідній моделі прийнято припущення незалежності при заданій температурі парціального тиску вуглецю від кількості його конденсованої фази. В цьому випадку при лінеаризації (2.12) похідна від P_C дорівнюватеме нулю. У моделі розрахунок ведеться за мольними частками. У цьому випадку компоненти P_C і $P_{C_{crb}}$ рівняння (2.12) мають однаковий сенс. При лінеаризації цього рівняння похідна береться від обох величин.

Розглянемо спалювання наважування пороху масою m_{pow} в замкнутій ємності обсягу V_{env} . Для уникнення зміни складу порохових газів за рахунок їх допалювання ємність заповнюється інертним газом, наприклад, азотом N_2 . У процесі реакції всі гази мають тиск, який можна порівняти з атмосферним. Гази вважаються ідеальними. Початкова кількість азоту в ємності визначається з рівняння стану ідеального газу:

$$P_{env}V_{env} = n_{N_2(env)}R_0T_{env} \quad \Rightarrow \quad n_{N_2(env)} = \frac{P_{env}V_{env}}{R_0T_{env}} . \qquad (2.13)$$

Тут індекс env позначає параметри середовища в ємності перед початком спалювання пороху. На основі мольних частин компонентів продуктів згорання пороху тиск порохових газів визначається сумою всіх їх компонентів за винятком P_{crb}. Після проведення розрахунку при відомому (заданому) складі порохової суміші, змінюючи значення від M_{pow} до $\widetilde{M}_{pow}$, можна визначити величину

кількості молей $\tilde{P}_{pow\ gas}$ суміші ПГ, що пропорційно змінюється. У такій же пропорції зміняться мольні частини $\tilde{P}_i$ газів, що входять в цю суміш, і мольна частка $\tilde{P}_{crb}$ сажі. У процесі розв'язання прямої задачі, крім складу продуктів згорання, визначається їх температура $T_{pow\ gas}$.

Після спалювання порохової суміші кількістю $\widetilde{M}_{pow}$ ємності об'ємом V_{env} відомо:

– кількість інертного газу $n_{N_2(env)}$ (2.13) та його температуру T_{env} до початку спалювання порохової суміші;

– кількість $\tilde{P}_i + \tilde{P}_{crb}$ суміші компонентів порохових газів та їх температуру $T_{pow\ gas}$.

На підставі цих даних може бути розрахована температура T_{mix} суміші інертного та порохових газів у цій ємності. Змінюючи кількість $\widetilde{M}_{pow}$ пороху, що спалюється, можна отримати різну величину температури T_{mix}.

Перед заповненням бібліотеки має бути визначено перелік хімічних елементів, що входять до складу всіх компонентів, та їх частка у пороховій суміші. Наприклад, у [17] використаний наступний склад (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Склад порохового заряду

Компонент	Речовина	%	Брутто- формула
Енергетична основа	нітроцелюлоза	96.0	$C_6H_{7.7}N_{2.3}O_{9.6}$
Пластифікатор	етанол	0.5	C_2H_6O
	діетиловий ефір	0.5	$C_4H_{10}O$
Стабілізатор хімічної стійкості	дифеніламін	1.0	$C_{12}H_{11}N$
Речовини-паразити	вода (волога)	2	H_2O

Джерело: розроблено автором за [25]

На підставі цих даних може бути визначена брутто-формула свіжої порохової суміші та її енергетична характеристика у вигляді, наприклад, її ентальпії утворення:

$$C_{6.08}H_{8.51}N_{2.23}O_{9.56}\ (C_{b_C}H_{b_H}O_{b_O}N_{b_N})\ ,\ \Delta H(298K),\ \frac{kJ}{mol} = -1400\ .\quad (2.14)$$

Деградація пороху призведе до зміни величин $b_C, b_H, b_O, b_N, \Delta H$. Відповідно до методу [93], при заповненні бібліотеки кожна з цих величин і m_{pow} повинні змінюватись у деякому діапазоні із заданим кроком. Всі поєднання їх значень повинні включати можливий варіант складу і енергетичної характеристики порохового заряду, що деградував. До кожного поєднання перерахованих параметрів вирішується пряме завдання визначення температури порохових газів. Але на відміну від [93] до бібліотеки повинна заноситись не температура порохових газів, а розраховуватись температура T_{mix} суміші інертного та ПГ у ємності.

На етапі заповнення бібліотеки розв'язання прямої задачі має бути виконане при варіюванні 6 величин. До них відносяться можлива кількість атомів відповідних елементів у брутто-формулі палива (b_C, b_H, b_O , b_N), можлива величина маси порохової суміші, що спалюється m_{pow}, і можлива величина ентальпії ΔH. При розбитті діапазону зміни кожної величини, наприклад, на 100 інтервалів потрібно $10^{2\cdot6}$ =1012 розв'язань прямої задачі.

Кількість рішень може бути зменшено шляхом нормування змінних, що варіюються. Кількість атомів у брутто-формулі порохової суміші та ентальпія її утворення умовні. Усі величини можуть бути пропорційно кориговані без зміни результатів рішення. Покладемо кількість атомів вуглецю в (2.14), що дорівнює 1. У цьому випадку всі величини в (2.14) будуть мати такі значення:

$$(C_1H_{\frac{b_H}{b_C}}O_{\frac{b_O}{b_C}}N_{\frac{b_N}{b_C}}),\frac{\Delta H}{b_C} = \frac{-1400}{b_C}\ \left(\frac{kJ}{mol}\right)\ , \qquad (2.15)$$

або

$$C_1H_{\frac{8.51}{6.08}}N_{\frac{2.23}{6.08}}O_{\frac{9.56}{6.08}} \Rightarrow \quad C_1H_{1.40}N_{0.37}O_{1.57}\ ,\quad \frac{\Delta H}{6.08} = -230\ \left(\frac{kJ}{mol}\right)\ .\quad (2.16)$$

При цьому пропорційно змінюється не m_{pow}, а величина молекулярної маси порохової суміші. Після нормування у всіх обчисленнях кількість атомів вуглецю залишається постійною. Проводиться варіювання інших величин. При такому підході та при розбитті діапазону зміни величин на 100 інтервалів кількість рішень прямої задачі зменшується у 100 разів.

Нормування може бути виконано за кількістю атомів будь-якого хімічного елемента брутто-формули порохової суміші. З огляду на широке коло можливостей, наданих пропонованим методом, є низка обмежень.

Загальноприйнятим є уявлення щодо ПГ як ідеальних. Але при описі реакцій, що тривають у процесі пострілу, слід враховувати коволюм порохових газів. Навіть за нормальних умов, близьких до умов проведення багатьох лабораторних досліджень, обсяг 1 моля різних газів хоча і близький до середнього значення ~ 0,0224 м^3 (0,02239 м^3), але все ж таки дещо різниться. У подальших дослідженнях слід визначити вплив таких відхилень від прийнятих умов на кінцевий результат.

Метод бібліотеки передбачає велику кількість варіантів розрахунку та, відповідно, великий обсяг зберігання їх результатів. Так, у цьому випадку при 100 кроках розбиття по кожній координаті кількість варіантів розрахунку становить 10^{10}. Зберігання результатів розрахунків, навіть перетворених на бінарний вигляд, вимагає кілька десятків ГБайт, а може вимагати і сотень ГБт пам'яті. Виконання розрахунків може проводитись у лабораторних умовах на кількох комп'ютерах одночасно. На заповнення бібліотеки може бути витрачена необхідна кількість часу. А ось використання бібліотеки має відбуватися в умовах, наближених до польових. Сучасні компактні засоби накопичення інформації можуть мати необхідний обсяг пам'яті. Але зі зменшенням обсягу пам'яті підвищується надійність таких пристроїв. Таким чином залишається актуальним завдання зменшення обсягу результатів розрахунків, що зберігаються.

Одним із шляхів вирішення цього завдання є обґрунтоване визначення меж зміни відповідного параметра з метою зменшення величини досліджуваного інтервалу. Це можливо при збереженні величини кроку зміни параметра, що досліджується, а також видається можливим зменшити кількість кроків на досліджуваному інтервалі при збереженні точності розв'язання задачі. З іншого боку, зменшення інтервалу дослідження якого-небудь параметра при заданій кількості кроків дозволить зменшити їхню величину та, відповідно, збільшити точність дослідження.

Ще одним напрямом у вирішенні задання зменшення обсягу збережених результатів розрахунків може бути використання змінної величини кроку зміни параметра, що досліджується. Ймовірність знаходження величини досліджуваного параметра різних частин аналізованого інтервалу є неоднорідною. Густота ймовірності такого розподілу може бути визначена шляхом накопичення статистичних даних на етапі лабораторних досліджень складу порохових зарядів однакового вихідного складу, але який деградував за різних умов.

2.3. Верифікація та валідація методу розрахунку складу ПГ

Верифікація (verification) модифікованого алгоритму та програми розрахунку проведена шляхом порівняння отриманих результатів з даними [94]. Таблиці [94] взяті за основу для представлення широкої інформації. Термодинамічні характеристики та склад продуктів згорання наведені як у момент утворення, так і в процесі їх розширення в камері згорання та сопловому апараті ракетного двигуна. Це відповідає характеру зміни стану порохових газів у процесі пострілу у завданнях внутрішньої балістики ствольних систем. Розглянуто випадки як газоподібних продуктів реакції, так і за наявності у продуктах згорання конденсованої фази.

Розглянуто реакцію горіння метану (CH_4) у повітрі при коефіцієнті

надлишку окислювача $\alpha = 0{,}6$; $\alpha = 0{,}8$. Компоненти паливної суміші та величина α обрані на підставів таких припущень: наявності в паливній суміші тих же хімічних елементів, що і в порохової суміші; величина $\alpha<1$ характеризує негативний кисневий баланс паливної суміші, що відповідає складу порохової суміші.

Розрахунок процесу рівноважного перетворення паливної суміші в продукти згорання будується на основі його ізоентальпійності . У процесі розрахунку енергетичний баланс може бути встановлений для заданого складу паливної суміші та певного набору продуктів згорання. У табл. 2.2 для вибраних значень α наведено значення температури продуктів згорання, їх мольні частки [94] та відповідні результати розрахунку. Наведено відносну похибку ε (%) визначення цих величин по відношенню до даних [94] .

Розрахунок рівномірного процесу перетворення паливної суміші в продуктах згорання заснованої на концепції ізоентальпії, що означає, що загальна ентальпія залишається постійною на всьому протязі перетворення. Це припущення про ізоентальпійних умовах дозволяє проводити цілеспрямований аналіз реакцій горіння, зберігаючи енергію в системі. У ході розрахунку встановлюється енергетичний баланс, адаптований до конкретного складу вихідної паливної суміші та відповідному набору продуктів згоряння. Цей баланс гарантує, що вся виділена або поглинена енергія утворена, що дає четверте представлення про те, як паливна суміш переходить в побічні продукти згоряння.

У таблиці 2.2 представлені основні результати для різних вибраних значень співвідношення повітря-топливо, позначених як α. Наведено відносну похибку ε (%) визначення цих величин по відношенню до даних [94] .

Порівняння наданих значень вказує на узгодження між даними з [94] і результатами розрахунку. Відносні похибки складу залишаються в межах 2–3%, а температурні розбіжності – 0,4%. Ця невелика похибка, яка залишається нижче прийнятого 5% порогу для інженерних розрахунків, свідчить про правильність

коригувань моделі та алгоритму розрахунку. Деякі похибки можуть виникати через відмінності між паливною сумішшю, яка використовується в розрахунках, і тією, що наведена в [94].

Таблиця 2.2 − Температура та склад у мольних частках продуктів згорання суміші CH_4 + повітря для різних величин α

Параметри		α=0,6			α=0,8		
		[*94*]	Розрахунок	ε, %	[*94*	Розрахунок	ε, %
1	T, [K]	1784	1777	0,4	2098	2094	0,2
2	H	0	0	-	0,0004	0	-
3	H_2	0,1137	0,1157	1,75	0,0348	0,0357	2,6
4	H_2O	0,1513	0,1496	1,1	0,1856	0,1850	0,32
5	N_2	0,5943	0,6021	1,3	0,6598	0,6689	1,4
6	CO	0,0988	0,0971	1,7	0,0537	0,0528	1,7
7	CO_2	0,0346	0,0356	2,9	0,0575	0,0576	0,2

Джерело: розроблено автором за [25]

У [94] враховано незначні домішки водяної пари як у метані, так і в повітрі, а також незначну присутність азоту в метані. До складу повітря входили аргон і вуглекислий газ, які в розрахунках були представлені азотом. Крім того, [94] вказує джерела термодинамічних даних як для вихідних речовин, так і для продуктів згоряння, хоча не описує метод їхнього застосування: або як табличні значення, або як наближені залежності. Вихідні дані використовувалися в цих розрахунках як наближені залежності (поліноми 6-го ступеня), які можуть вносити незначні варіації в порівнянні з табличними значеннями.

Переглянута модель дозволяє визначати рівноважний склад сумішей продуктів згоряння при змінних температурах, зберігаючи незмінний склад паливної суміші. Компоненти цих горючих сумішей можуть існувати в газоподібній або конденсованій фазі. Ця модель може зображати розширення порохових газів для проблем внутрішньої балістики або розширення продуктів у камері згоряння та соплі ракетного двигуна. У таблиці 2.3 наведено рівноважний молярний склад продуктів згоряння метан-повітря при α=0,6 під час згоряння (перший стовпець) та під час їх охолодження (процес розширення). Таблиця 2.3

також показує можливість утворення конденсованої фази у вигляді сажі (crb). Результати розрахунків разом з даними таблиці 2.2 та [94] підтверджують відсутність утворення сажі при спалюванні палива.

Переглянута модель дозволяє визначати рівноважний склад сумішей продуктів згоряння при змінних температурах, зберігаючи незмінний склад паливної суміші. Компоненти цих горючих сумішей можуть існувати в газоподібній або конденсованій фазі. Ця модель може зображати розширення порохових газів для проблем внутрішньої балістики або розширення продуктів у камері згоряння та соплі ракетного двигуна. У таблиці 2.3 наведено рівноважний молярний склад продуктів згоряння метан-повітря при α=0,6 під час згоряння (перший стовпець) та під час їх охолодження (процес розширення). Таблиця 2.3 також показує можливість утворення конденсованої фази у вигляді сажі (crb). Результати розрахунків разом з даними таблиці 2.2 та [94] підтверджують відсутність утворення сажі при спалюванні палива.

Наведені у табл. 2.3 результати розрахунку вказують на появу та збільшення частки конденсованої фази зі зменшенням температури суміші продуктів згорання.

Таблиця 2.3 − Рівноважний склад продуктів згорання суміші метану в повітрі ($\alpha = 0{,}6$) за різної їх температури

T, [K]	1777	1300	900	400
H_2O	0,1496	0,1366	0,1570	0,2650
CO_2	0,0356	0,0493	0,0691	0,0264
CO	0,0970	0,0825	0,0227	0,0000
H_2	0,1156	0,1286	0,1083	0,0002
N_2	0,6021	0,6021	0,6021	0,6021
C_{crb}	0,0000	0,0008	0,0409	0,1062

Джерело: розроблено автором за [26]

На рис. 2.4 відображено характер зміни мольних часток C_{crb}, CO_2, CO в рівноважній суміші продуктів згорання в процесі охолодження.

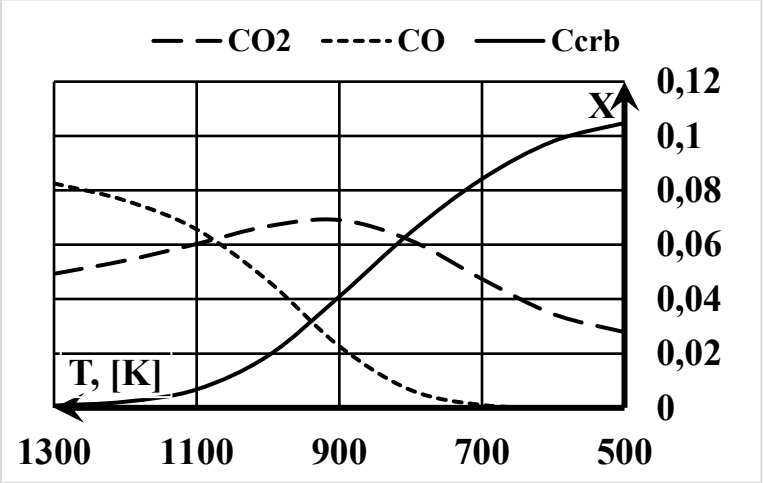

Рис. 2.4. Залежність зміни мольних часток C_{crb}, CO_2, CO в рівноважній суміші продуктів згорання від температури в процесі охолодження для суміш метану з повітрям α=0,6.

Джерело: розроблено автором за [25]

В багатьох дослідженнях розглядається така реакція:

$$C + CO_2 \leftrightarrow 2 \cdot CO \uparrow . \qquad (2.17)$$

Однак у деяких випадках спостерігається зворотність. При температурах до ~1300 К баланс майже повністю поміщається в сторону утворення оксиду вуглецю (CO), хоча зворотна реакція залишається екзотермічною. Це приводить до сценарію, в якому в реалістичних умовах згоряння вуглеводородів з обмеженою кількістю окиснювача і більш низькими температурами згоряння продуктів утворюється оксид вуглецю (CO).

Розрахунки балансового складу для такої суміші передбачають утворення певної кількості вільного вуглецю (рис. 2.4). Це відбувається в результаті ендергонічних реакцій диспропорціонування, приводячих до вільного вуглецю.

Приблизно при 400К термодинамічний баланс реакцій Будуара-Белла зміщено до утворення діоксиду вуглецю і сажі. Результати розрахунків узгоджуються з цим спостереженням (рис. 2.4). Але за нормальних умов (або близьких до них) монооксид вуглецю стійкий унаслідок малої швидкості реакції диспропорціонування.

Розрахований склад (рис. 2.4) показує одночасне збільшення вільного вмісту вуглецю C_{crb} і CO_2 в діапазоні температур 1300-1000 K за рівнем зменшення CO. Це підтверджує висновки з [95], в якому цей температурний діапазон визначається як оптимальний для продовження диспропорціонування оксида вуглецю. При подальшому зменшенні температури в рівноважному складі продуктів згорання джерелом вільного вуглецю, крім CO, стає CO_2 (рис. 2.4), що свідчить про його зменшення.

Результати розрахунків з використанням модифікованої моделі відповідають даним [96]. Зміни температури газоподібного оксиду вуглероду (CO) впливають на рівноважний склад, потенційно включаючи змінювані кількості вмісту в якості конденсованої фази. В реакції диспропорціонування з участю 1 м³ CO при температурі 650°C (923K) і 500°C (773K) може відбуватися утворення в кількості 209 грамів і 259 грамів відповідно, що погоджується з висновками [96].

Тестування модифікованого алгоритму та програми розрахунку дозволяє оцінити вплив вибраного списку продуктів, зібраних на результати розрахунку. Для цього були проведені розрахунки по визначенню температури і молярного складу при варьируемом списку продуктів згоряння, при збереженні вихідного складу паливної суміші. Розрахунки виконані для $\alpha = 0{,}6;\ \alpha = 0{,}8$. Результати наведено у табл. 2.4.

У стовпцях з номером 1 для різних значень наведені величини, відповідні розрахунковим даним з табл. 2.2. У стовпцях 2 наведено результати розрахунку температури та складу продуктів згорання при уникненні з розгляду водню. У

стовпцях 3 наведено результати розрахунку з урахуванням можливої присутності у продуктах згорання водню, а також аміаку, формальдегіду, метанолу. У низці джерел такі речовини розглядаються як складові в суміші продуктів згорання порохових сумішей. Порівняння отриманих результатів (стовпці 2 та 3) з базовим варіантом (стовпчик 1) вказує на необхідність коректного визначення переліку речовин у суміші продуктів згорання.

Таблиця 2.4 − Температура та склад у мольних частках продуктів згорання суміші CH_4+повітря для різних величин α та різного переліку продуктів згорання

Параметри		α=0,6			α=0,8		
		початковий	без H_2	додаткова складова	початковий	без H_2	додаткова складова
		1	2	3	1	2	3
1	T,[K]	1777	754	1848	2094	2071	2107
2	H	0	0.1483	0	0	0	0
3	H_2	0,1157	-	0.0682	0,0357	-	0.0291
4	H_2O	0,1496	0.1714	0.1440	0,1850	0.2207	0.1817
5	N_2	0,6021	0.5575	0.6070	0,6689	0.6689	0.6703
6	CO	0,0971	0.1228	0.0884	0,0528	0.0885	0.0483
7	CO_2	0,0356	0	0.0492	0,0576	0.0219	0.0629
8	NH_3	0	0	0.0422	0	0	0.0077
9	CH_2O	0	0	0.0003	0	0	0.0001
10	CH_4O	0	0	0.0005	0	0	0

Джерело: розроблено автором за [25]

Метод бібліотеки [93] може бути використаний для визначення складу будь-якої речовини, що спалюється, зокрема і порохової суміші при дотриманні деяких вимог. До їх переліку входять: по-перше, забезпечення сталості складу досліджуваного речовини при її пробному спалюванні, по-друге, коректне визначення переліку продуктів згорання. На рис. 2.5 представлено фотографію зразків гранул одного з порохових зарядів, який перебував на зберіганні 38 років. Відмінність у його кольорі свідчить про нерівномірності зміни складу гранул навіть у межах одного заряду. Дотримання сталості їх складу в умовах проведення

необхідних експериментів (пробних спалювань) може бути забезпечене, наприклад, шляхом попереднього візуального сортування за кольором. Визначення складу частин заряду різного ступеня деградації та усереднення одержаних результатів дозволить визначити брутто-формулу всього заряду.

Рис. 2.5 . Зразки гранул порохового заряду.

Джерело: розроблено автором за [25]

Під час розв'язання задачі внутрішньої балістики у багатьох випадках процеси термодеструкції порохового заряду вважаються рівноважними. При цьому в процесі розширення порохових газів їх склад вважається незмінним і рівноважним. І як наслідок, результати лабораторних досліджень використовують без змін під час розгляду процесів внутрішньої балістики. Але внаслідок кінетичних обмежень (хімічна кінетика) за всіма можливими внутрішньобалістичними реакціями в лабораторних умовах встановлюється хімічна рівновага, але виявлення таких реакцій не проводиться. Це може бути причиною виникнення розбіжностей щодо складу порохових газів на основі, наприклад, правила Кістяковського-Вілсона (Kistiakowsky-Wilson) rule) [81] або модифікованого правила Кістяковського-Вілсона [85]. Загальною є відсутність у переліку продуктів термодеструкції порохових сумішей конденсованої фази.

З одного боку, відсутність сажі в порохових газах підтверджується численними лабораторними дослідженнями. На рис. 2.6 наведено фото процесу горіння зразка (червоний контур) пороху (рис. 2.5) у замкнутому об’ємі. З іншого боку, наявність сажі у значних кількостях фіксується у дульних викидах

порохових газів (рис. 2.1). Така істотна відмінність у результатах термодеструкції пороху в процесі пострілу та в лабораторних умовах може бути пояснена термокінетичними умовами перебігу реакції диспропорціонування монооксиду вуглецю. Зниження температури змінює термодинамічну рівновагу у бік утворення конденсованої фази.

Рис. 2.6. Горіння зразка НЦ пороху

Джерело: розроблено автором за [25]

При кімнатній температурі рівновага реакції (2.17) повністю зміщається ліворуч. Але швидкість цієї реакції настільки мала, що у лабораторних умовах монооксид вуглецю стійкий. У процесі пострілу на момент виходу снаряда зі ствола гармати температура порохових газів знижується до величини, відповідної до зміщення термодинамічної рівноваги реакції диспропорціонування у бік утворення сажі. При цьому високий тиск, відповідний принципу Ле Шательє (Le Chatelier), сприяє зміщенню рівноваги у напрямку утворення конденсованої фази. Так, у момент виходу снаряда зі ствола гармати тиск порохових газів може становити ~50 МПа. Реакція диспропорціонування *CO* має другий порядок. У цьому випадку швидкість утворення сажі в ствольній системі порівняно з лабораторними умовами (0,1 МПа) при однакових температурах порохових газів зростає в ~ $(50/0,1)^2$ або 250 000 разів.

При використанні результатів лабораторних досліджень складу пороху у розвязанні задачі внутрішньої балістики необхідно враховувати зазначені особливості утворення порохових газів. Сила пороху визначається його теплотою згорання і складом порохових газів через постійну газову їх суміші. Утворення у

процесі пострілу конденсованої фази змінює як склад порохових газів, та їх енергетичну характеристику. Склад порохових газів може змінюватися по довжині ствола гармати відповідно до зміни температури. Розрахунок складу порохових газів для лабораторних умов повинен проводитись без урахування реакції диспропорціонування монооксиду вуглецю. При розв'язанні задачі внутрішньої балістики кінетику цієї реакції необхідно враховуватися обов'язково.

2.4 Результати верифікації складу та енергетичної характеристики НЦ пороху бібліотеки.

Модифікована модель та алгоритм розрахунку процесу рівноважної термодеструкції порохової суміші дає можливість визначення рівноважного складу продуктів горіння, що містять як газоподібну, так і конденсовану фази, де замість їх парціальних тисків або концентрацій використані мольні частки. Тому виникла потреба коригування запису лінеаризованого рівняння закону мас для врахування конденсованої фази і кінцевого рівняння. На основі констант хімічної рівноваги, що наводяться у довідковій літературі для парціальних тисків, записані відповідні константи для мольних часток.

Розроблено модель визначення температури суміші інертного газу та порохових газів після спалювання порохової суміші відомої маси у замкнутій ємності відомого складу. Розрахунок такої температури необхідний для визначення складу порохових газів під час заповнення бібліотеки. Модель для розрахунку складу порохових газів при заповненні бібліотеки, що використовується в [93], побудовано на основі можливості зміни співвідношення газоподібного окислювача та пального. Внаслідок цього змінювалася температура продуктів згорання. Особливістю горіння порохової суміші є незмінність температури порохових газів за зміни маси пороху. Особливістю запропонованої моделі є можливість моделювання зміни температури газоподібної суміші інертного газу та порохових газів у ємності при зміні маси пороху, що спалюється.

Проведено верифікацію та валідацію методу розрахунку складу порохових

газів для заповнення бібліотеки. Показано коректний збіг результатів розрахунків із наявними даними при газоподібних продуктах горіння. Відносні похибки за складом не перевищують 2–3 %, а температури – 0,4 %. Незначна похибка (у допустимому діапазоні точності для інженерних розрахунків, <5 %) свідчить про коректність внесених змін у модель та алгоритм розрахунків.

Продемонстровано адекватний характер відображення зміни кількості конденсованої фази (сажі) при зміні температури та збіг кількісних характеристик у реперних точках.

Визначення рівноважного складу продуктів реакції на основі методів хімічної кінетики засноване на встановленні балансу маси між продуктами, що утворилися, і вихідними речовинами з урахуванням величин констант хімічної рівноваги. При постійному складі вихідних речовин такий баланс може бути встановлений для різного переліку можливих продуктів реакції. При цьому будуть різні температури та кількісний склад продуктів реакції. Для отримання коректного рішення висувається вимога визначення переліку (якісного складу) можливих продуктів реакції горіння порохової суміші заданого складу.

РОЗДІЛ 3

УДОСКОНАЛЕНІ МОДЕЛЬ І МЕТОД АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ БОЙОВОЮ РОБОТОЮ АРТИЛЕРІЙСЬКОГО ПІДРОЗДІЛУ

У розділі розглянуто результати дослідження, яке полягало в удосконаленні методів та моделей бойової роботи причіпних артилерійських установок, в основу яких покладено використання стохастичних процесів. З цією метою було виконано низку завдань.

Розроблено стохастичну імітаційну модель бойової роботи причіпних артилерійських установок, що дозволило врахувати випадковий характер таких параметрів, як швидкість снаряда, час на перезарядку, ймовірність виявлення супротивником, та інтегрувати зовнішні збурення, такі як погодні умови та технічний стан артилерійських установок перед здійснення пострілу.

Проведено моделювання за умовами зміни вогневих позицій причіпних артилерійських установок, що дозволило врахувати час на транспортування до бойової позиції та можливі втрати боєздатності під час руху, також ризик виявлення та атаки з боку супротивника під час транспортування до бойової позиції. Розробити алгоритми для визначення оптимальних стратегій зміни вогневих позицій.

Розроблено моделі бойової роботи окремої самохідної артилерійської системи нового покоління на базі моделі причіпної артилерійської системи. Для цього розроблено методику динамічного оцінювання поточного стану боєздатності окремої САС. Розроблено дерево станів боєздатності окремої САС та виявлено рівень залежності кількості пострілів САС, необхідних для ураження цілі підвищеної небезпеки впродовж заданого інтервалу часу.

3.1 Імітаційне моделювання артилерійських операцій на основі Марківських процесів.

Більшість ранніх робіт у галузі моделювання бойових дій базуються на детермінованих моделях. Наприклад, роботи [17, 33] пропонують моделі, які використовують фіксовані параметри для опису дій артилерійських установок. Ці моделі не враховують випадковий характер багатьох параметрів, що призводить до спрощення моделювання та зниження реалістичності. Проте вони є важливими з точки зору початкового підходу до моделювання бойових дій та закладають основу для подальших досліджень.

Стохастичні моделі, зокрема Марківські процеси, набули широкого застосування в моделюванні систем з випадковим характером параметрів. У роботах [17, 19, 20] досліджується використання Марківських процесів для моделювання різних аспектів бойових дій. Ці моделі дозволяють враховувати ймовірні стани системи та переходи між ними, що значно підвищує точність та реалістичність моделювання. Наприклад, у роботі [19] запропоновано модель бойових дій, що враховує випадковий характер швидкості снаряда, часу на перезарядку та ймовірності виявлення ворогом.

Зміна вогневих позицій артилерійських установок є важливим аспектом, який впливає на ефективність бойових дій. У роботах [20, 67] розглядаються різні методи моделювання цього процесу. Зокрема, у роботі [20] пропонується модель, що враховує час на транспортування, можливі втрати боєздатності під час руху та ризик виявлення та атаки з боку супротивника. Розроблені моделі бойових дій знаходять широке застосування у військових симуляторах. Наприклад, у роботі [19] описується використання стохастичних моделей у військовому симуляторі для підготовки військових спеціалістів.

Таким чином, проведений аналіз свідчить про значний інтерес наукової спільноти до проблеми моделювання бойових дій артилерійських установок та використання стохастичних процесів. Проте існує потреба в подальших

дослідженнях для удосконалення методів та моделей, що дозволить підвищити реалістичність та ефективність моделювання з точки зору поєднання процесів бойової роботи та логістичних процесів виходу на позицію стрільби.

Досягнення поставлених завдань дозволить підвищити реалістичність та ефективність моделювання бойової роботи артилерійських установок, що сприятиме створенню більш реалістичного та достовірного бойового досвіду. Крім того, розроблені моделі можуть бути використані у військових симуляторах та тренажерах для підвищення рівня підготовки військових спеціалістів та розробки ефективних стратегій ведення бойових дій.

Зміна вогневих позицій артилерійських установок є важливим аспектом бойової роботи, що впливає на їх ефективність та боєздатність. Розглядаються основні елементи моделювання зміни вогневих позицій, включаючи час на транспортування, втрати боєздатності під час руху та ризик виявлення і атаки з боку супротивника. Логістичні операції, такі як час на транспортування артилерійської установки між вогневими позиціями є критичним параметром, що визначає оперативність зміни позицій та можливість швидкого реагування на зміну бойової обстановки. Для моделювання цього аспекту враховуються такі фактори.

По-перше, час на транспортування, який безпосередньо залежить від відстані, що необхідно подолати артилерійській установці. Для кожної пари вогневих позицій визначається відстань на основі карти місцевості та маршруту пересування. По-друге, швидкість транспортування, яка залежить від типу артилерійської установки, технічного стану транспортного засобу та умов місцевості. Наприклад, пересування бездоріжжям або ж у важких погодних умовах може знижуватися швидкість. По-третє, враховуються такі можливі перешкоди, як рельєф місцевості, наявність ворожих військ або інженерних загороджень. Перешкоди можуть збільшувати час на транспортування або навіть робити певні маршрути непридатними для пересування.

Під час транспортування артилерійські установки можуть зазнавати втрат боєздатності через різні фактори. Для моделювання втрат боєздатності враховуються такі стани. Під час руху можуть виникати такі технічні несправності, як поломка ходової частини або пошкодження системи озброєння. Вірогідність таких пошкоджень визначається технічним станом установки та умовами транспортування. Під час транспортування установка може бути виявлена супротивником і, відповідно, зазнає атак з боку ворожих сил. Вірогідність атак визначається рівнем маскування установки та активністю ворожих сил у районі транспортування.

Для моделювання бойової роботи артилерійських установок була розроблена детальна стохастична імітаційна модель, яка базується на Марківських процесах. Основними елементами цієї моделі є стани системи, ймовірні переходи між станами та зовнішні збурення, що впливають на поточну ефективність бойової роботи артилерійських установок.

У практичному моделювання бойової роботи артилерійських установок використовуються Марківські процеси, які дозволяють враховувати випадковий характер багатьох параметрів. Основними компонентами Марківських процесів є стани системи, ймовірності переходів між станами та зовнішні збурення, що впливають на ефективність бойової роботи. На рис. 3.1 представлено Марківський граф станів та перехідних ймовірностей, в основу якого покладено перелічені вище можливі стохастичні процеси. На рис.1 введено наступні позначення: T_n - відправний стан системи, який відповідає початковій позиції батареї, в захованій позиції, перед початком виконання завдання, з n боєздатними установками. S_n - стан системи під час стрільби з n - боєздатними установками.

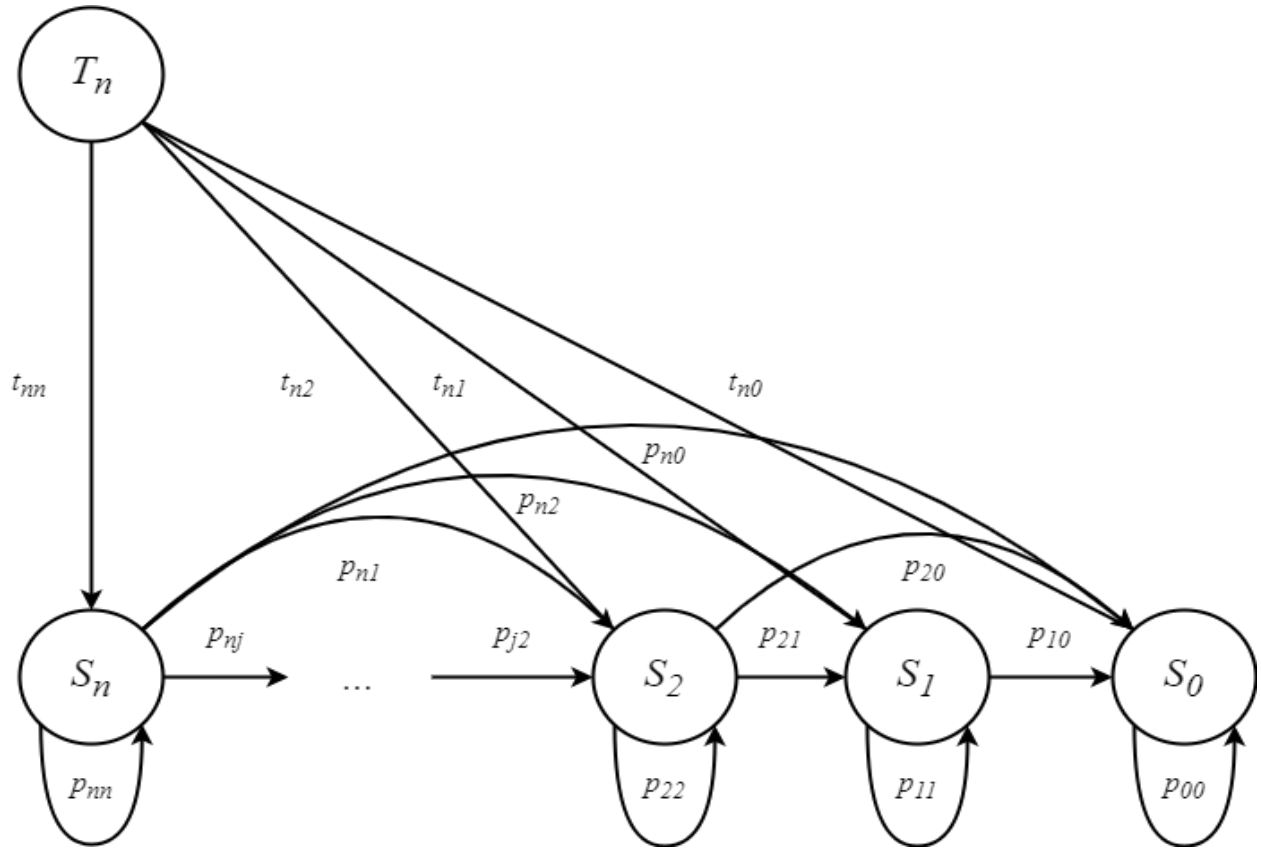

Рис. 3.1. Марківський граф станів та перехідних імовірностей з врахуванням транспортування гармат.

Джерело: розроблено автором за [35]

Матриця переходу станів має вигляд (3.1). Матриця переходу станів описує ймовірності переходів між різними станами системи. Для станів T_n і S_n матриця переходу може бути представлена у вигляді:

$$\mathrm{P} = \begin{vmatrix} t_{tt} & t_{nn} & \dots & t_{n2} & t_{n1} & t_{n0} \\ t_{nt} & p_{nn} & \dots & p_{n2} & p_{n1} & p_{n0} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{2t} & 0 & \dots & p_{22} & p_{21} & p_{20} \\ t_{1t} & 0 & \dots & 0 & p_{11} & p_{10} \\ t_{0t} & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \qquad (3.1)$$

де: t_{nj} - ймовірність переходу від стану T_n до стану S_j (логістичні операції), p_{ij} - ймовірність переходу від стану S_i до стану S_j (бойові операції), t_{jt} - ймовірність переходу від стану S_j до стану T_n. Батарея не може повернуться у початкову позицію, тому $t_{jt} = 0$, після виконаної роботи займає нову позицію.

Значення для ймовірностей переходів для станів S_i і S_j. Ймовірності переходів визначаються так:

для $i = 1 \dots n$ $\quad p_{i0} = 1 - \sum_{j=1}^{n} p_{ij}$

$$p_{ij} = \begin{cases} C_i^j p^j q^{i-j}, \text{якщо } j \le i \\ 0, \text{ якщо } j > i \end{cases} \quad (3.2),$$

де p – ймовірність здійснення ефективного пострілу та успішного транспортування.

$$p_j = p * (1 - s), \quad (3.3),$$

де s -ймовірність враження батареї ворожим вогнем,

$$p = p_1 * p_2 * p_3, \quad (3.4),$$

де p_1 - ймовірність пострілу з відсутністю збурення у вигляді зношеності зарядної камори, p_2 - ймовірність пострілу з відсутністю збурення у вигляді зношеності ствола, p_3 - ймовірність пострілу з відсутністю збурення у вигляді невизначеності заряду.

$$p_1 = p(\Delta v_0^{\lambda_chamb}), p_2 = p(\Delta v_0^{\lambda_barrel}), p_3 = p(\Delta v_0^{\lambda_charge}) \quad (3.5)$$

Ймовірність впливу відповідного вияву збурення представимо як:

$$\begin{cases} q_1 = 1 - p(\Delta v_0^{\lambda_chamb}) \\ q_2 = 1 - p(\Delta v_0^{\lambda_barrel}) \\ q_3 = 1 - p(\Delta v_0^{\lambda_charge}) \end{cases} \quad (3.6)$$

$t_{nn} = 1 - \sum_{j=1}^{n} t_{nj}$, за умовою $t_{nj} = C_i^j t^j f$,

де t^j - ймовірність збереження дієздатності артилерії після транспортування.

$$f = 1 - t^j,$$

$$t^j = k_1 * k_2 * k_3,$$

де k_1 - ймовірність зношення ствола при транспортуванні, k_2 - ймовірність зношення ходової частини при транспортуванні, k_3 - ймовірність втрати боєздатності установки при вогневому впливі супротивника під час транспортування.

$$k_i = 1 - e^{-q_i t},$$

де t – час, необхідний на подолання маршруту, q_i - коефіцієнт впливу i-го фактору за одиницю часу при транспортуванні обраним маршрутом.

3.2 Метод моделювання артилерійських операцій в реальному часі

Сучасні методи моделювання складних систем, на основі яких розробляється програмне забезпечення для симуляції бойових дій артилерійських установок, використовують візуальні методи. Одним з найефективніших способів представлення взаємодії імітаційних моделей, зміну властивостей об’єктів керування в часі та взаємодії компонентів системи є застосування діаграм UML (Unified Modeling Language). UML є стандартною мовою моделювання, яка дозволяє створювати наочні та структуровані моделі складних систем, що забезпечує більш глибоке розуміння процесів та спрощує їх програмну реалізацію [97].

Необхідність використання UML-діаграм у моделюванні бойових дій причіпних артилерійських установок є головною умовою для забезпечення структурованого підходу при синтезі системи автоматизованого керування. Такі діаграми дозволяють: представити структуру та зміну властивостей системи, ідентифікувати основні компоненти та їх взаємодію, забезпечити логічну однозначність та ідентифікацію процесів, визначити потенційні похибки та оптимізувати дії, забезпечити адекватність моделювання та логіку перебування системи в станах.

Таким чином, UML-діаграми є невід'ємною частиною процесу моделювання бойових дій артилерійських установок, забезпечуючи надійну основу для розробки та реалізації ефективних бойових систем.

Використання UML-діаграм у процесі розробки моделі симуляції бойових дій артилерійських установок дозволяє наочно представити структуру системи, взаємодію між різними компонентами, а також порядок виконання ключових процесів. Це особливо важливо в контексті моделювання складних систем, де необхідно враховувати велику кількість параметрів, ймовірностей та взаємодій між елементами системи.

Розглянемо основні методи та призначення діаграм для імітаційного моделювання артилерійських операцій в реальному часі. Діаграма класів є одним з найпоширеніших і найбільш важливих типів UML-діаграм, що використовується для моделювання статичної структури системи.

Діаграма класів (Class Diagram) у контексті моделювання бойових дій артилерійських установок допомагає візуалізувати різні компоненти системи, такі як артилерійські установки, бойові завдання, шляхи переміщення та інші об'єкти. Діаграма також показує взаємозв'язки між цими об'єктами, їх атрибути і методи, що дозволяє формалізувати структуру та взаємодію даних у системі. Що стосується моделювання бойових дій, то діаграма класів є важливим методом для ідентифікації основних елементів системи, їх властивостей та взаємодій. Це дозволяє створити базову структуру, яка буде використовуватися для подальшого моделювання та реалізації системи.

Послідовна діаграма (Sequence Diagram) показує порядок взаємодії між об'єктами в системі для виконання певних функцій або сценаріїв. Вона відображає послідовність повідомлень, які передаються між об'єктами, та часовий порядок цих взаємодій. У контексті моделювання бойових дій артилерійських установок, послідовна діаграма може використовуватися для моделювання процесу ведення вогню, переміщення установок або інших важливих бойових завдань. Послідовна

діаграма дозволяє чітко визначити, як різні компоненти системи взаємодіють між собою в межах виконання бойового завдання. Це включає порядок виконання стрільби, перезарядки, переміщення та інші дії, що мають вирішальне значення для успішного виконання завдання.

Діаграма діяльності (Activity Diagram) відображає потік виконання процесів і дій у системі, що дозволяє моделювати логіку управління, робочі процеси та алгоритми. У моделюванні бойових дій діаграма діяльності може використовуватися для представлення алгоритму прийняття рішень артилерійськими установками, таких як вибір цілі, планування маршруту переміщення або розрахунок часу на виконання бойового завдання. Діаграма діяльності відіграє ключову роль у моделюванні поведінки системи під час виконання бойових операцій. Вона дозволяє розробникам зрозуміти логіку процесів, визначити можливі варіанти прийняття рішень та забезпечити оптимальний потік виконання завдання.

Діаграма класів (Class Diagram) (рис.3.2) є одним з основних типів діаграм UML, що використовується для моделювання статичної структури системи. Вона показує класи, інтерфейси, їх атрибути, методи, а також зв'язок між ними. Діаграма класів допомагає розробникам і науковцям зрозуміти, як організовані дані у системі, які об'єкти існують у системі та як вони взаємодіють між собою.

У контексті моделювання бойових дій артилерійських установок, діаграма класів може містити такі ключові елементи, як артилерійські установки, конфігурації стрільби, шляхи переміщення і взаємодії між ними.

Розглянемо стислий опис класів, атрибутів та методів. Зокрема, для класу ShootingConfig, який призначено для побудови конфігурації параметрів стрільби артилерійської установки. Клас ShootingConfig містить такі атрибути:

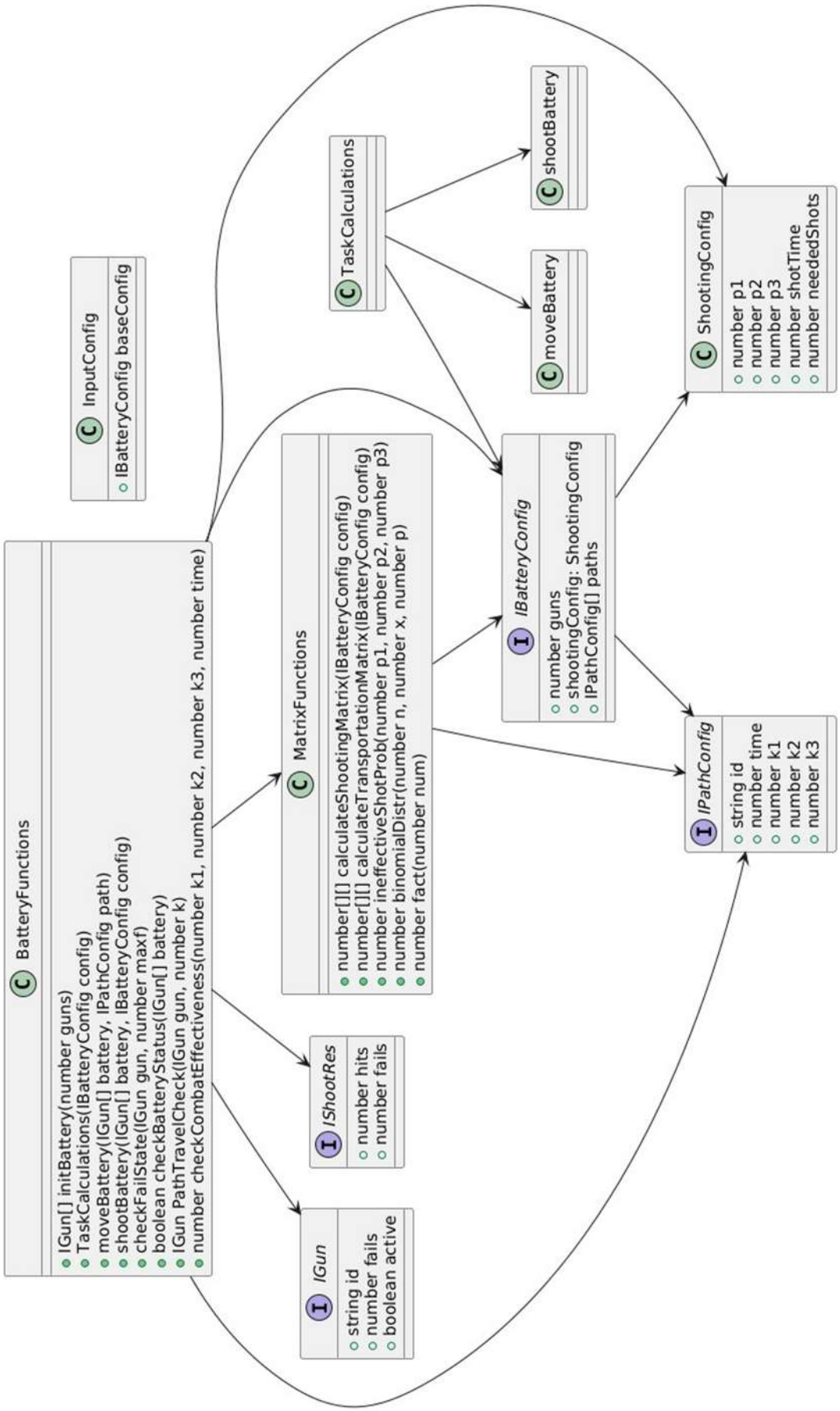

Рис.3.2 Діаграма класів (Class Diagram) для моделювання статичної структури системи.

(розроблено автором)

− **p1 (number),** ймовірність влучання у ціль за нормальних умов. Це основний параметр, який визначає точність пострілу;

− **p2 (number),** ймовірність успішного пострілу за умови нормального стану ствола та зарядної камори. Вона враховує технічний стан установки;

− **p3 (number),** ймовірність, що постріл буде виконаний без технічних пошкоджень або зовнішніх перешкод;

− **shotTime (number),** час, необхідний для виконання одного пострілу, параметр важливий для розрахунку загального часу, необхідного для виконання бойового завдання;

− **neededShots (number),** кількість пострілів, необхідних для знищення цілі, параметр залежить від характеристик цілі та умов бою.

Методи класу ShootingConfig можуть включати функції для ініціалізації цих параметрів, їхньої модифікації та отримання результатів стрільби.

Клас MatrixFunctions, який призначено для виконання математичних розрахунків, що виконуються при моделюванні бойових дій, послугується такими методами.

Метод **calculateShootingMatrix(config: IBatteryConfig): number[][]** обчислює матрицю стрільби для конфігурації артилерійської установки. Ця матриця показує ймовірності різних результатів стрільби залежно від заданої конфігурації.

Метод **calculateTransportationMatrix(config: IBatteryConfig): number[][]** обчислює матрицю транспортування для конфігурації артилерійської батареї. Вона використовується для оцінки ефективності переміщення установки з однієї вогневої позиції на іншу.

Метод **ineffectiveShotProb(p1: number, p2: number, p3: number): number** обчислює ймовірність неефективного пострілу, враховуючи параметри конфігурації стрільби. Цей метод розраховує ризики, пов'язані з гарматними пострілами.

Метод **binomialDistr(n: number, x: number, p: number): number** виконує обчислення біноміального розподілу, що використовується для моделювання ймовірності успішного виконання певної кількості пострілів.

Метод **fact(num: number): number** обчислює факторіал числа, що використовується в різних математичних обчисленнях, включаючи біноміальний розподіл.

Клас BatteryFunctions, який призначено для управління артилерійською батареєю та моделювання виконання бойових завдань, складається з таких методів.

Метод **initBattery(guns: number): IGun[]** моделює артилерійську батарею з певною кількістю гармат. Цей метод створює масив об'єктів типу IGun, які представляють окремі гармати в батареї.

Метод **TaskCalculations(config: IBatteryConfig): void** виконує розрахунки, пов'язані з виконанням бойового завдання. Метод використовує конфігурацію батареї для моделювання бойових дій.

Метод **moveBattery(battery: IGun[], path: IPathConfig): void** моделює переміщення батареї заданим шляхом. Цей метод враховує характеристики шляху та стан гармат.

Метод **shootBattery(battery: IGun[], config: IBatteryConfig): IShootRes** моделює процес стрільби батареї, повертаючи результат стрільби. Метод враховує конфігурацію стрільби та стан гармат.

Метод **checkFailState(gun: IGun, maxf: number): boolean** перевіряє, чи не перевищила гармата допустиму кількість невдалих спроб при стрільбі. Якщо кількість помилок перевищує порогове значення, гармата вважається пошкодженою.

Метод **checkBatteryStatus(battery: IGun[]): boolean** перевіряє загальний стан батареї, визначаючи, чи може вона продовжувати виконання бойового завдання.

Метод **PathTravelCheck(gun: IGun, k: number): IGun** розраховує стан гармати після переміщення по заданому маршруту, враховуючи можливе зношення та інші фактори.

Метод **checkCombatEffectiveness(k1: number, k2: number, k3: number, time: number): number** обчислює бойову ефективність установки, враховуючи зношеність, зовнішні умови та час на виконання завдання.

Клас InputConfig, який призначено для зберігання базової конфігурації батареї, має такий атрибут:

baseConfig: IBatteryConfig – основна конфігурація батареї, що включає кількість гармат, параметри стрільби, шляхи переміщення та інші вихідні дані.

Представлені класи та їх атрибути забезпечують комплексне моделювання бойових дій артилерійських установок, дозволяючи змінювати параметри системи та здійснювати детальний аналіз бойових операцій. UML діаграма класів допомагає візуалізувати ці елементи та їх взаємодію, що є важливим для розробки та аналізу складних систем автоматизації.

Послідовна діаграма (Sequence Diagram) рис. 3.3 є одним з основних типів UML-діаграм, що використовується для моделювання динамічних властивостей автоматизованої системи. Вона показує, як об'єкти взаємодіють один з одним протягом часу, демонструючи порядок передачі повідомлень між ними. Ця діаграма розробляється для відображення таких сценаріїв використання системи, як виконання бойових задач артилерійськими установками, де важливо розуміти послідовність дій та взаємодій між різними компонентами системи.

Послідовна діаграма (Sequence Diagram) складається з таких основних елементів. **Актори та Об'єкти –** вертикальні лінії, що представляють акторів (користувачів) або об'єкти системи, які беруть участь у сценарії. У контексті моделювання бойових дій це можуть бути артилерійські установки, конфігурації батарей, обчислювальні модулі тощо. **Лінія Життя (Lifeline)** вертикальна лінія, що йде від актора або об'єкта, показує їхню активність протягом сценарію. Лінія

життя представляє час, протягом якого об'єкт існує та виконує дії. **Повідомлення** – горизонтальні стрілки, що йдуть від одного об'єкта до іншого, представляють повідомлення, яке один об'єкт передає іншому. Повідомлення можуть бути викликом методу, відповіддю або сигналом. У бойових сценаріях це може бути команда на постріл, обчислення ефективності або зміна вогневої позиції. **Активність (Activation Bar)** – прямокутники на лінії життя, які показують період часу, протягом якого об'єкт виконує певну дію або обробляє повідомлення.

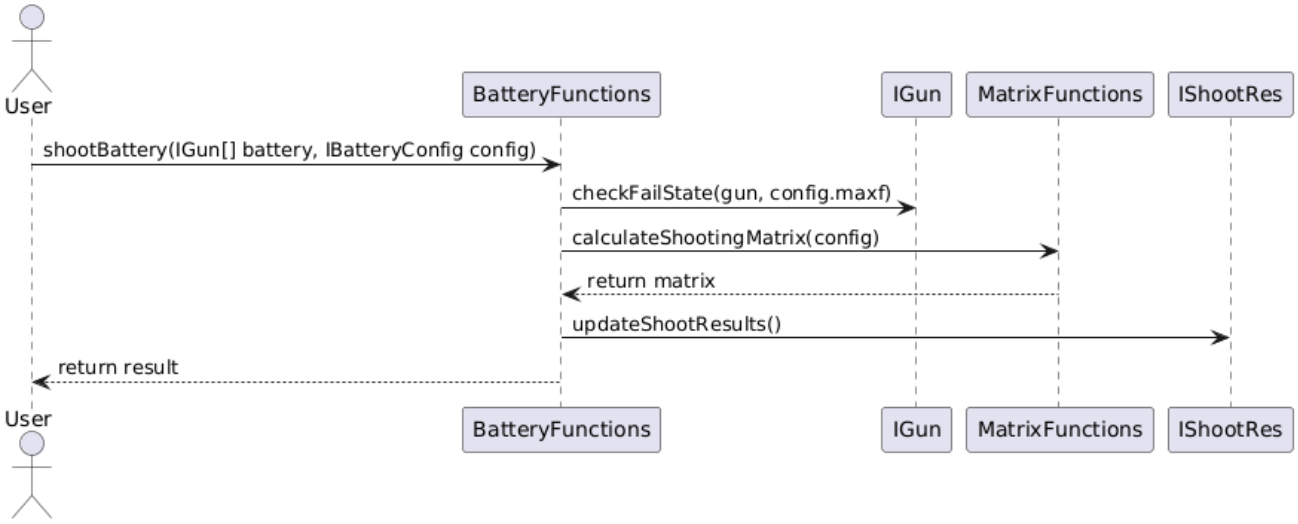

Рис. 3.3 Послідовна діаграма (Sequence Diagram) для моделювання динамічних властивостей автоматизованої системи.

(розроблене автором)

У контексті бойових дій артилерійських установок, Sequence Diagram може відображати, як система виконує завдання стрільби по цілі. Це включає послідовність взаємодій між компонентами, такими як BatteryFunctions, MatrixFunctions, і IGun.

Послідовність взаємодій:

1. Ініціалізація бойової задачі. Користувач або командний модуль ініціює завдання стрільби, використовуючи метод TaskCalculations у класі BatteryFunctions.

2. Перевірка стану батареї. Компонент BatteryFunctions звертається до компонента MatrixFunctions для обчислення необхідних параметрів стрільби та перевіряє стан батареї через метод checkBatteryStatus.

3. Переміщення батареї. Якщо батарея готова до стрільби, компонент BatteryFunctions моделює переміщення батареї до нової вогневої позиції, використовуючи метод moveBattery. Метод враховує дані про шлях переміщення з об'єкта IPathConfig.

4. Виконання стрільби. Після досягнення позиції компонент BatteryFunctions використовує метод shootBattery, який взаємодіє з кожною гарматою в батареї. Метод викликає checkFailState для кожної гармати, щоб визначити, чи вона придатна до стрільби.

5. Оновлення результатів. Після стрільби метод shootBattery повертає результати стрільби, які обробляються та зберігаються в системі для подальшого аналізу.

6. Завершення задачі. Результати передаються командному модулю або користувачу, після чого бойове завдання завершується.

Послідовна діаграма дозволяє чітко розподілити послідовність взаємодій, відобразити часовий порядок виконання дій та ідентифікувати ключові точки, де можуть виникати критичні ситуації або необхідність прийняття рішень. При моделюванні бойових дій Sequence Diagram використовується для демонстрації динаміки виконання задачі артилерійськими установками. Така діаграма допомагає розкрити деталі взаємодій між різними компонентами системи, що важливо для глибшого розуміння процесів та оптимізації алгоритмів бойових дій. Sequence Diagram також дозволяє виявити потенційні вузькі місця у сценаріях виконання бойових задач і запропонувати шляхи їх оптимізації.

Діаграма дій (Activity Diagram) рис. 3.4 є важливим типом UML-діаграм, що використовується для моделювання динамічних можливостей системи. Вона відображає потік управління або робочий процес, показуючи послідовність

виконання дій, умовні переходи та можливі розгалуження в процесі. Ця діаграма допомагає формалізувати алгоритми, процеси керування або послідовності дій, які виконуються системою під час досягнення заданої мети.

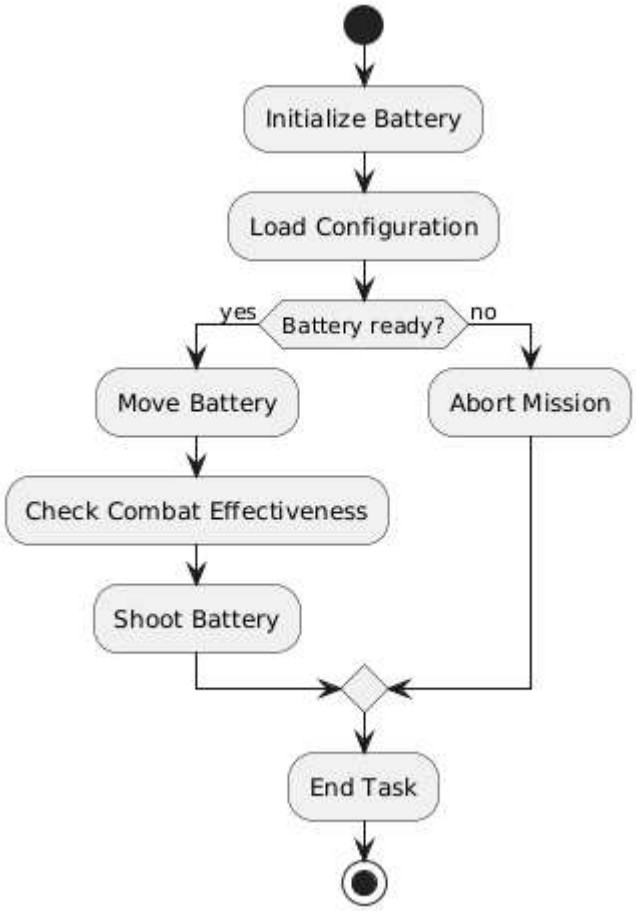

Рис. 3.4 Діаграма дій (Activity Diagram) для моделювання динамічних можливостей системи.

(розроблено автором)

У контексті моделювання бойових дій артилерійських установок діаграма дій дозволяє детально показати процес конструювання, а саме, як система виконує бойове завдання, включаючи вибір цілі, стрільбу, переміщення на нову позицію та оцінку результатів.

Основні елементи Діаграми Дій такі.

Дії (Actions): прямокутники, що представляють окремі кроки або дії, які виконуються в межах процесу. Наприклад, дії можуть включати ініціалізацію

стрільби, обчислення траєкторії, переміщення на нову позицію тощо. **Потоки управління (Control Flows):** стрілки, що з'єднують дії та показують послідовність їх виконання. Вони вказують на те, в якому порядку виконуються дії та як інформація передається від однієї дії до іншої. **Рішення (Decision):** ромбовидні елементи, що представляють точку вибору, де процес може розгалужуватися на кілька альтернативних шляхів. У моделюванні бойових дій рішення можуть бути пов'язані, наприклад, з вибором стратегії ведення вогню в залежності від обставин на полі бою. **Паралельні потоки (Parallel Flows):** горизонтальні або вертикальні лінії, що дозволяють відображати паралельне виконання декількох дій одночасно. Наприклад, переміщення батареї може виконуватися паралельно з оцінкою ефективності стрільби. **Початкові та кінцеві точки:** початок процесу відображається у вигляді заповненого круга, а кінець процесу – у вигляді круга з обвідкою.

Розглянемо приклад **Діаграми Дій** у контексті виконання бойового завдання артилерійською установкою, діаграма діяльності може виглядати таким чином. Процес **Ініціалізація бойового завдання** починається з ініціалізації процесу, що включає завантаження конфігурації батареї та вибір цілі. **Вибір стратегії** ґрунтується на рішенні, коли система керування обирає стратегію ведення вогню, враховуючи поточні умови бою, стан батареї та характеристику цілі. В разі, якщо ціль обрана, система керування переходить до дії **Стрільба**. Діаграма демонструє паралельні потоки для кількох гармат, які ведуть вогонь одночасно. Після стрільби система керування виконує дію **Оцінка ефективності**, де аналізуються результати стрільби та вносяться корективи у подальші дії, отримані за рахунок зворотного зв’язку. За умови, якщо бойова ситуація вимагає зміни вогневої позиції, система управління виконує керувальний вплив **Переміщення на нову позицію,** і артилерійська батарея змінює позицію. Після завершення всіх дій процес **Завершення бойової задачі** закінчується, і система керування переходить у стан готовності до виконання нового завдання.

Використання **Діаграми Дій:** необхідно для візуалізації алгоритмів виконання бойових завдань, а також для опису робочих процесів, що виконуються системою. Вона допомагає ідентифікувати ключові точки прийняття рішень, оптимізувати потоки виконання процесів та забезпечити більш ефективне планування бойових операцій. Діаграма дій також дозволяє виявити можливі точки відмови в процесах, розробити шляхи їх обходу або мінімізації впливу на загальну ефективність бойової роботи. Це забезпечує більш глибоке розуміння того, як система повинна реагувати на різні сценарії на полі бою.

3.3 Розрахунковий експеримент циклу зміни позицій та оцінювання ризиків.

Для кожного можливого маршруту оцінюються ризики виявлення та втрат боєздатності. Враховуються всі можливі фактори, включаючи відстань, умови місцевості, активність супротивника та технічний стан установки. Такий підхід дозволяє моделювати різні сценарії бойових дій та визначати оптимальні стратегії для досягнення максимальної ефективності бойових дій артилерійських установок.

Приймемо такі ймовірні умови для розрахунків. Відсутність збурення у вигляді зношеності зарядної камори $p_1 = 0.95$. Відсутність збурення у вигляді зношеності ствола $p_2 = 0.95$. Відсутність збурення як невизначеності заряду $p_3 = 0.95$. Ураження батареї ворожим вогнем при зміні вогневої позиції $s = 0.25$. Тоді ймовірність ефективного пострілу у разі відсутності всіх чотирьох видів збурень складає $p = p_1 * p_2 * p_3 * (1 - s) = 0.64303$.

В таблиці 3.1 представляє характеристики, що впливають на боєздатність причіпної артилерійської установки за одного циклу зміни вогневої позиції. Час маршу та величини зменшення боєздатності враховуються для різних доріг переміщення, що дозволяє оцінити вплив зовнішніх факторів на ефективність бойових дій.

Таблиця. 3.1 − Питомі параметри зміни боєздатності установок при одному циклі зміни позицій

Параметри впливу на боєздатність при транспортуванні	Вид дороги *j*		
	№ 1	№ 2	№ 3
Час зміни вогневої позиції, с.	200	700	1500
Зміна боєздатності за рахунок зношеності ствола	0,00003	0,00006	0,00008
Зміна боєздатності за рахунок зношеності ходової частини	0,0007	0,001	0,002
Зміна боєздатності за рахунок зношеності гармати під час вогневого впливу	0,00006	0,00003	0,00001

Джерело: розроблено автором за [35]

Розрахункові параметри зміни боєздатності установок при одному циклі зміни позицій. Зменшення боєздатності за рахунок зношеності ствола при транспортуванні $k_1 = 0.95$. Зменшення боєздатності за рахунок зношеності ходової частини при транспортуванні $k_2 = 0.85$. Зменшення боєздатності за рахунок зношеності установки під час вогневого впливу супротивника при транспортуванні $k_3 = 0.95$. Тоді при зміні позиції зменшення боєздатності складає $k = k_1 * k_2 * k_3 = 0.767125$.

Для аналізу ефективності переходів між різними станами системи використовується матриця перехідних ймовірностей. Ця матриця дозволяє визначити ймовірності переходу артилерійської установки з одного стану в інший, враховуючи випадковий характер різних факторів.

Табл. 2 представляє матрицю перехідних ймовірностей для станів причіпної артилерійської установки. У цій таблиці кожен рядок відповідає вихідному стану системи, а кожен стовпчик – кінцевому стану. Значення в таблиці вказують на ймовірність переходу з одного стану в інший.

Таблиця. 3.2 − Матриця перехідних ймовірностей

Стан	T_6	S_6	S_5	S_4	S_3	S_2	S_1	S_0
T_6	0	0.2038	0.3712	0.2817	0.114	0.0259	0.0032	0.0002
S_6	0	0.0707	0.23547	0.3268	0.24189	0.10071	0.02236	0.0021
S_5	0	0	0.10994	0.30516	0.33881	0.18809	0.05221	0.0058
S_4	0	0	0	0.17097	0.37965	0.31614	0.117	0.01624
S_3	0	0	0	0	0.26589	0.44281	0.24582	0.04549
S_2	0	0	0	0	0	0.41349	0.45908	0.12743
S_1	0	0	0	0	0	0	0.64303	0.35697
S_0	0	0	0	0	0	0	0	1

Джерело: розроблено автором за [35]

У даному контексті стани S_0 до S_6 представляють кількість активних артилерійських установок. Наприклад, стан S_0 означає, що жодна установка не активна, а стан S_6 означає, шо активні всі шість установок. Кожен елемент матриці p_{ij} визначає ймовірність переходу зі стану S_i до стану S_j. Таким чином, матриця перехідних ймовірностей є ключовим елементом для моделювання дій артилерійської установки в різних бойових умовах.

Для кожного з маршрутів, які вказані у табл. 3.1, розрахуємо фактори впливу на боєздатність артилерійських установок під час транспортування:

− дорога №1: $k_1 = 0.995;\ k_2 = 0.875; k_3 = 0.99;$

− дорога №2: $k_1 = 0.96;\ k_2 = 0.508; k_3 = 0.978;$

− дорога №3: $k_1 = 0.897;\ k_2 = 0.03; k_3 = 0.978.$

Використовуючи матрицю переходу, розрахуємо очікувану кількість артилерійських установок, які можуть втратити боєздатність під час транспортування у вигляді діапазону. Розрахунки зробимо для трьох різних

величин ймовірності враження батареї ворожим вогнем: ($s = 0.25$; $s = 0.4$; $s = 0.5$). Результати моделювання представлено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Очікувана кількість боєздатних установок під час транспортування в одному циклі зміни позиції.

Очікуваний результат	Номер дороги, *j*		
	№ 1	№ 2	№ 3
Кількість установок, які втратили боєздатність	[0;2]	[1;4]	[3;6]
Кількість боєздатних установок	[4;6]	[2;5]	[0;3]

Джерело: розроблено автором за [35]

Розрахуємо очікувану кількість залпів, кількість успішних та неуспішних пострілів, та час необхідний на виконання завдання. Будемо вважати установку, яка зробила три невдалих постріли поспіль, недієздатною перед наступними залпами. Для модельного експерименту визначимо необхідну кількість точних влучень для виконання завдання – 25. Час необхідний на один залп батареї – 1 хв.

Аналіз результатів представлено в табл. 3.4. Результати моделювання демонструють потенціальні загрози кожного із маршрутів, ймовірність та швидкість ворожого вогню. Наприклад, якщо командир батареї вибере дорогу №3, то дуже велика вірогідність втратити боєздатність великої кількості артилерійських установок, через що на виконання завдання необхідно буде дуже багато часу (до 30 хв), що дозволить протиборчій стороні завдати удару у відповідь. Результати симуляцій дозволяють визначити оптимальні стратегії використання артилерійських установок, включаючи вибір вогневих позицій, та отримати рекомендації щодо підвищення ефективності бойової роботи.

На основі отриманих результатів модельного експерименту та симуляцій було розроблено імітаційну модель і метод керування станами артилерійської гармати при стрільбі, що враховують випадкові динамічні зовнішні і внутрішні збурення. Одержані результати показали, що використання стохастичних процесів у моделюванні бойової роботи артилерійських установок дозволяє

досягти значного підвищення ефективності бойових дій. По результатам розрахункового експерименту було отримано такі узагальнення.

Таблиця 3.4 – Очікувана кількість боєздатних установок під час транспортування.

Показник	Номер дороги, *j*								
	№ 1			№ 2			№ 3		
Ймовірність ураження батареї ворожим вогнем, s	0.25	0.4	0.5	0.25	0.4	0.5	0.25	0.4	0.5
Очікувана кількість успішних пострілів	[25;28]	[25;26]	[10;20]	[25;27]	[24;25]	[5;15]	[0;20]	[0;10]	[0;3]
Очікувана кількість невдалих пострілів	[10;15]	[12;20]	[20;30]	[10;15]	[15;25]	[10;20]	[0;15]	[0;10]	[0;5]
Очікувана кількість дієздатних установок після завершення завдання	5	3	0	3	1	0	1	0	0
Час, необхідний на виконання завдання, хв	≈9	≈11	0	≈12	≈20	0	≈30	0	0

Джерело: розроблено автором за [35]

Щодо ефективності пострілів: розроблена модель дозволяє враховувати випадковий характер швидкості снаряда, часу на перезарядку та ймовірності виявлення супротивником. Результати симуляцій показали, що точність і ефективність пострілів значно підвищуються при врахуванні зовнішніх та внутрішніх збурень. Зокрема, використання стохастичних процесів дозволило визначити оптимальні параметри для забезпечення максимальної ефективності пострілів.

Щодо часу виконання бойового завдання: оцінювання часу виконання завдання показала, що використання розробленої моделі дозволяє значно скоротити час на виконання бойової операції. Симуляції продемонстрували, що врахування випадкових збурень та зміни вогневих позицій дозволяють визначити найкращий час для виконання бойового завдання за мінімальної втрати

боєздатності. Це досягається шляхом оптимального розподілу часу на постріли, перезарядку та транспортування установки.

Щодо втрати боєздатності: врахування випадкових динамічних збурень дозволило знизити втрати боєздатності артилерійських установок. Результати симуляцій показали, що використання розробленої моделі дозволяє ефективно керувати станами артилерійської гармати, що зменшує вплив зовнішніх та внутрішніх збурень на боєздатність. Зокрема, було визначено, що оптимізація процесу перезарядки та зміни вогневих позицій сприяє зниженню втрат боєздатності.

Щодо впливу зовнішніх збурень: одним із важливих аспектів дослідження є врахування зовнішніх збурень, таких як погодні умови та технічний стан артилерійських установок. Результати показали, що ці фактори мають значний вплив на ефективність бойової роботи. Моделювання з врахуванням зовнішніх збурень дозволило знизити втрати боєздатності та підвищити точність пострілів, що є важливим для забезпечення реалістичності ігрового процесу.

Отримані результати були порівняні з реальними даними та результатами попередніх досліджень. Порівняння показало високу точність та достовірність розробленої моделі. Встановлено, що модель адекватно відтворює реальні бойові умови та дозволяє визначити оптимальні стратегії для підвищення ефективності бойових дій. Таким чином, розроблена імітаційна модель та метод керування станами артилерійської гармати при стрільбі за наявності випадкових динамічних зовнішніх і внутрішніх збурень дозволили визначити найкращий час виконання бойового завдання за мінімальної втрати боєздатності. Врахування частоти зміни вогневої позиції сприяло підвищенню ефективності бойових дій та зниженню ризику виявлення супротивником.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на адаптацію розробленої моделі до інших типів як бойових дій, так і типів установок та розширення можливостей. Це включає моделювання дій різних типів військ, інтеграцію нових

параметрів та зовнішніх збурень, а також розробку більш складних стратегій керування бойовими діями. Такий підхід дозволить ще більше підвищити реалістичність та ефективність моделювання. В подальшому пропонується розглянути отримані результати для використання на самохідних артилерійських системах.

3.4. Метод динамічного оцінювання поточного стану боєздатності окремої самохідної артилерійської системи.

Розглянемо нову бойову одиницю – самохідну артилерійську систему нового покоління (САСНП). Характеристики САСНП наведені у таблиці 3.5. Як прототип САСНП обрано САС Archer, що випускається компанією BAESystems (Швеція) [98].

Таблиця 3.5 − Тактико-технічні показники САСНП

Характеристика	Значення
1. Шасі	Колісне
2. Колісна формула	6 × 6
3. Калібр, мм	155
4. Дальність стрільби, км	30
5. Швидкострільність, пострілів за хвилину	8
6. Максимальна швидкість по шосе, км/год	80
7. Максимальна швидкість перехресною місцевістю, км/год	60

Джерело: розроблено автором за [34]

Припустимо, що загальна схема бойового застосування окремої САС має такий вигляд. У процесі таргетингу, тобто визначення пріоритетності цілей та послідовності їх ураження [99], САС з верхньої ланки керування призначаються $\underline{\mathrm{N}}$ цілей T_i та повідомляються їх координати $(x_i^T, y_i^T), i = \overline{1, N}$ для послідовного ураження. Так, ураження цілей здійснюється з підготовлених вогневих позицій

$FP_i, i = \overline{1,N}$, кожна з яких знаходиться в межах дальності стрільби по відповідній цілі. Після стрільби по цілі T_i на *i*- й позиції САС, відповідно до концепції «shoot and scoot», самохідна система переміщається на позицію з номером *i*+1 для стрільби по цілі (рис. 3.5).

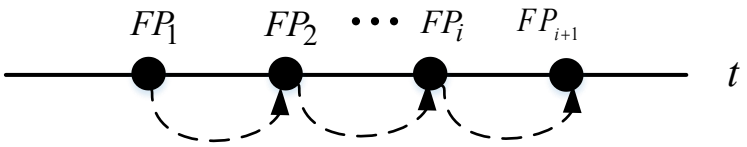

Рис. 3.5. Схема переміщення САС за концепцією «shoot and scoot».

Джерело: розроблено автором за [34]

Після виконання бойового завдання на *i*-й позиції може бути здійснено динамічне оцінювання поточної боєздатності САС. Оскільки боєздатність може оцінюватися різними показниками, було обрано такі критерії.

1. Поточна ефективність пострілу. Відповідно до визначення [33], постріл є ефективним, якщо зношеність ствола САС не перевищує допустимого значення. Це означає, що початкова швидкість снаряда за рахунок зношеності ствола $(v_0^{table} - \Delta v_0^t)/v_0^{table}$на момент оцінювання *t* становить щонайменше 0,95 від табличного значення v_0^{table}. У запропонованій методиці рівень коректного оцінювання поточної ефективності пострілу здійснюється за критерієм рангового контролю.

$$Crit_1 = Lv_0^t = (v_0^{table} - \Delta v_0^t)/v_0^{table}. \quad (3.7)$$

$$Crit_1 = L\Delta v_0^t = \begin{cases} 1,\ if n_{shots}^t < 25, \\ 1/2, if 26 < n_{shots}^t < 40, \\ 1/3 else \end{cases}, \quad (3.8)$$

де Δv_0^t– відхилення початкової швидкості від табличної,

n_{shots}^t– кількість пострілів, зроблених зі ствола з часу останнього інструментального оцінювання початкової швидкості v_0 до моменту стрільби *t*.

2. Коефіцієнт зниження точності стрільби (shooting accuracy reduction factor). Цей критерій враховує вогневі ураження (непрямі влучання) САС

супротивником n_{attacs}. Такі ураження зменшують ймовірність влучання пострілу в ціль p_{fact} порівняно з ймовірністю влучання САС без пошкоджень p.

$$Crit_2 = SARF = p_{fact}/p, \tag{3.9}$$

$$Crit_2 = SARF = \begin{cases} 1, if n_{attacs} = 0, \\ 1/2, if n_{attacs} = 1, \\ 1/3, if n_{attacs} = 2 \end{cases} \tag{3.10}$$

3. Залишковий боєкомплект (ammunition stock). Оцінювання залишкового боєкомплекту на момент часу *t* AS_t здійснюється за критерієм:

$$Crit_3 = AS_t = (AS_{full} - n_{shots}^t)/AS_{full}, \tag{3.11},$$

де AS_{full}– повний боєкомплект САС, критично низьким значенням критерію $Crit_3$вважаємо $AS_t^* = 3$ (за $AS_{full} = 21$).

4. Можливість стрільби в режимі MRSI. Оцінювання можливість стрільби в режимі MRSI внаслідок непрямого влучання снаряда ворога може бути нереалізованою через вихід з ладу вертикального механізму переміщення ствола або системи керування цим механізмом. Відповідно, можливість стрільби в режимі MRSI оцінюється за критерієм:

$$Crit_5 = MRSI = \begin{cases} 1, if n_{attac} < 2, MRSI\ is\ \ possible \\ 0, if n_{attac} \geq 2, MRSI\ is\ \ impossible \end{cases}. \tag{3.12}$$

5. Швидкострільність (rate of fire). Швидкострільність САС може знижуватися під час непрямих влучань снарядів супротивника. Поточну швидкострільність RF_t пропонуємо оцінювати за таким критерієм:

$$Crit_4 = RF_t = \begin{cases} 1\ (1\ level), \\ 1/2\ (2\ level), \\ 1/3\ (3\ level) \end{cases} \tag{3.13}$$

1-й рівень швидкострільності відповідає ситуації $RF_t = RF_{max}$ пострілів за хвилину, де RF_{max}– максимальна швидкострільність, 2-й рівень

швидкострільності співвідноситься із ситуацією $RF_t = RF_{max}$, 3-й рівень швидкострільності ідентичний до ситуації $RF_t = RF_{max}$.

6. Залишкова маневреність (residual mobility). Переміщення САС з кожної вогневої позиції на іншу може здійснюватися як автомобільною дорогою, так і перехресною місцевістю. Незважаючи на пристосованість САС нового покоління до переміщення складним маршрутом перехресної місцевості, в процесі такого руху шини колісних шасі можуть бути пошкоджені, що знижує швидкість на певний момент часу і маневреність САС. Залишкову маневреність у момент часу t рекомендуємо оцінювати за критерієм:

$$Crit_6 = RM = \begin{cases} 1\ (1\ level), \\ 1/2\ (2\ level), \\ 1/3\ (3\ level) \end{cases} \quad (3.14)$$

у даному випадку маневреність відповідає 1-му рівню за умови, що $v_t = v_{max}$, де v_{max}– максимальна швидкість руху, 2-му рівню, якщо $v_t = v_{max}$ 3-му рівню, якщо $v_t = v_{max}$.

Шість запропонованих критеріїв можуть бути інтегровані в загальне оцінювання поточної боєздатності САС згорткою за методом ідеальної точки за нормою L_2:

$$Crit_t^{ideal_point} = \sqrt{\sum_{k=1}^{6} w_k \left(Crit_k - Crit_k^{ideal_point}\right)^2}, \quad \sum_{k=1}^{6} w_k = 1, \quad (3.15)$$

де $Crit_k^{ideal_point}$– максимально можливе значення відповідного критерію; w_k– вагомість відповідних критеріїв, що співвідносяться з бойовою ситуацією.

Отже, запропонованій метод полягає в аналізі зазначених критеріїв поточної боєздатності у співвідношенні (3.7–3.14) і за необхідності розрахунку інтегрованого оцінювання (3.15). Слід наголосити на такому важливому моменті: переміщення САС між вогневими позиціями може відбуватися як автомобільними дорогами, так і перехресною місцевістю, як показано на (рис. 3.5).

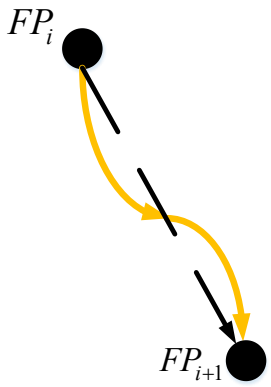

Рис. 3.5. Переміщення САС з позиції FP_i на іншу позицію FP_{i+1} (жовтий – автомобільна дорога, чорний – перехресна місцевість).

Джерело: розроблено автором за [34]

Під час руху САС автомобільною дорогою через високу швидкість суттєво економиться час переміщення. Однак, як правило, автодороги інтенсивно обстрілюються супротивником. У зв'язку з цим існує загроза ураження САС під час руху. При переміщенні перехресною місцевістю швидкість САС відповідно є нижчою, водночас суттєвішою є зношеність ходової частини, проте значно меншою стає ймовірність обстрілу і коротшою траєкторія руху. Якщо є кілька можливих маршрутів переміщення з позиції FP_i на позицію FP_{i+1}, то оптимальний можна вибрати шляхом розв’язання двокритеріальної транспортної задачі з мінімізацією цільових функцій – часу руху t і втрати Q [100].

$$\begin{cases} F_{tr}^1 = min\, t\,(FP_i \Rightarrow FP_{i+1}), i = \overline{1,n} \\ F_{tr}^2 = min\;\; Q(FP_i \Rightarrow FP_{i+1}) \end{cases} \qquad (3.16)$$

При цьому втрати оцінюються як добуток ймовірності влучання на вартість САС. Пропонуємо вважати ймовірність влучання пропорційною часу пересування дорогою, що обстрілюється ворогом. Двокритеріальна транспортна задача уподібнюється до задачі лінійного програмування. Час її розв’язання на комп'ютері середньої продуктивності не більше 5 с. [101].

Розглянемо модель бойового застосування САС у винятковій тактичній

ситуації. Розроблений метод дає можливість побудувати модель бойового застосування САС у винятковій тактичній ситуації.

Основним бойовим завданням САС є контрбатарейна боротьба. САС із застосуванням тактики «shoot and scoot» послідовно обстрілює N цілей T_i, переміщуючись відповідними вогневими позиціями $FP_i, i = \overline{1,N}$. Розглянемо більш складну тактичну ситуацію. Припустимо, що раптово після обстрілу цілі T_i з вогневої позиції FP_i з вищого рівня таргетингу для САС надходить інформація про появу цілі підвищеної небезпеки (especial danger target, EDT) і необхідність її вогневого ураження. Ціллю підвищеної небезпеки не є артилерійська батарея. Така ціль може завдати серйозної шкоди, і тому бойова цінність її суттєво вища, ніж інших із цілей T_i. Прикметною особливістю такої цілі є те, що вона винятково небезпечна і повинна бути уражена за короткий проміжок часу – «вікна особливої небезпеки» (window of especial danger, WED) Δt_{WED}. Координати EDT передаються на САС. EDT вважається ураженою за умови влучання в неї не менше, ніж двох снарядів САС з імовірністю p^*. EDT прикривається артилерійськими засобами з необмеженим вогневим ресурсом. Таргетинг для EDT надходить в момент переміщення САС з вогневої позиції FP_i на позицію FP_{i+1}. Після отримання таргетингу для EDT САС припиняє рух і веде вогонь під час короткої зупинки з тимчасової вогневої позиції *TFP*. Просторова й часова картини розглянутої тактичної ситуації представлені на рис. 3.6 и 3.7. відповідно.

Вважатимемо, що після закінчення стрільби на позиції FP_i проведено динамічне оцінювання поточного стану боєздатності САС за сформульованим вище методом.

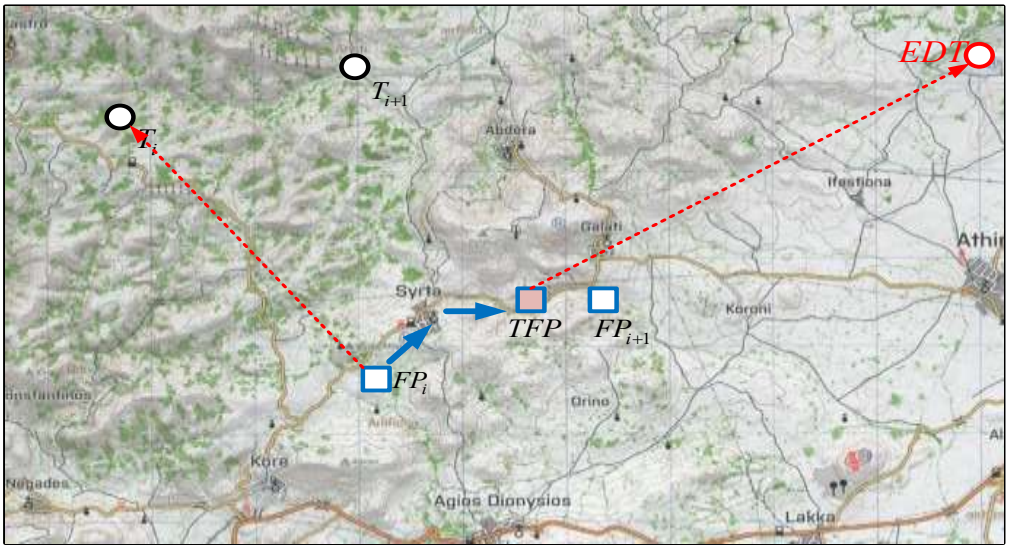

Рис. 3.6 Просторова картина стрільби по EDT.

Джерело: розроблено автором за [34]

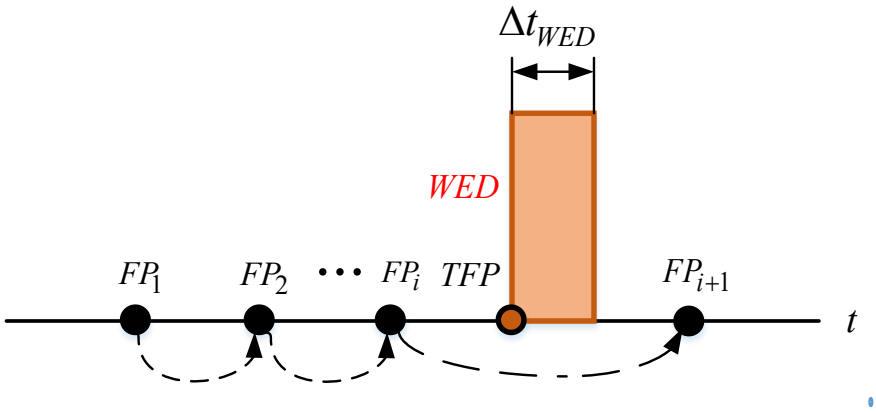

Рис. 3.7. Часова картина стрільби по EDT.

Джерело: розроблено автором за [34]

Це уможливлює створення дерева станів САС (рис. 3.8) [102]. Дерево станів відрізняється від типового дерева розв'язань тим, що розглядається не повна система подій, а найімовірніші події. Дерево станів САС будується за розглянутою вище методикою динамічного оцінювання поточного стану боєздатності САС. Перший рівень розгалуження 1,…,5 відповідає критеріям $Crit_1, \ldots, Crit_5$. Наступний рівень визначає можливість виконання бойових операцій або значення числових параметрів, що відповідають ранговим оцінюванням, застосованим у подальших розрахунках.

Поточний стан боєздатності САС видається можливим представити

кортежем $State^t < 1, n1; 2, n2; 3, n3; 4, n4; 5, n5 >$,

де $n1 \in \{1.1,1.2,1.3\}, n2 \in \{2.1,2.2,2.3\}, n3 \in \{3.1,3.2\}, n4 \in \{4.1,4.2\}, n5 \in \{1,5.5.2,5.3\}$ – номера остаточних гілок дерева станів.

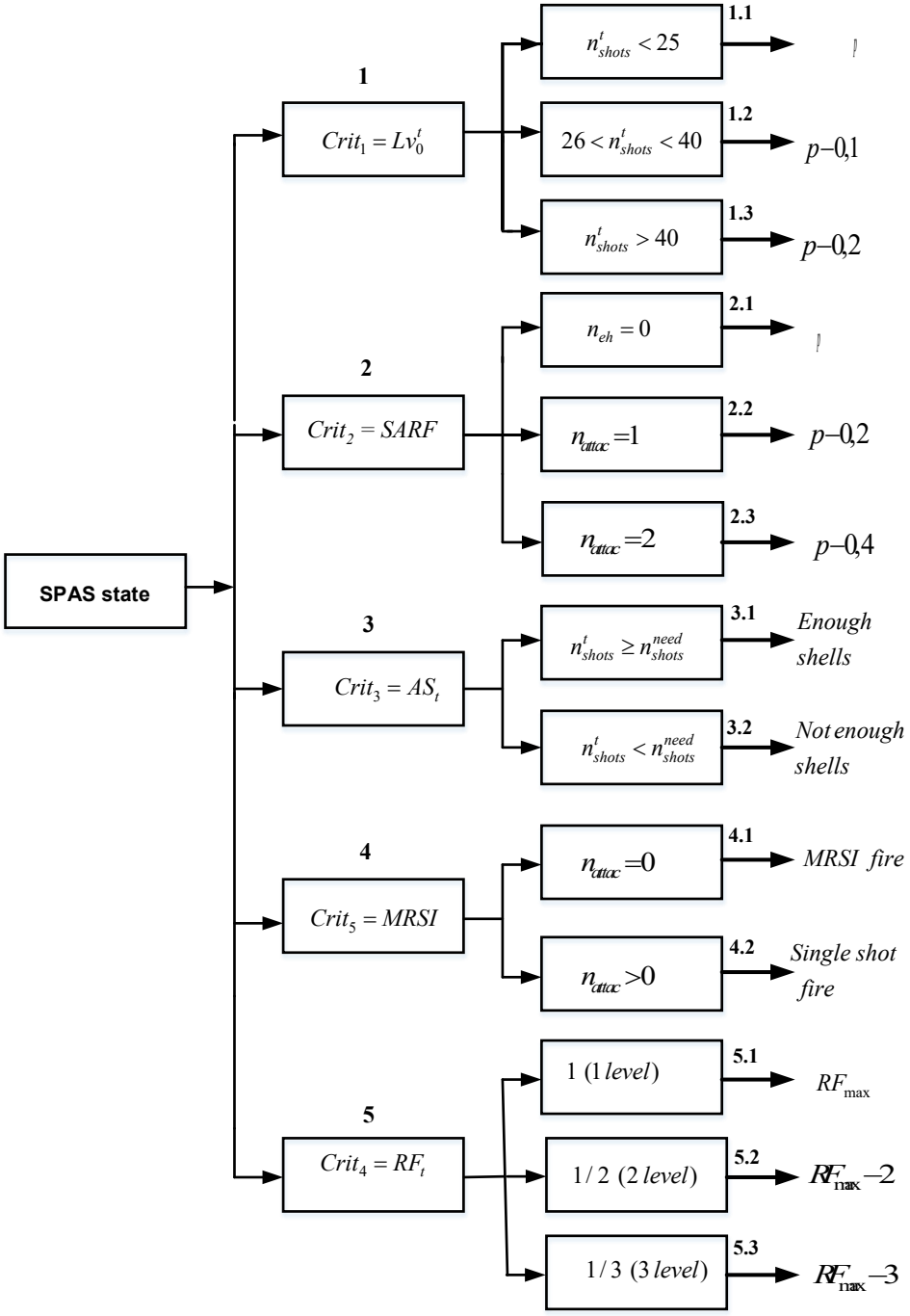

Рис. 3.8 Дерево станів боєздатності САС до початкового моменту обстрілу *EDT*.

Джерело: розроблено автором за [34]

У подальшому послідовність оцінювання можливості ураження *EDT* така.

Припустимо, що ймовірність влучання в ціль одного пострілу САС в ідеальному стані дорівнює p. З урахуванням поточного стану САС у відповідності до дерева станів виявляються значення ймовірності влучання в ціль одного пострілу САС. Оцінюється кількість пострілів n^*, необхідних САС в поточному стані для ураження цілі підвищеної небезпеки K влучаннями з імовірністю p^*. Вірогідність $(n^* - K)$ промахів дорівнює $(1-p)^{n^*-K}$, а ймовірність K-влучань дорівнює $1-(1-p)^{n^*-K}$. За сформульованими вище умовами виконується нерівність:

$$1-(1-p)^{n^*-K} \geq \mathrm{p}^*;\ 1-\mathrm{p}^* \geq (1-p)^{n^*-K}. \qquad (3.17)$$

Припускаючи $p \neq 1$, $p^* \neq 1$ і переходячи до суворої рівності, отримуємо залежність:

$$n^* = log(1-\mathrm{p}^*)/\,log(1-p)+K. \qquad (3.18)$$

Після округлення отримане значення від розрахунку виразу (3.18) (або залежності рис. 3.9) значення n^*до найближчого більшого цілого

$$n^{**} = \lceil n^* \rceil \qquad (3.19),$$

можна отримати необхідну для ураження цілі з імовірністю p^*кількість пострілів. Візуалізація залежності (3.18) представлена на рис. 3.9.

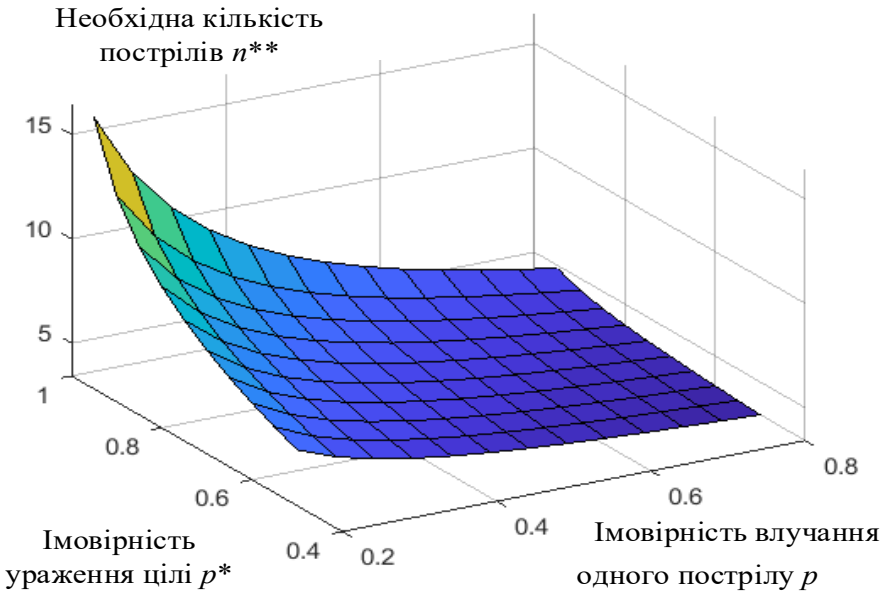

Рис.3.9. Графічне зображення залежності (3.18)
Джерело: розроблено автором за [34]

Слід відмітити, що через дискретний цілочисловий характер змінної n^{**} (рис.3.9) важливо використовувати лише вузлові значення нанесеної на поверхню сітки.

Отримане значення n^* співвідноситься з наявним боєзапасом за критерієм 3. Якщо $n^{**}>n_{shots}^{t}$, то заявлене завдання нездійсненне. За умови достатнього боєкомплекту перевіряються вихідні дані критерію 4. У разі неможливості стрільби в режимі MRSI операція може здійснюватися лише поодинокими пострілами зі швидкострільністю, що визначається за критерієм 5.

Потім оцінюється бюджет часу для ураження цілі підвищеної небезпеки. Час на виконання бойового завдання ураження *EDT* t^*включає час підготовки САС для стрільби під час короткої зупинки t_{prep_fire}, час вогневої діяльності $t_{fire} = n^*/RF_t$і час польоту снарядів до EDT t_{flight}:

$$t^* = t_{prep_fire} + t_{fire} + t_{flight}. \quad (3.20)$$

Цей час не повинен перевищувати тривалості вікна особливої небезпеки Δt_{WED}:

$$t^* < \Delta t_{WED}. \quad (3.21)$$

Якщо умова (3.21) не дотримується, виконання завдання є недоцільним. Важливою проблемою є питання безпеки САС при виявленні її артилерією супротивника, що прикриває EDT. Вважатимемо, що САС виявляється артилерією ворога після чотирьох пострілів [20]. Таким чином через час t_{fire}^{enemy}залп супротивника може з високою ймовірністю уразити САС.

$$t_{fire}^{enemy} = 4/RF_t + t_{prep}^{enemy} + t_{flight}, \quad (3.22),$$

де t_{fire}^{enemy}– час на оцінювання ворогом координат TFP та підготовку до стрільби. Тут припускаємо, що артилерія прикриття ворога розташована близько до EDT, тому час польоту снарядів приблизно такий самий, як від TFP до EDT.

Якщо $t^{**} = t_{fire} + t_{flight} < t_{fire}^{enemy}$, то бойове завдання знищення цілі підвищеної небезпеки може бути виконане ціною втрати САС. Однак, враховуючи

набагато вищу вартість EDT, у такому випадку атакуюча сторона суттєво виграє. Якщо $t^{**} > t_{fire}^{enemy}$, то ваги набирає критерій залишкової маневреності, і САС повинна залишити тимчасову вогневу позицію на максимальній швидкості.

Нижче представлено приклади оцінювання ефективності САС в ураженні EDT для різних станів САС на момент таргетингу. Вважається, що ціль знищена, якщо вона уражена *K*=3 з імовірністю p^*=0,95. При цьому p=0,9. Тривалість вікна особливої небезпеки Δt_{WED}= 300 с. Припускаємо, що відстань TFP– EDT така, при якій час польоту снаряда t_{flight}=60 с. Рівнозначним уважаємо час польоту снарядів, випущених артилерією прикриття ворога.

Приклад 1. САС знаходиться за результатами динамічного оцінювання в стані $State^t < 1{,}1.1; 2{,}2.1; 3{,}3.1; 4{,}4.1; 5{,}5.1 >$, що відповідає «ідеальній точці». Для ураження цілі з імовірністю p*=0,95 згідно з (3.19) потрібно n^{**}= 4 постріли. Ці 4 постріли здійснюються в режимі MRSI за t_{fire}=30 с. Після цього САС може залишити TFP за час $t_{prep_fire} + t_{fire}$=50 с. Якщо САС буде зафіксована супротивником після 4-го пострілу, то за час польоту снарядів ворога t_{flight}= 60 с. вона на швидкості 60 км/год. переміститься на відстань 1 км від TFP. Загальний час на виконання бойового завдання $t^* = t_{prep_fire} + t_{fire} + t_{flight}$= 20с +30 с + 60с = 110с., що не перевищує тривалості вікна особливої небезпеки Δt_{WED}=300 с.

Приклад 2. САС знаходиться за результатами динамічного оцінювання в стані $State^t < 1{,}1.1; 2{,}2.2; 3{,}3.1; 4{,}4.2; 5{,}5.2 >$ (САС виконано одну вогневу дію). Тоді p = 0,7. Для ураження цілі з імовірністю p*= 0,95 згідно з (3.19) потрібно n^{**}= 7 пострілів. Стрільба ведеться у звичному режимі зі швидкострільністю 6 пострілів у хвилину. У такому разі t_{fire}=70 с. САС може залишити TFP за час $t_{prep_fire} + t_{fire}$= 90 с. Якщо САС буде зафіксована супротивником після 4-го пострілу (через 40 с), то за час $t_{prep}^{enemy} + t_{flight}$ прильоту снарядів супротивника 20с+60с=80 с. вона переміститься зі швидкістю 40 км/год. на відстань приблизно 0,8 км від TFP й уникне прямого влучання. Загальний час на виконання бойового

завдання $t^* = t_{prep_fire} + t_{fire} + t_{flight}$= 20с +70 с + 60 с = 150 с., що не перевищує тривалості вікна особливої небезпеки Δt_{WED}=300 с .

Приклад 3. САС знаходиться за результатами динамічного оцінювання_в стані $State^t < 1{,}1.1; 2{,}2.2; 3{,}3.1; 4{,}4.2; 5{,}5.3 >$ (САС виконала дві вогневі дії), при p=0,5. Для ураження цілі з імовірністю p*=0,95 згідно з (3.19) потрібно n^{**}= 10 пострілів. Стрільба ведеться у звичному режимі зі швидкострільністю 5 пострілів у хвилину. Тоді t_{fire}=120 с. Після 4-го пострілу САС буде помічена супротивником, снаряди ворога досягнуть TFP за час 20 с+60 с = 80 с. з моменту 4-го пострілу (тобто на 138 секунд) з початку вогневої діяльності. Резерв часу на переміщення САС складає 18 секунд, цього недостатньо для переміщення, і САС буде уражена. Проте до цього моменту нею буде випущено 10 снарядів, що гарантують ураження цілі підвищеної небезпеки з імовірністю 0,95. Загальний час на виконання бойового завдання $t^* = t_{prep_fire} + t_{fire} + t_{flight}$= 20с +120 с + 60 с = 200 с., що не перевищує тривалості вікна особливої небезпеки Δt_{WED}= 300 с. Цей приклад демонструє, як ціною втрати САС ціль підвищеної небезпеки може бути гарантовано уражена.

Розглянуті приклади демонструють, що розроблена чотирикомпонентна модель бойових дій окремої самохідної артилерійської системи у складній тактичній ситуації (рис. 3.10) дозволяє оцінити боєздатність САС під час виконання завдання ураження раптово виявленої цілі підвищеної небезпеки.

Запропоновану модель можна використовувати і в іншій постановці бойового завдання. Застосування моделі дозволяє оцінити для відомого боєзапасу та стану САС імовірність ураження цілі підвищеної небезпеки. Якщо ця ймовірність не висока, то виконання бойового завдання таргетингу недоцільне і загрожує втратою САС.

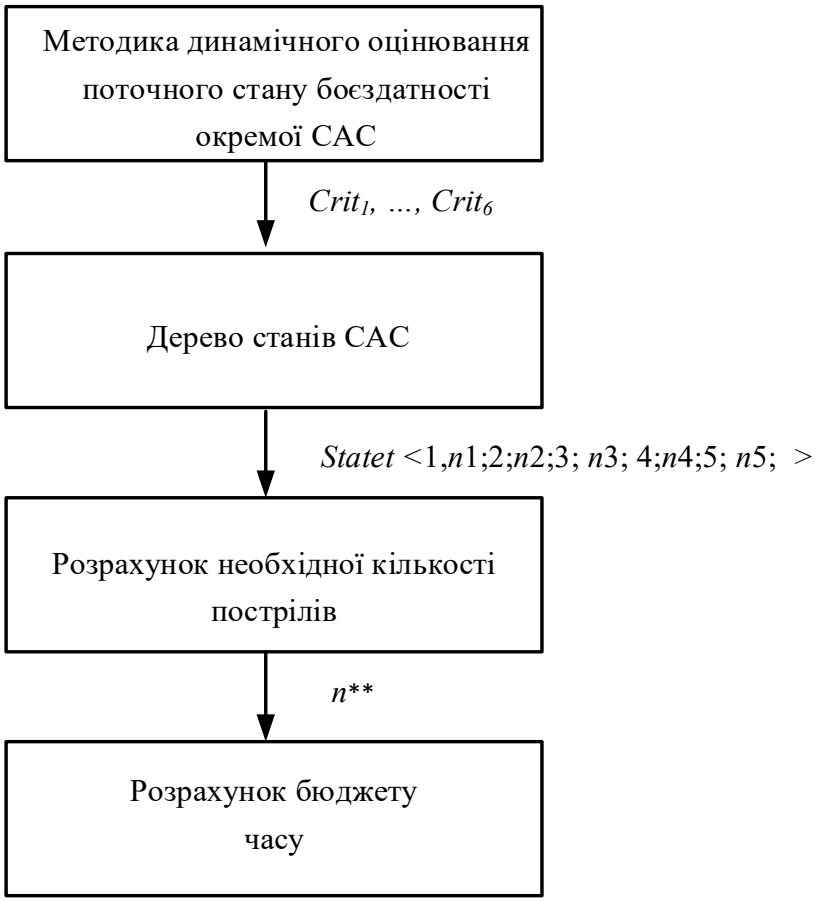

Рис. 3.10. Чотирикомпонентна модель бойових дій окремої самохідної артилерійської системи

Джерело: розроблено автором за [34]

Розроблено модель бойових дій окремої самохідної артилерійської системи нового покоління. Продемонстровано можливість застосування подібної системи для ураження раптової цілі підвищеної небезпеки.

РОЗДІЛ 4

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТРЬОХ АКУСТИЧНИХ СЕНСОРІВ ДЛЯ РЕЄСТРАЦІЇ БАЛІСТИЧНОЇ ХВИЛІ АРТИЛЕРІЙСЬКОГО ПОСТРІЛУ

Для реалізації методу верифікації артилерійського пострілу з випадковими збуреннями, необхідно мати в наявності вимірювальну систему [24], яка складається з метеостанції, трьох акустичних сенсорів, розрахункового блока та інших допоміжних елементів. Причому ефективність застосування даного методу та розглянутої системи для визначення координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею, головним чином, залежить від точності реєстрації балістичної хвилі пострілу за допомогою трьох наведених акустичних вимірювачів. У свою чергу, на точність реєстрації балістичної хвилі та успішність подальшої параболічної апроксимації впливає низка факторів, серед яких похибка вимірювання та ймовірність працездатного стану акустичних сенсорів, їх розташування по відношенню до лінії напрямку стрільби та ін.

Оскільки акустичні вимірювачі розміщуються попередньо у зоні ведення пострілів, а положення артилерійських гармат та координати цілей, що повинні бути уражені, можуть змінюватися в процесі ведення стрільби в залежності від отриманих вогневих завдань, то головною метою перед кожним пострілом є вибір трьох вимірювачів серед наявної кількості, які б найкращим чином підходили для реєстрації балістичної хвилі. Для розв’язання наведеного складного завданням доцільним є застосування методу визначення трьох акустичних сенсорів для реєстрації балістичної хвилі артилерійського пострілу, розробка якого представлена у даному розділі. Водночас для розробки наведеного методу необхідно спочатку проаналізувати особливості побудови сенсорної системи верифікації пострілів у зоні ведення артилерійської стрільби.

4.1 Особливості побудови сенсорної системи верифікації пострілів у зоні ведення артилерійської стрільби

Для здійснення верифікації пострілів гармат в зоні ведення артилерійської стрільби повинна бути розгорнута сенсорна система, що має структуру, наведену на рис. 4.1.

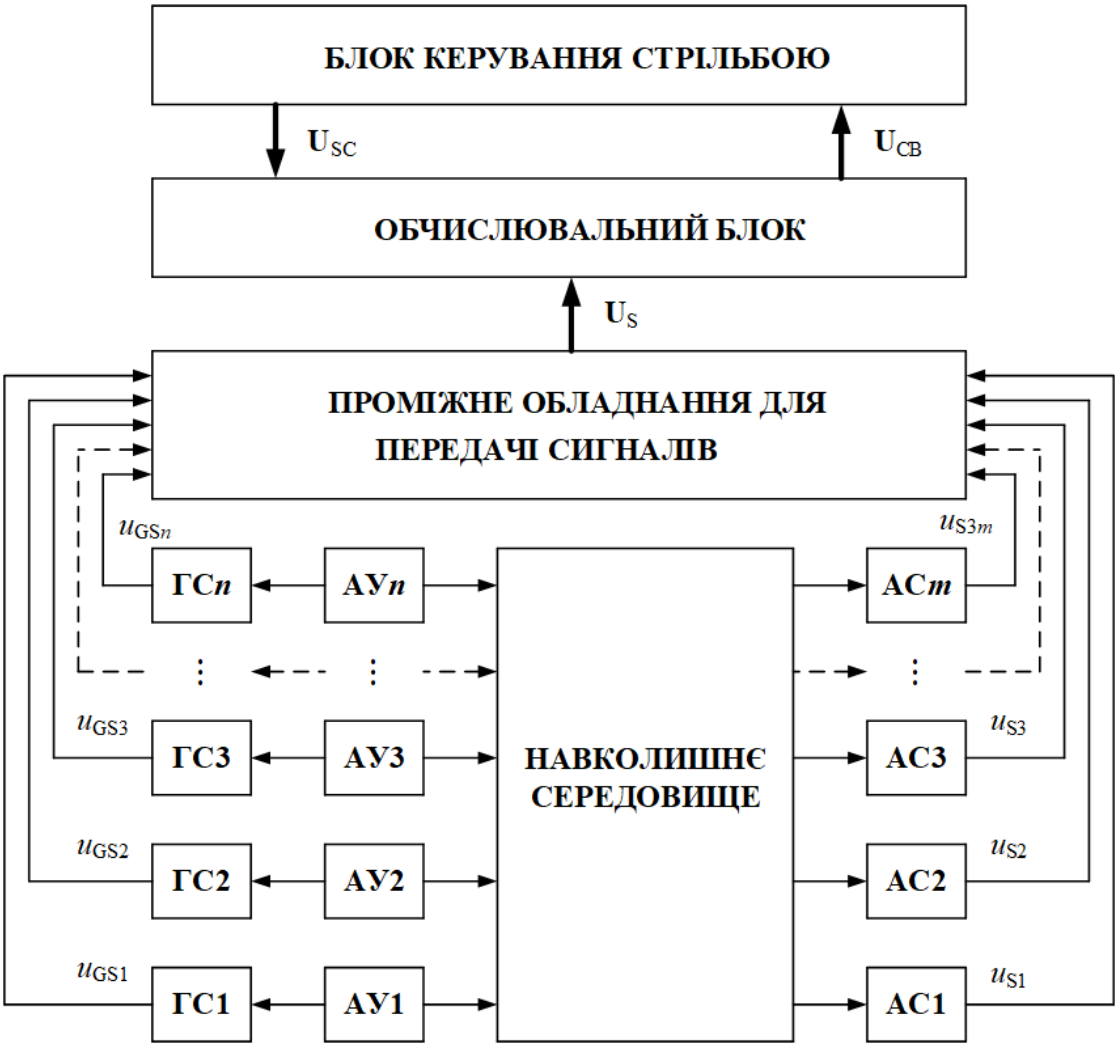

Рис. 4.1 Функціональна структура сенсорної системи для верифікації пострілів артилерійських гармат

Джерело: розроблено автором за [38]

На рис. 4.1 прийнято такі позначення: АУ1, АУ2, АУ3, …, АУ*n* – артилерійські установки, які знаходяться у зоні ведення стрільби і виконують отримані вогневі завдання; ГС1, ГС2, ГС3, …, ГС*n* – групи сенсорів, які

встановлені безпосередньо на артилерійських установках або знаходяться біля них; АС1, АС2, АС3, …, АСm – акустичні сенсори, що розподілені у зоні ведення артилерійської стрільби; u_{GS1}, u_{GS2}, u_{GS3}, …, u_{GSn} – вихідні сигнали груп сенсорів ГС1, ГС2, ГС3, …, ГСn; u_{S1}, u_{S2}, u_{S3}, …, u_{Sm} – вихідні сигнали акустичних сенсорів АС1, АС2, АС3, …, АСm; $\mathbf{U}_S$ – вектор сигналів, що надходять від проміжного обладнання для передачі сигналів до обчислювального блока; $\mathbf{U}_{CB}$ – вектор сигналів, що надходять від обчислювального блока до блока керування стрільбою; $\mathbf{U}_{SC}$ – вектор сигналів, що надходять від блока керування стрільбою до обчислювального блока.

До груп сенсорів ГС1, ГС2, ГС3, …, ГСn входять вимірювачі, які визначають початкову швидкість снарядів на виході з відповідних гармат, метеостанції та інші сенсори, що вимірюють поточні координати та параметри технічного стану n артилерійських установок, які виконують отримані вогневі завдання.

У свою чергу, у зоні ведення стрільби знаходяться m акустичних сенсорів, які застосовуються для реєстрації балістичних та дульних хвиль, утворених снарядами артилерійських установок, що здійснюють постріли, причому $m >> n$. Наведені акустичні сенсори розташовуються у зоні ведення стрільби за допомогою БПЛА або інших дистанційних засобів з рівномірним розподіленням та мінімальною щільністю, яка б забезпечувала достатню точність реєстрації балістичних та дульних хвиль усіх n наявних артилерійських систем.

На рис. 4.2 та 4.3 для наочності представлені схеми розміщення акустичних сенсорів на місцевості в зоні ведення вогню для випадків, коли лінія напрямку стрільби паралельна осі Оy та проходить під кутом α до неї. До того ж на рис. 4.2 та 4.3 прийнято позначення: 1 – артилерійська установка; 2 – ціль; 3 – i-й акустичний сенсор (i = 1, 2, …, m); $x_{АУ}$, $y_{АУ}$ – координати артилерійської установки; $x_ц$, $y_ц$ – координати цілі; x_i, y_i – координати i-го акустичного сенсора; α – кут між лінією напрямку стрільби та віссю Оy.

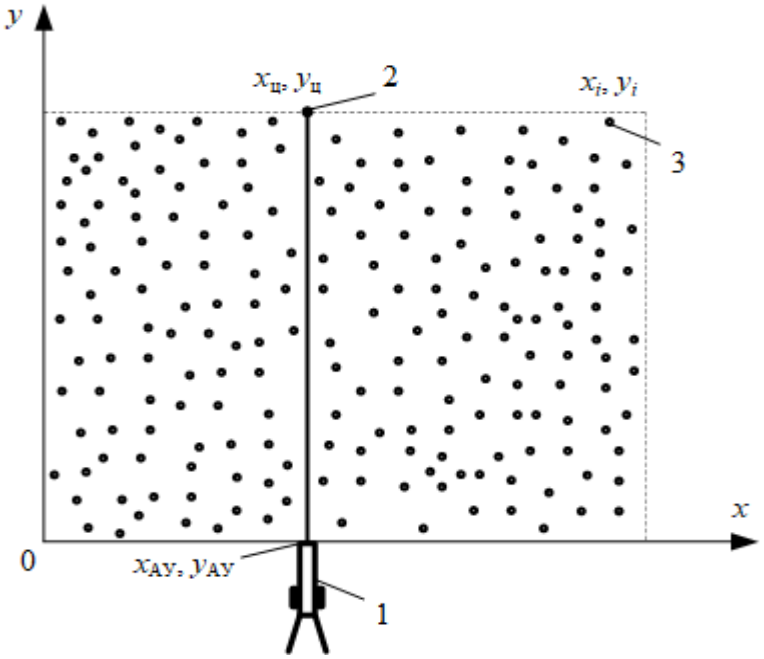

Рис. 4.2 Схема розміщення акустичних сенсорів на місцевості в зоні ведення артилерійського вогню (лінія напрямку стрільби паралельна осі О*y*)

Джерело: розроблено автором за [38]

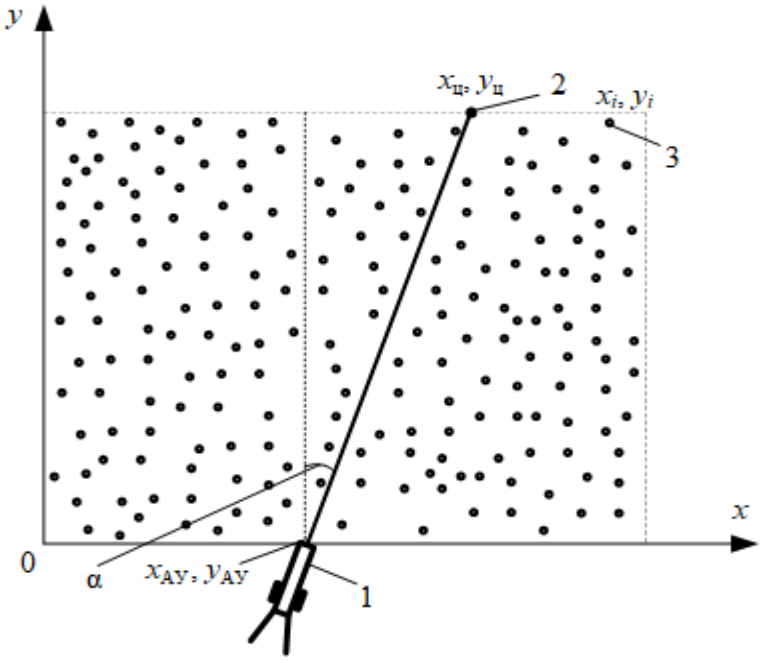

Рис. 4.3 Схема розміщення акустичних сенсорів на місцевості в зоні ведення артилерійського вогню (лінія напрямку стрільби проходить під кутом α до осі О*y*)

Джерело: розроблено автором за [38]

Точність реєстрації балістичних та дульних хвиль в залежності від відстані між акустичним сенсором та лінією напрямку стрільби визначається експериментальним шляхом. У більшості випадків для ефективної реєстрації балістичних та дульних хвиль артилерійського пострілу, відстань між акустичним сенсором та лінією напрямку стрільби повинна бути не більше, ніж 50 м. Також проведення фіксації балістичної хвилі за допомогою акустичних сенсорів можливе тільки у зоні польоту снаряда з надзвуковою швидкістю. Таким чином, вибір трьох акустичних сенсорів для реєстрації параметрів артилерійського пострілу може бути здійснений з сенсорів, що знаходяться на місцевості в межах паралелограма ABCD, як показано на рис. 4.4 та 4.5.

Зокрема, на рис. 4.4 та 4.5 позначено: x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3 – координати першого, другого та третього акустичних сенсорів, обраних для реєстрації балістичних та дульних хвиль з множини сенсорів, обмеженої паралелограмом ABCD; d_1, d_2, d_3 – відстані між першим, другим та третім акустичними сенсорами відповідно до лінії напрямку стрільби.

У даному випадку ширина зони ефективної реєстрації балістичних та дульних хвиль артилерійського пострілу за допомогою сенсорів AD (рис. 4.4, рис. 4.5) складає 100 м. Довжина зони дії балістичної хвилі AB попередньо визначається на основі встановленої дальності стрільби як довжина ділянки польоту снаряда, на якій зберігається надзвукова швидкість. Довжина даної ділянки розраховується за допомогою математичної та імітаційної моделей польоту снаряда [103, 104], що розроблені на базі стандарту НАТО STANAG 4355.

У зазначеній позиції (рис. 4.4, рис. 4.5) вибір трьох вимірювачів з координатами x_1, y_1, x_2, y_2 та x_3, y_3 серед наявної кількості здійснений за найменшими відстанями (d_1, d_2, d_3) від даних акустичних сенсорів до лінії напрямку стрільби.

Для зменшення загальної кількості акустичних сенсорів у зоні ведення стрільби вони можуть бути розміщені в три смуги, як показано на рис. 4.6 та рис. 4.7 відповідно.

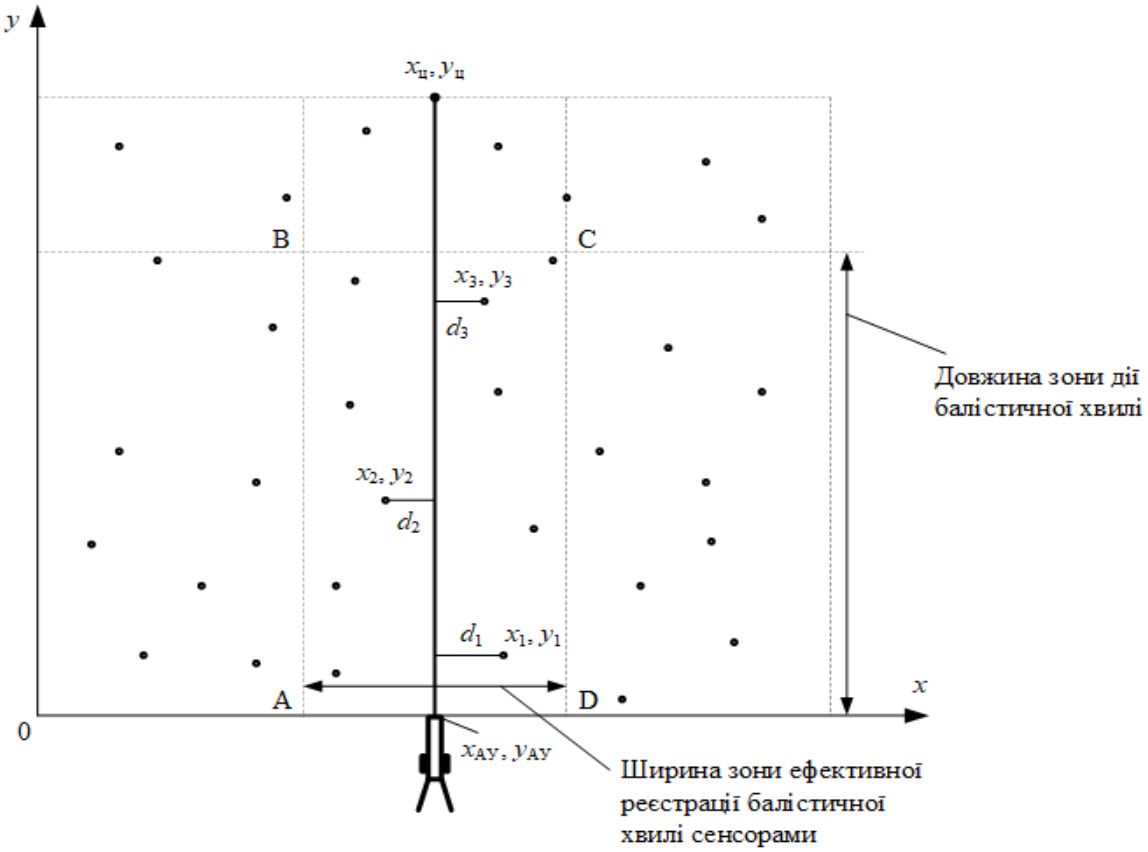

Рис. 4.4 Визначення найближчих вимірювачів до лінії напрямку стрільби (лінія напрямку стрільби паралельна осі О*y*)

Джерело: розроблено автором за [38]

На рис. 4.6 та рис. 4.7 позначено: I, II, III – перша, друга та третя смуги сенсорів; D_1, D_2, D_3 – значення ширини першої, другої та третьої смуг сенсорів. У свою чергу, перший, другий та третій акустичні сенсори для реєстрації балістичних та дульних хвиль артилерійського пострілу обираються, відповідно, з першої, другої та третьої смуг сенсорів. Причому всі три смуги повинні бути розташовані у зоні дії балістичної хвилі. Оскільки поточні значення координат артилерійських установок і цілей можуть змінюватися в залежності від отриманих вогневих завдань, то значення ширини відповідних смуг D_1, D_2 та D_3, а також

відстані між ними повинні бути обрані в залежності від попередньо визначеної усередненої дальності стрільби в даній операційній зоні.

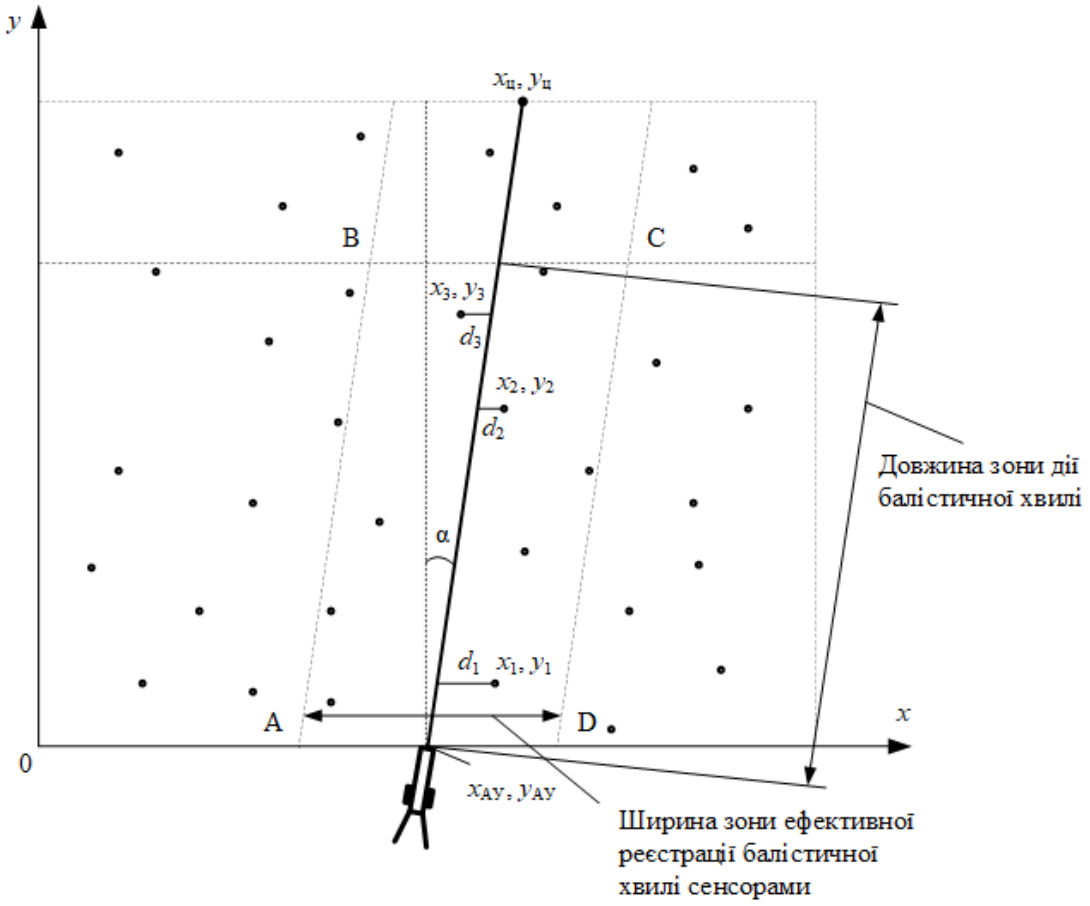

Рис. 4.5 Визначення найближчих вимірювачів до лінії напрямку стрільби (лінія напрямку стрільби проходить під кутом α до осі О*y*)
Джерело: розроблено автором за [38]

До складу проміжного обладнання, що застосовується для передачі сигналів від сенсорів (вектор сигналів $\mathbf{U}_S$) до обчислювального блока, входять певні проміжні вузли та канали зв'язку, які разом утворюють спеціалізовану мережу передачі даних. Так як кількість сенсорів досить велика (може налічувати кілька тисяч або десятків тисяч), то передача даних напряму від вимірювачів до обчислювального блока безпосередньо через канали зв'язку є досить ускладненою. Це пояснюється тим, що така мережа передачі сигналів матиме високу складність і досить низьку надійність, що, безумовно, значно підвищить загальну вартість та знизить надійність всієї системи.

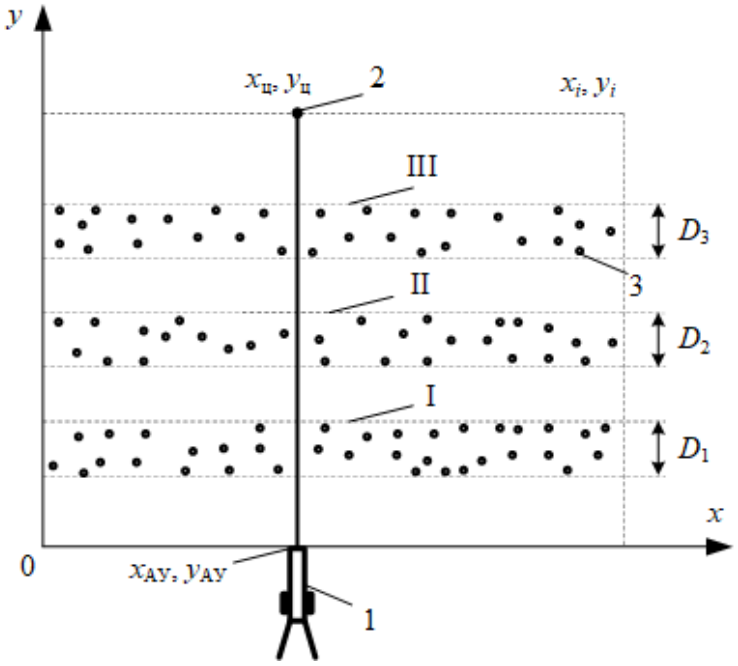

Рис. 4.6 Схема розміщення акустичних сенсорів у три смуги в зоні ведення артилерійського вогню (лінія напрямку стрільби паралельна осі O*y*)

Джерело: розроблено автором за [38]

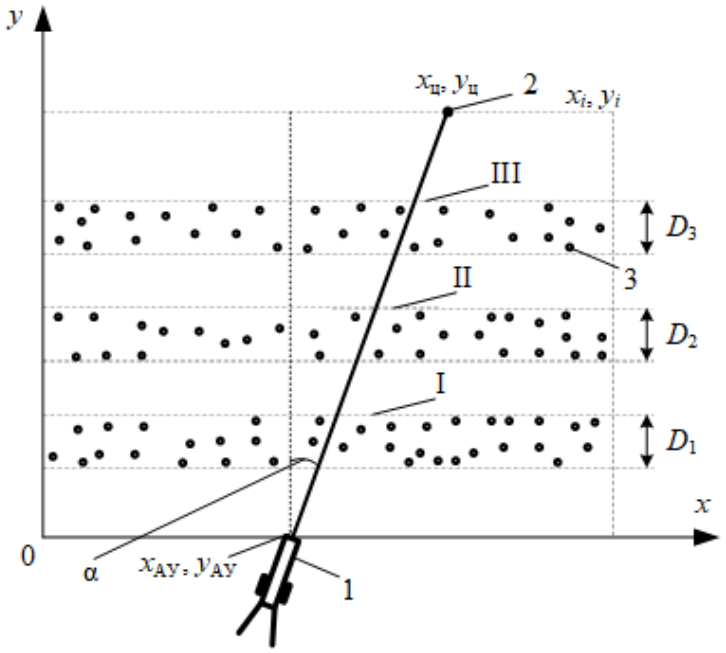

Рис. 4.7 Схема розміщення акустичних сенсорів у три смуги в зоні ведення артилерійського вогню (лінія напрямку стрільби проходить під кутом α до осі O*y*)

Джерело: розроблено автором за [38]

Тому для зниження складності та підвищення надійності розглянутої мережі передачі даних, її структуру доцільно формувати за ієрархічним принципом. Для цього необхідно застосовувати проміжні вузли збору даних, які будуть виконувати функції групування сигналів з певною обробкою інформації. Так, проміжні вузли 1-го рівня ієрархії будуть групувати й обробляти сигнали від сенсорів та надсилати їх до вузлів 2-го рівня ієрархії і далі до обчислювального блока системи. Зокрема, передача сигналів від сенсорів до вузлів мережі, а також безпосередньо між вузлами здійснюється за допомогою радіозв'язку. З'єднання між вузлами верхніх рівнів, а також з обчислювальним блоком для підвищення надійності може бути реалізовано за допомогою дротового зв'язку.

Формування ієрархічної структури розглянутої мережі передачі сигналів від сенсорів може бути здійснена таким чином. Спочатку створюється вектор структури мережі **S** з розмірністю $j_{\max}$, що відповідає загальній (попередньо обраній) кількості рівнів ієрархії. Кожна змінна даного вектору S_j ($j = 1, \ldots, j_{\max}$) відповідає обраній кількості вузлів на j-му рівні ієрархії. У свою чергу, кількість вузлів S_j на j-му рівні ієрархії обирається згідно з умовою (4.1),

$$S_j \le \text{floor}\left(\frac{S_{j-1}}{2}\right), \tag{4.1}$$

оскільки кожен вузол даного рівня ієрархії повинен мати мінімум 2 входи ($k_j \ge 2$, $j = 1, \ldots, j_{\max}$). При цьому $S_{j\max} = 1$, оскільки на останньому рівні ієрархії знаходиться єдиний головний вузол мережі, під'єднаний безпосередньо до обчислювального блока системи. Також на передостанньому рівні ієрархії ($j_{\max} - 1$) кількість вузлів повинна бути не менше 2-х ($S_{j\max - 1} \ge 2$).

Після того, як на кожному j-му рівні ієрархії структури обрано S_j вузлів, можна розрахувати кількість входів k_j для кожного вузла на основі залежності (4.2)

$$k_j = \frac{S_{j-1}}{S_j}. \tag{4.2}$$

Якщо розраховане значення k_j є цілим числом, то всі вузли певного рівня ієрархії матимуть дану кількість входів.

В іншому випадку кількість входів вузлів розраховується таким чином. У даному рівні ієрархії будуть вузли з кількістю входів, що дорівнює найбільшому цілому числу, меншому, ніж k_j, та з кількістю входів, що дорівнює найменшому цілому числу, більшому, ніж k_j . При цьому кількість вузлів з кількістю входів, що дорівнює найменшому цілому числу, більшому, ніж k_j, у відсотках від загальної кількості вузлів даного рівня ієрархії дорівнюватиме дробовій частині розрахованого числа k_j.

Наприклад, $S_{j-1} = 1000$, $S_j = 237$. Тоді, k_j, згідно з виразом (4.2), дорівнюватиме 4,2194. Це означає, що у j-му рівні ієрархії буде 21,94% вузлів з 5-ма входами (52 вузла) та 78,06% вузлів з 4-ма входами (185 вузлів). Сумарна кількість вузлів складатиме 52 + 185 = 237, сумарна кількість їх входів дорівнюватиме $52 \cdot 5 + 185 \cdot 4 = 1000$.

Після визначення кількості входів для всіх вузлів кожного рівня ієрархії на основі сформованого вектора **S** може бути побудована відповідна ієрархічна структура мережі передачі сигналів від сенсорів. На кожному j-му рівні ієрархії системи створюється S_j вузлів. Дані вузли послідовно з'єднуються каналами зв'язку, починаючи з 1-го рівня ієрархії до останнього $j_{\max}$. При цьому вузли рівня $j - 1$ з'єднуються тільки з вузлами рівня j з урахуванням кількості входів останніх. Вихід кожного вузла рівня $(j - 1)$ може бути з'єднаний тільки з одним входом вузла рівня j. Після встановлення усіх необхідних каналів між відповідними вузлами побудова структури розглянутої мережі передачі інформації є завершеною.

Для наочності, як приклад, наведемо 3 різні структури мережі передачі сигналів для однакової кількості первинних сенсорів $S_0 = 13$. У структурі на рис. 4.8 інформація передається безпосередньо від первинних сенсорів до головного і єдиного вузла, який під'єднаний прямо до обчислювального блока системи.

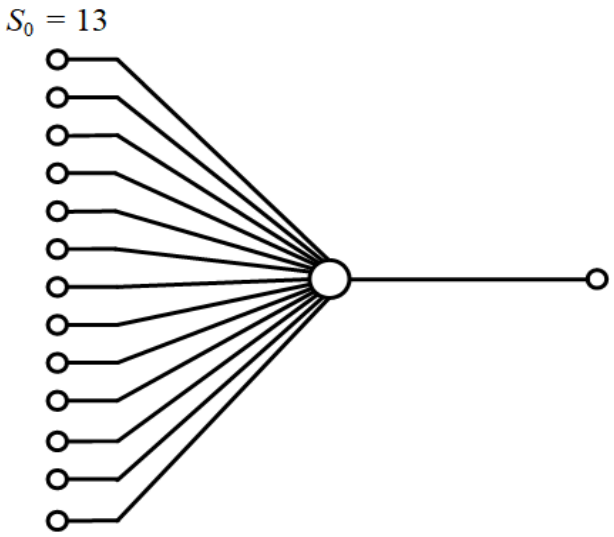

Рис. 4.8 Мережа з безпосередньою передачею інформації від сенсорів до обчислювального блока системи

Джерело: розроблено автором за [38]

Так, мережі, що наведені на рис. 4.9 та рис. 4.10, мають розгалужену ієрархічну структуру з кількістю рівнів ієрархії $j_{\max} = 2$ та $j_{\max} = 3$ відповідно.

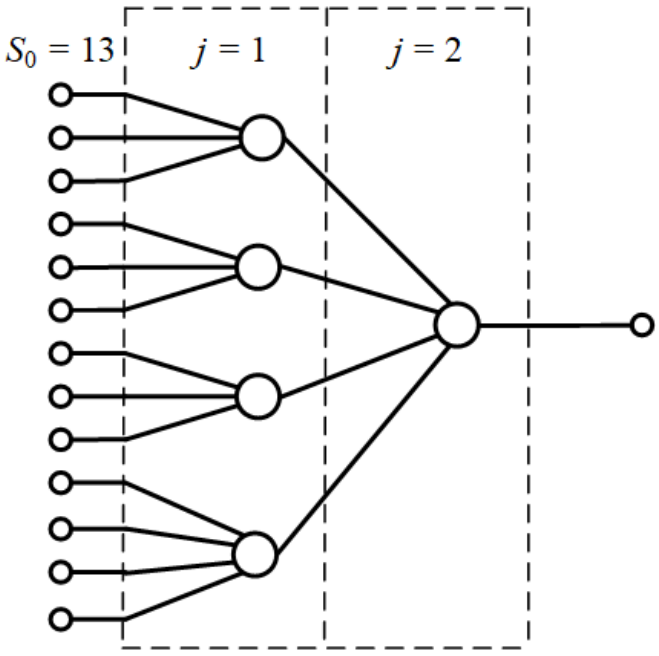

Рис. 4.9 Мережа передачі сигналів від сенсорів з ієрархічною структурою ($j_{\max} = 2$)

Джерело: розроблено автором за [38]

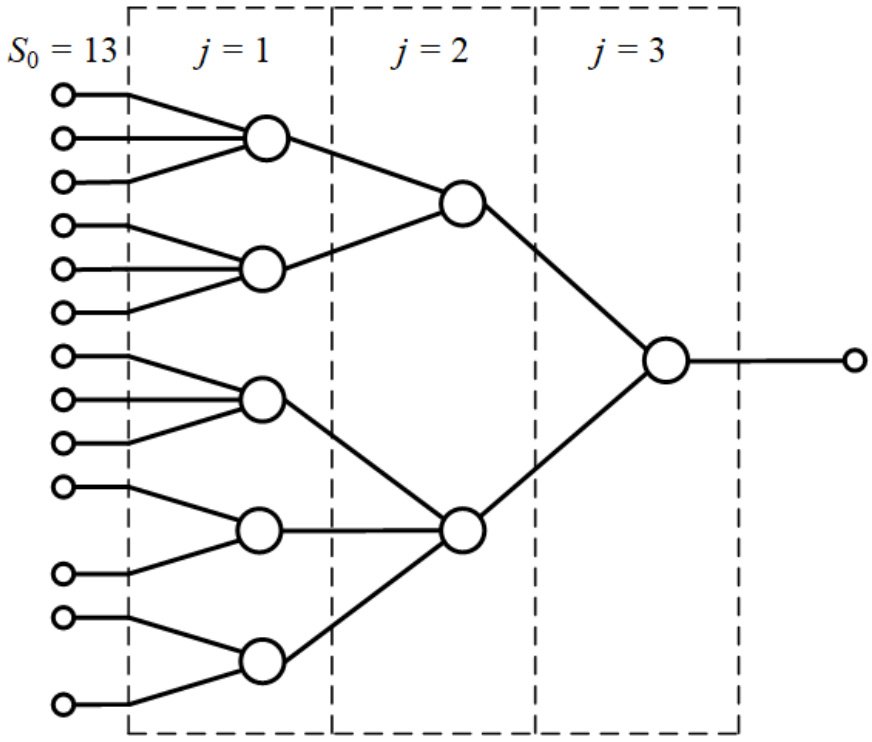

Рис. 4.10 Мережа передачі сигналів від сенсорів з ієрархічною структурою ($j_{max} = 3$)

Джерело: розроблено автором за [38]

На рис. 4.8-4.10 прийнято такі позначення: j – номер рівня ієрархії; j_{max} – загальна кількість рівнів ієрархії.

Для даних структур вектори **S** представлені виразами (4.3) та (4.4) відповідно:

$$\mathbf{S} = \{4,1\}; \tag{4.3}$$

$$\mathbf{S} = \{5,2,1\}. \tag{4.4}$$

Блок керування стрільбою в залежності від отриманих вогневих завдань надсилає до обчислювального блока вектор сигналів $\mathbf{U}_{SC}$, який містить поточні координати визначених цілей для ураження. У свою чергу, обчислювальний блок на основі векторів сигналів $\mathbf{U}_S$ (від мережі передачі сигналів сенсорів) та $\mathbf{U}_{SC}$ здійснює верифікацію артилерійських пострілів з випадковими збуреннями та визначає координати зіткнення снарядів з поверхнею за допомогою методу, який запропоновано у розділі 3. Крім того, перед кожним пострілом обчислювальний блок визначає три сенсори серед наявної кількості вимірювачів, які найкращим

чином підходять для реєстрації балістичної та дульної хвиль. Усю отриману інформацію в ході проведених обчислень (координати зіткнення снарядів з поверхнею, обрані сенсори для верифікації ті ін.) даний блок надсилає до блока керування стрільбою у вигляді вектору сигналів $\mathbf{U}_{\text{СВ}}$. При цьому задача визначення трьох найкращих сенсорів для реєстрації балістичної хвилі в процесі верифікації артилерійських пострілів в обчислювальному блоці розв'язується на основі методу, запропонованому у наступному підрозділі.

4.2 Розробка методу визначення трьох акустичних сенсорів для реєстрації балістичної хвилі артилерійського пострілу

Запропонований метод дозволяє здійснювати визначення трьох акустичних сенсорів, які б найкращим чином підходили для реєстрації балістичної хвилі в процесі верифікації артилерійських пострілів, на основі відомих значень поточних координат цілі, самої артилерійської установки та усіх функціонуючих акустичних сенсорів, що розподілені у зоні ведення артилерійської стрільби. Координати цілі надходять від блока керування стрільбою в залежності від отриманого вогневого завдання. Поточні координати артилерійської установки та кожного з функціонуючих акустичних сенсорів, розташованих у зоні ведення стрільби, визначаються за допомогою їх вбудованих навігаційних систем.

На початковому етапі на основі отриманих координат цілі та артилерійської установки визначаються необхідна дальність стрільби $L_{\text{с}}$ та кут α до осі Оy (рис. 4.5), а також складається рівняння лінії напрямку стрільби для поточного пострілу. Водночас дальність стрільби та кут α розраховуються на основі залежностей (4.5) та (4.6), а рівняння лінії напрямку стрільби у вигляді загального рівняння прямої на площині записується у вигляді виразу (4.7) [105-107]:

$$L_{\text{с}} = \sqrt{\left(x_{\text{ц}} - x_{\text{АУ}}\right)^2 + \left(y_{\text{ц}} - y_{\text{АУ}}\right)^2}; \qquad (4.5)$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{x_{\text{ц}} - x_{\text{АУ}}}{L_{\text{с}}}\right); \tag{4.6}$$

$$a_{\text{лс}}x + b_{\text{лс}}y + c_{\text{лс}} = 0, \tag{4.7}$$

де $x_{\text{ц}}$, $y_{\text{ц}}$ – координати цілі; $x_{\text{АУ}}$, $y_{\text{АУ}}$ – координати артилерійської установки; $a_{\text{лс}}$, $b_{\text{лс}}$, $c_{\text{лс}}$ – коефіцієнти рівняння лінії напрямку стрільби. До того ж у даному випадку кут α може приймати значення лише від –90° до 90° і збільшуватись у напрямку за годинниковою стрілкою. Коефіцієнти рівняння прямої на площині (4.7) $a_{\text{лс}}$, $b_{\text{лс}}$ та $c_{\text{лс}}$ знаходяться з використанням певних виразів аналітичної геометрії [105] або за допомогою методу найменших квадратів на основі відомих координат цілі та артилерійської установки [108].

Для суттєвого зменшення обсягу розрахунків в процесі вибору трьох найбільш доцільних акустичних сенсорів на початковому етапі варто із загальної кількості всіх функціонуючих сенсорів системи відсортувати лише ті, які входять до зони можливої реєстрації балістичної та дульної хвиль поточного артилерійського пострілу. У свою чергу, дана зона обмежується паралелограмом ABCD, як показано на рис. 4.4 та 4.5. Ширину AD даної зони доцільно встановлювати в залежності від точності реєстрації балістичних та дульних хвиль сенсорами (у більшості випадків не більше ніж 100 м). Довжина AB визначається як довжина ділянки польоту снаряда з надзвуковою швидкістю $L_{\text{ндш}}$ за допомогою моделі польоту снаряда [103, 104] на основі попередньо розрахованої за формулою (4.5) дальності стрільби $L_{\text{с}}$.

Для визначення зони можливої реєстрації балістичної та дульної хвиль артилерійського пострілу та подальшого вибору сенсорів, які в ній знаходяться, необхідно спочатку знайти координати точок A, B, C, D, а також визначити рівняння чотирьох прямих, що проходять через ці точки.

Координати точок A та D знаходяться на основі поточних координат артилерійської установки за допомогою виразів (4.8) та (4.9) відповідно:

$$x_{\text{A}} = x_{\text{АУ}} - \frac{L_{\text{AD}}}{2}; y_{\text{A}} = y_{\text{АУ}}; \tag{4.8}$$

$$x_{\text{D}} = x_{\text{АУ}} + \frac{L_{\text{AD}}}{2}; y_{\text{D}} = y_{\text{АУ}}, \tag{4.9}$$

де L_{AD} – довжина відрізка AD.

Координати точок B та C знаходяться на основі координат точки на лінії напрямку стрільби, в якій снаряд втрачає надзвукову швидкість, за допомогою виразів (4.10) та (4.11) відповідно:

$$x_{\text{B}} = x_{\text{вш}} - \frac{L_{\text{BC}}}{2}; y_{\text{B}} = y_{\text{вш}}; \tag{4.10}$$

$$x_{\text{C}} = x_{\text{вш}} + \frac{L_{\text{BC}}}{2}; y_{\text{C}} = y_{\text{вш}}, \tag{4.11}$$

де $x_{\text{вш}}$, $y_{\text{вш}}$ – координати точки на лінії напрямку стрільби, в якій снаряд втрачає надзвукову швидкість; L_{BC} – довжина відрізка BC ($L_{\text{BC}} = L_{\text{AD}}$).

Так, координати точки на лінії напрямку стрільби, в якій снаряд втрачає надзвукову швидкість, розраховуються на основі визначеної довжини ділянки польоту снаряда з надзвуковою швидкістю $L_{\text{ндш}}$, кута α та поточних координат артилерійської установки за допомогою виразів (4.12) та (4.13) відповідно:

$$x_{\text{вш}} = x_{\text{АУ}} + L_{\text{ндш}} \sin\alpha; \tag{4.12}$$

$$y_{\text{вш}} = y_{\text{АУ}} + L_{\text{ндш}} \cos\alpha. \tag{4.13}$$

Далі визначаються рівняння чотирьох прямих, що проходять через такі точки: 1) A та B; 2) D та C; 3) A та D; 4) B та C. Для спрощення розрахунків рівняння даних прямих доцільно представити у вигляді рівнянь прямих з кутовими коефіцієнтами:

$$y = a_{\text{AB}}x + b_{\text{AB}}; \tag{4.14}$$

$$y = a_{\text{DC}}x + b_{\text{DC}}; \tag{4.15}$$

$$y = a_{\text{AD}}x + b_{\text{AD}}; \tag{4.16}$$

$$y = a_{\text{BC}}x + b_{\text{BC}}, \tag{4.17}$$

де a_{AB}, b_{AB}, a_{DC}, b_{DC}, a_{AD}, b_{AD}, a_{BC}, b_{BC} – коефіцієнти рівнянь прямих. Дані коефіцієнти знаходяться з використанням певних виразів аналітичної геометрії [105] або за допомогою методу найменших квадратів на основі координат точок A, B, C та D [108].

Після цього на основі рівнянь прямих (4.14)-(4.17) та їх визначених коефіцієнтів складаються умови (4.18), на виконання яких здійснюється послідовна перевірка всіх функціонуючих акустичних сенсорів системи за їх координатами. Маємо,

$$\begin{cases} x_i \geq \dfrac{y_i - b_{AB}}{a_{AB}}; \\ x_i \leq \dfrac{y_i - b_{DC}}{a_{DC}}; \\ y_i \geq a_{AD} x_i + b_{AD}; \\ y_i \leq a_{BC} x_i + b_{BC}, \end{cases} \tag{4.18}$$

де x_i, y_i – координати i-го акустичного сенсора системи.

Якщо координати i-го сенсора задовольняють умовам (4.18), то він входить до зони можливої реєстрації балістичної та дульної хвиль артилерійського пострілу і може бути обраний як один із трьох найбільш доцільних сенсорів.

Після проведення даного сортування усі сенсори, що пройшли перевірку на виконання умов (4.18) з позитивним результатом, нумеруються за порядком та відбираються для подальших розрахунків, спрямованих на знаходження трьох найбільш придатних вимірювачів для реєстрації балістичної та дульної хвиль. Усі інші акустичні сенсори, що не входять у зону, обмежену паралелограмом ABCD, в наступних етапах методу не застосовуються.

На подальших розрахункових етапах запропонованого методу серед набору відібраних сенсорів визначаються тільки три вимірювачі, які є найбільш придатними для реєстрації балістичної та дульної хвиль. Для вибору даних трьох акустичних сенсорів усі відібрані сенсори оцінюються за такими параметрами.

Першим параметром, який суттєво впливає на придатність акустичного сенсора для якісної реєстрації балістичної та дульної хвиль, є його положення вздовж лінії напрямку стрільби, що визначається відстанню d_l від артилерійської установки до точки на лінії напрямку стрільби, максимально близької до даного сенсора.

Для більш точної верифікації артилерійських пострілів реєстрацію балістичної та дульної хвиль доцільно здійснювати на другій половині ділянки польоту снаряда з надзвуковою швидкістю і якомога ближче до її кінця [19, 24]. Крім того, усі три акустичні сенсори повинні бути розміщені рівномірно вздовж лінії напрямку стрільби для забезпечення належної фіксації балістичної та дульної хвиль у трьох різних точках. Також останній третій сенсор не можна встановлювати надто близько до точки з координатами $x_{\text{вш}}$, $y_{\text{вш}}$, в якій снаряд втрачає надзвукову швидкість, оскільки дана точка визначається з певною похибкою, і може виникнути ситуація, коли третій сенсор опиниться поза зоною польоту снаряда з надзвуковою швидкістю. Тому в якості оптимальних відстаней від артилерійської установки до першого, другого та третього сенсорів вздовж лінії напрямку стрільби доцільно попередньо встановити такі значення: $d_{l1\text{opt}} = 0{,}5L_{\text{ндш}}$; $d_{l2\text{opt}} = 0{,}7L_{\text{ндш}}$; $d_{l3\text{opt}} = 0{,}9L_{\text{ндш}}$, де $L_{\text{ндш}}$ – довжина ділянки польоту снаряда з надзвуковою швидкістю для поточного пострілу.

Таким чином, при виборі найбільш придатних першого, другого або третього акустичних сенсорів необхідно для кожного i-го сенсора, що знаходиться у зоні можливої реєстрації балістичної та дульної хвиль (ABCD), розрахувати параметр d_{li} та порівняти його значення з відповідним попередньо встановленим оптимальним значенням $d_{l1\text{opt}}$, $d_{l2\text{opt}}$ або $d_{l3\text{opt}}$.

Водночас відстань d_{li} для i-го акустичного сенсора розраховується на основі координат даного сенсора та отриманого загального рівняння лінії напрямку стрільби (4.7) таким чином. Спочатку визначаються координати x_{pi}, y_{pi} точки на

лінії напрямку стрільби, найбільш близької до даного сенсора, за допомогою виразів (4.19) та (4.20) [105-107]:

$$x_{pi} = \frac{b_{\text{лс}}\left(b_{\text{лс}}x_i - a_{\text{лс}}y_i\right) - a_{\text{лс}}c_{\text{лс}}}{a_{\text{лс}}^2 + b_{\text{лс}}^2}; \tag{4.19}$$

$$y_{pi} = \frac{a_{\text{лс}}\left(a_{\text{лс}}y_i - b_{\text{лс}}x_i\right) - b_{\text{лс}}c_{\text{лс}}}{a_{\text{лс}}^2 + b_{\text{лс}}^2}, \tag{4.20}$$

де x_i, y_i – координати i-го акустичного сенсора; $a_{\text{лс}}$, $b_{\text{лс}}$, $c_{\text{лс}}$ – коефіцієнти рівняння лінії напрямку стрільби.

Після цього на основі отриманих координат x_{pi}, y_{pi} та відомих координат артилерійської установки $x_{\text{АУ}}$, $y_{\text{АУ}}$ розраховується безпосередньо значення відстані d_{li} за допомогою формули (4.21)

$$d_{li} = \sqrt{\left(x_{pi} - x_{\text{АУ}}\right)^2 + \left(y_{pi} - y_{\text{АУ}}\right)^2}. \tag{4.21}$$

Другим, не менш важливим параметром, за яким обираються найбільш придатні акустичні сенсори, є відстань d_t від сенсора до найближчої точки на лінії напрямку стрільби, що визначається довжиною перпендикуляра, проведеного від точки, в якій знаходиться сенсор, до прямої напрямку стрільби. Чим менше значення даної відстані, тим вища точність реєстрації балістичної та дульної хвиль пострілу, і, відповідно, більш придатним вважається даний сенсор. Тому оптимальним варіантом для всіх акустичних сенсорів (першого, другого та третього), що застосовуються для верифікації пострілу, є їх розташування безпосередньо на лінії напрямку стрільби ($d_{t1\text{opt}} = d_{t2\text{opt}} = d_{t3\text{opt}} = 0$).

Значення даної відстані d_{ti} для i-го акустичного сенсора може бути розраховане на основі координат даного сенсора x_i, y_i та отриманого рівняння лінії напрямку стрільби (4.7) у загальному вигляді за допомогою виразу (4.22) [105-107]

$$d_{ti} = \frac{\left|a_{\text{лс}}x_i + b_{\text{лс}}y_i + c_{\text{лс}}\right|}{\sqrt{a_{\text{лс}}^2 + b_{\text{лс}}^2}}. \tag{4.22}$$

Для наочності процес визначення відстаней d_{li} та d_{ti} для i-го акустичного сенсора у зоні можливої реєстрації балістичної та дульної хвиль (ABCD) для випадку, коли лінія напрямку стрільби проходить під кутом α до осі Оy, зображено на рис. 4.11. У свою чергу, зона можливої реєстрації балістичної та дульної хвиль ABCD окреслена жирними пунктирними лініями. Усі акустичні сенсори, що знаходяться у даній зоні, позначено сірим кольором.

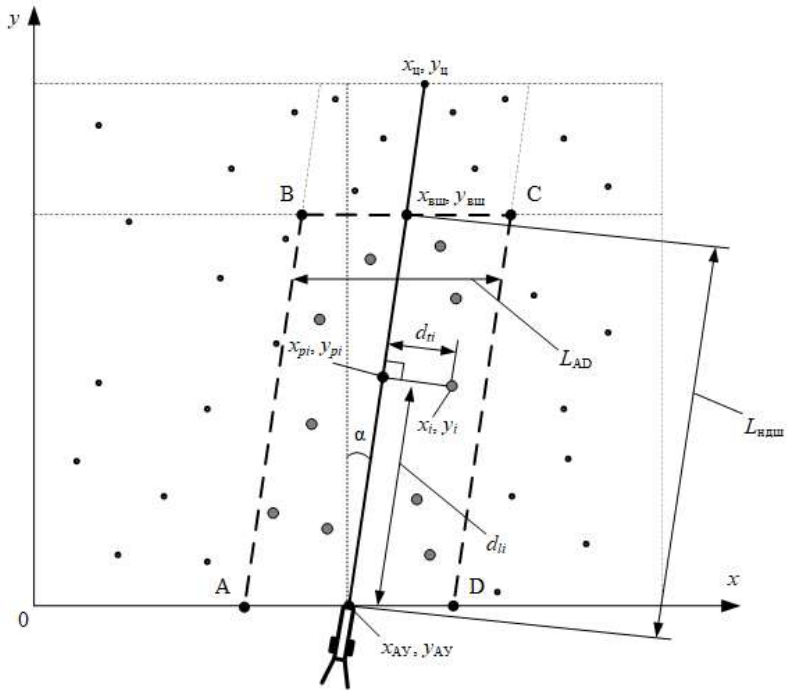

Рис. 4.11 – Визначення відстаней d_{li} та d_{ti} для i-го акустичного сенсора у зоні можливої реєстрації балістичної та дульної хвиль (лінія напрямку стрільби проходить під кутом α до осі Оy)
Джерело: розроблено автором за [38]

Третій параметр, який також слід обов’язково враховувати при виборі трьох найбільш придатних акустичних сенсорів, є значення їх ймовірності безвідмовної роботи $P(t)$. Навіть якщо i-й сенсор має досить вдале розташування (за параметрами d_{li} та d_{ti}) у зоні ABCD, а значення його ймовірності безвідмовної роботи невисоке, то вибір його для реєстрації балістичних і дульних хвиль буде недоцільним, оскільки існує досить високий ризик його неспрацьовування та подальшого невиконання всієї процедури верифікації поточного пострілу.

На практиці надійність будь-якого елемента визначається двома складовими: ймовірністю раптових відмов $P_r(t)$ та ймовірністю відмов через

зношення $P_u(t)$ [109]. Випадкові відмови описуються експоненційним законом, при якому надійність чи ймовірність безвідмовної роботи $P_r(t)$ визначається виразом:

$$P_r(t) = e^{-\lambda t}, \tag{4.23}$$

де λ – інтенсивність раптових відмов.

У період нормальної роботи обладнання для експоненційного закону інтенсивність відмов є сталою величиною. Коли настає зношення, інтенсивність відмов починає зростати і до раптових відмов додаються ще відмови через зношення, які зазвичай підпорядковуються нормальному закону розподілу:

$$P_u(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-(t-M)^2/2\sigma^2} dt, \tag{4.24}$$

де M – середнє значення довговічності елемента з урахуванням зношеності; σ – стандартне відхилення від середньої довговічності, що визначається як:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (t-M)^2}{N}}, \tag{4.25}$$

де N – кількість відмов за час t.

До того ж спільна ймовірність безвідмовної роботи елемента з урахуванням раптових відмов та відмов через зношення у період від $t = 0$ (коли елемент новий) до часу t розраховується як:

$$P(t) = e^{-\lambda t} P_u(t). \tag{4.26}$$

Таким чином, в процесі вибору найбільш придатних сенсорів для реєстрації балістичної та дульної хвиль пострілу ймовірність безвідмовної роботи $P_i(t)$ для кожного i-го акустичного сенсора визначається за допомогою виразу (4.26) в залежності від часу функціонування t на основі відомих значень λ_i, M_i та N_i.

Для всебічного оцінювання придатності акустичних сенсорів для реєстрації балістичної та дульної хвиль пострілу доцільно скласти комплексний безрозмірний критерій придатності J, який буде враховувати належним чином усі

три розглянуті параметри сенсорів (d_{li}, d_{ti} та P_i). У свою чергу, критерій придатності J_i для кожного i-го сенсора:

$$J_i = f\left(d_{li}, d_{ti}, P_i\right). \tag{4.27}$$

Оскільки розглянуті параметри d_{li}, d_{ti} та P_i для оцінювання придатності сенсорів мають різну фізичну природу, суттєво відрізняються за абсолютним значенням, а також можуть обчислюватися з певними похибками, то формалізація їх взаємозв'язку у єдиному критерії на основі чітких математичних залежностей є досить складним завданням. Тому для розрахунку поточного значення критерія J_i з належним урахуванням кожного з вищенаведених параметрів сенсорів (d_{li}, d_{ti} та P_i) доцільно застосувати математичний апарат теорії нечіткої логіки, який дозволяє досить ефективно узагальнювати експертну інформацію та експериментальні дані, апроксимувати будь-які нелінійні багатовимірні залежності, а також формувати лінгвістичні моделі складних об'єктів та процесів [110-112]. Зокрема розробка нечітко-логічної моделі для розрахунку критерію придатності акустичних сенсорів J, що застосовуються для реєстрації балістичної та дульної хвиль пострілу, докладно представлена у підрозділі 4.3.

Для зручності проведення розрахунків доцільно прийняти, що критерій придатності акустичних сенсорів J може змінюватися у діапазоні від 0 до 1. Чим більше розраховане значення критерія J_i наближається до 1, тим більш придатним вважається i-й сенсор.

Оскільки для реєстрації балістичної та дульної хвиль кожного пострілу треба обрати три найбільш придатні сенсори, то критерій J_i для кожного i-го сенсора повинен бути розрахований 3 рази (J_{i1}, J_{i2}, J_{i3}) з урахуванням того, в якості якого саме сенсора (першого, другого або третього) він буде використаний. Далі по найбільшому з отриманих значень (J_{i1}, J_{i2} або J_{i3}) буде визначено остаточну придатність даного сенсора J_{if} з фіксацією в якості саме певного із сенсорів (першого, другого або третього). Так,

$$J_{if} = \max\left\{J_{i1}, J_{i2}, J_{i3}\right\}. \tag{4.28}$$

Після цього за значенням остаточної придатності J_{if} даний i-й акустичний сенсор буде віднесено до однієї з трьох груп: потенційних перших, других або третіх сенсорів. Наприклад, для i-го акустичного сенсора розраховані наступні значення критерія придатності в якості першого, другого та третього сенсорів: J_{i1} = 0,791; J_{i2} = 0,215; J_{i3} = 0,42. Оскільки значення J_{i1} є найбільшим серед розрахованих, то даний сенсор буде попередньо відібрано до групи потенційних перших сенсорів з відповідною придатністю J_{if} = 0,791.

Таким чином, для всіх сенсорів, що входять у зону можливої реєстрації балістичної та дульної хвиль ABCD, по три рази розраховується критерій придатності J, після чого за отриманими найкоректнішими значеннями J_f вони розподіляються по трьох групах.

На останньому етапі методу у сформованих групах потенційних перших, других та третіх сенсорів будуть відібрані відповідні найкращі перший, другий та третій сенсори за максимальними значеннями придатності J_{best1}, J_{best2}, J_{best3}. Дані акустичні сенсори і будуть трьома сенсорами, за допомогою яких буде здійснено реєстрацію балістичної та дульної хвиль поточного артилерійського пострілу.

На основі всього вищенаведеного сформуємо основні кроки запропонованого методу визначення трьох акустичних сенсорів для реєстрації балістичної та дульної хвиль артилерійського пострілу.

Крок 1. Ініціалізація методу. На даному етапі здійснюється отримання або визначення усіх початкових даних, необхідних для верифікації артилерійських пострілів. Зокрема визначаються та записуються кількість і координати усіх функціонуючих акустичних сенсорів, що розподілені у зоні ведення артилерійської стрільби. Попередньо обираються фіксовані значення усіх параметрів, що застосовуються у розрахунках методу, серед яких: ширина зони можливої реєстрації балістичної та дульної хвиль L_{AD}; оптимальні відстані від артилерійської установки до першого, другого та третього сенсорів вздовж лінії напрямку стрільби $d_{l1\text{opt}}$, $d_{l2\text{opt}}$, $d_{l3\text{opt}}$; поточні значення ймовірності безвідмовної

роботи кожного сенсора $P(t)$. У свою чергу, ширину зони AD L_{AD} доцільно встановлювати в залежності від точності реєстрації балістичних та дульних хвиль сенсорами (у більшості випадків $L_{AD} = 100$ м). Оптимальні відстані від гармати до сенсорів вздовж лінії напрямку стрільби доцільно задавати наступними залежностями від довжини ділянки польоту снаряда з надзвуковою швидкістю $L_{ндш}$ для поточного пострілу: $d_{l1opt} = 0{,}5L_{ндш}$; $d_{l2opt} = 0{,}7L_{ндш}$; $d_{l3opt} = 0{,}9L_{ндш}$. Значення надійності $P(t)$ для сенсорів розраховуються на основі їх відомих значень інтенсивності раптових відмов λ, довговічності M, кількості відмов N та часу функціонування t. Також безпосередньо перед початком розрахунків отримуються поточні координати цілі $x_ц$, $y_ц$ та артилерійської установки $x_{АУ}$, $y_{АУ}$.

Крок 2. Здійснення початкових розрахунків. На даному етапі методу на основі координат цілі $x_ц$, $y_ц$ та артилерійської установки $x_{АУ}$, $y_{АУ}$ визначаються необхідна дальність стрільби $L_с$, кут α до осі Оy та довжина ділянки польоту снаряда з надзвуковою швидкістю $L_{ндш}$. Крім того, складається рівняння лінії напрямку стрільби для поточного пострілу та визначаються його коефіцієнти $a_{лс}$, $b_{лс}$, $c_{лс}$. Водночас дальність стрільби та кут α розраховуються на основі залежностей (4.5) та (4.6) відповідно, а довжина ділянки польоту снаряда з надзвуковою швидкістю $L_{ндш}$ обчислюється за допомогою моделі польоту снаряда [103, 104]. Загальне рівняння лінії напрямку стрільби записується у вигляді виразу (4.7), а його коефіцієнти $a_{лс}$, $b_{лс}$, $c_{лс}$ знаходяться з використанням виразів аналітичної геометрії або за допомогою методу найменших квадратів на основі відомих координат цілі та артилерійської установки.

Крок 3. Визначення зони можливої реєстрації балістичної та дульної хвиль поточного артилерійського пострілу ABCD. На даному кроці знаходяться координати точок A, B, C, D, а також рівняння чотирьох прямих, що проходять через ці точки. У свою чергу, координати точок A, B, C та D знаходяться за допомогою виразів (4.8)-(4.11). При цьому для знаходження координат $x_{вш}$, $y_{вш}$ точки на лінії напрямку стрільби, в якій снаряд втрачає надзвукову швидкість,

застосовуються формули (4.12) та (4.13). Рівняння чотирьох прямих, що проходять через точки A, B, C та D, записуються у вигляді рівнянь (4.14)-(4.17) відповідно, а їх коефіцієнти обчислюються з використанням виразів аналітичної геометрії або за допомогою методу найменших квадратів на основі координат точок A, B, C та D.

Крок 4. Відсортування сенсорів, що входять до зони ABCD. На даному кроці із загальної кількості всіх функціонуючих сенсорів системи відсортовуються лише ті, які входять до зони можливої реєстрації балістичної та дульної хвиль поточного артилерійського пострілу ABCD. На основі складених умов (4.18) здійснюється послідовна перевірка всіх функціонуючих акустичних сенсорів системи за їх координатами. Якщо координати i-го сенсора x_i, y_i задовольняють умовам (4.18), то він обирається для подальших розрахунків. Після цього відібрані сенсори нумеруються за порядком, усі інші сенсори (які не пройшли відбір) відкидаються і на наступних кроках методу не застосовуються.

Крок 5. Розрахунок параметра d_{li} для кожного i-го відібраного сенсора. На даному етапі для кожного i-го сенсора, що розташований у зоні ABCD, розраховується відстань d_{li} від артилерійської установки до точки на лінії напрямку стрільби, максимально близької до даного сенсора. Дана відстань обчислюється за допомогою залежності (4.21), а координати x_{pi}, y_{pi} точки на лінії напрямку стрільби, найбільш близької до i-го сенсора – за допомогою виразів (4.19) та (4.20) відповідно.

Крок 6. Розрахунок параметра d_{ti} для кожного i-го відібраного сенсора. На даному етапі для кожного i-го сенсора, що розташований у зоні ABCD, розраховується відстань d_t від сенсора до найближчої точки на лінії напрямку стрільби. Дана відстань обчислюється за допомогою формули (4.22).

Крок 7. Визначення параметра $P_i(t)$ для кожного i-го відібраного сенсора. На даному кроці для кожного i-го акустичного сенсора, що розташований у зоні

ABCD, розраховується ймовірність безвідмовної роботи $P_i(t)$ за допомогою виразу (4.26).

Крок 8. Розрахунок комплексного критерія придатності J_i для кожного i-го відібраного сенсора на основі нечіткої моделі. На даному етапі на основі попередньо визначених параметрів d_{li}, d_{ti} та $P_i(t)$ для кожного i-го сенсора комплексний критерій придатності розраховується 3 рази (J_{i1}, J_{i2}, J_{i3}) за допомогою виразу (4.27) з урахуванням того, в якості якого саме сенсора (першого, другого або третього) він буде використаний. У свою чергу, залежність (4.27) обчислюється за допомогою попередньо розробленої нечітко-логічної моделі.

Крок 9. Розподілення всіх сенсорів по групах потенційних перших, других або третіх сенсорів за значенням їх остаточної придатності J_{if}. На даному кроці для кожного i-го сенсора визначається остаточна придатність J_{if} за допомогою виразу (4.28) з фіксацією в якості саме якогось сенсора (першого, другого або третього). Далі формуються 3 групи потенційних сенсорів (перших, других та третіх), по яких усі наявні сенсори розподіляються.

Крок 10. Вибір найкращих першого, другого та третього сенсорів за максимальними значеннями придатності. На даному етапі у кожній з трьох сформованих на попередньому кроці груп потенційних сенсорів відбирається по одному найкращому сенсору за максимальними значеннями придатності J_{best1}, J_{best2}, J_{best3}. Дані акустичні сенсори і будуть трьома (першим, другим та третім) сенсорами, за допомогою яких буде здійснено реєстрацію балістичної та дульної хвиль поточного артилерійського пострілу.

На рис. 4.12 наведена блок-схема розробленого метода визначення трьох акустичних сенсорів для реєстрації балістичної та дульної хвиль артилерійського пострілу.

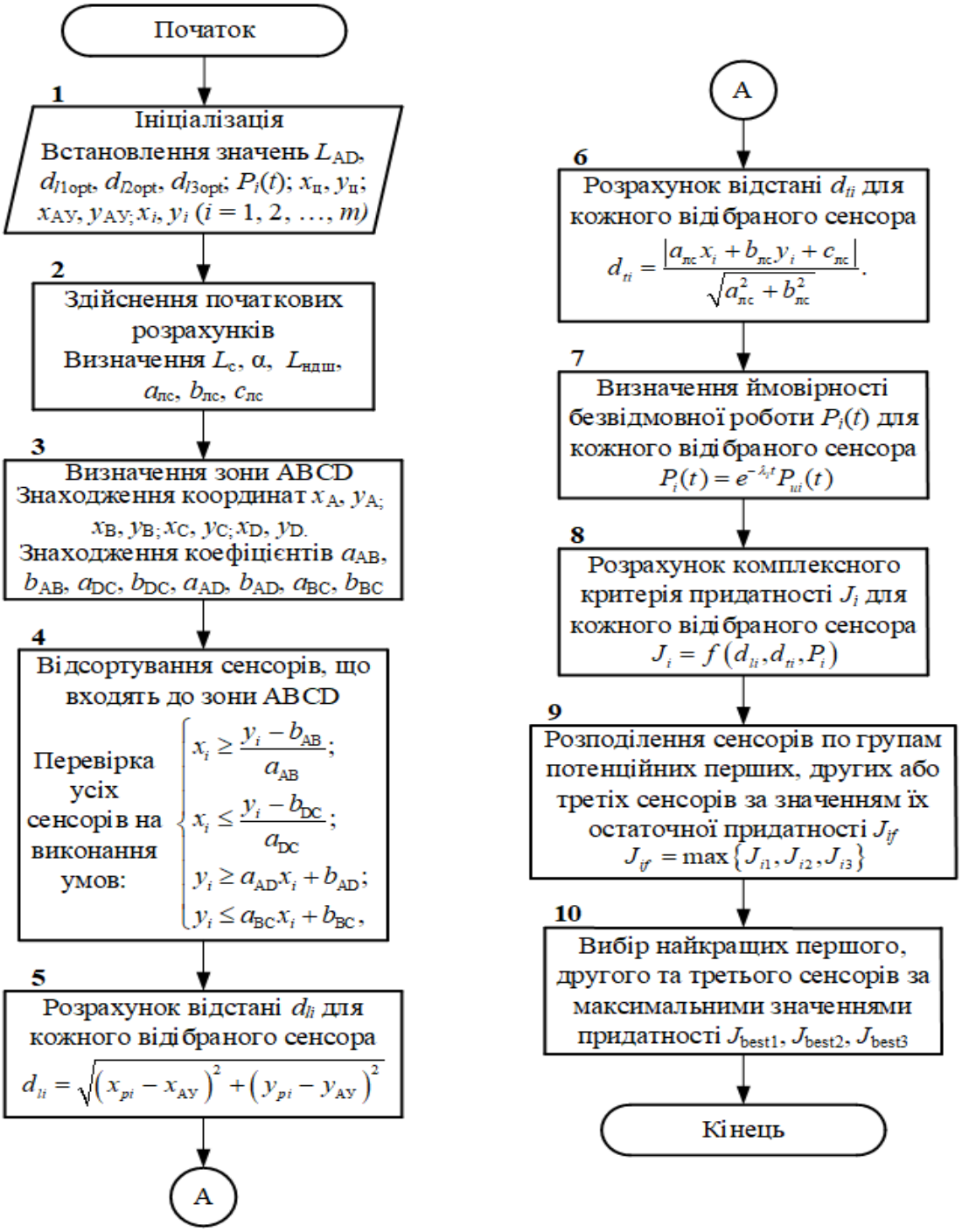

Рис. 4.12 Блок-схема методу визначення трьох акустичних сенсорів для реєстрації балістичної та дульної хвиль артилерійського пострілу
Джерело: розроблено автором за [38]

Після виконання останнього 10-го кроку запропонованого методу пошук найкращих акустичних сенсорів вважається завершеним, і відібрані три сенсори

можуть бути застосовані для верифікації поточного артилерійського пострілу та реєстрації координати зіткнення снаряда з поверхнею.

У наступному підрозділі розглянемо розробку нечітко-логічної моделі для розрахунку критерію придатності акустичних сенсорів *J*, що застосовуються для реєстрації балістичної та дульної хвиль пострілу.

4.3 Розробка нечіткої моделі для розрахунку критерію придатності акустичних сенсорів для реєстрації балістичної та дульної хвиль пострілу

Інтелектуальні системи, що базуються на теоріях м'яких обчислень, нечітких множин і хиткої логіки, останнім часом активно застосовуються в різних сферах науки і техніки для вирішення завдань керування, ідентифікації, прогнозування та діагностики, моделювання складних об'єктів і процесів, а також класифікації та розпізнавання образів [110-112]. Ці системи дозволяють ефективно узагальнювати експертну інформацію, формалізувати процеси мислення і прийняття рішень людиною, навчатися на основі експериментальних даних, а також створювати лінгвістичні моделі та моделі типу «чорна скринька» для складних, нестаціонарних технічних об'єктів і технологічних процесів [111]. Один із найперспективніших напрямків застосування математичного апарату хиткої логіки являє собою створення інтелектуальних моделей для апроксимації складних нелінійних багатовимірних залежностей [112].

Відповідно до теореми про нечітку апроксимацію [113], будь-яка математична залежність може бути апроксимована системою, що базується на нечіткій логіці. Це дозволяє інтелектуальним системам і обчислювальним методам з високою точністю відтворювати довільні зв'язки «входи-виходи» за допомогою природномовних тверджень-правил типу «ЯКЩО ..., – ТО ...», які потім формалізуються за допомогою алгоритмів теорії нечітких множин, обходячи необхідність у складних розрахунках з використанням диференціальних і інтегральних рівнянь [110]. Крім того, сучасні нечіткі моделі, що відрізняються

інтерпретованістю та логічною прозорістю, можуть будуватися на основі різних механізмів нечіткого логічного виведення, що дозволяє ефективно застосовувати знання експертів і навчатися на основі практичних вибірок та цільових функцій, подібних до нейронних мереж [111, 112]. Ці особливості роблять нечіткі моделі та системи гнучкими, універсальними та перспективними для вирішення завдань моделювання складних об'єктів і процесів.

Для одночасного обчислення трьох значень комплексного критерію придатності J_{i1}, J_{i2}, J_{i3} для кожного i-го акустичного сенсора з урахуванням того, в якості якого саме сенсора (першого, другого або третього) він буде використаний, запропонована нечітка модель, що повинна мати структуру, представлену на рис. 4.13.

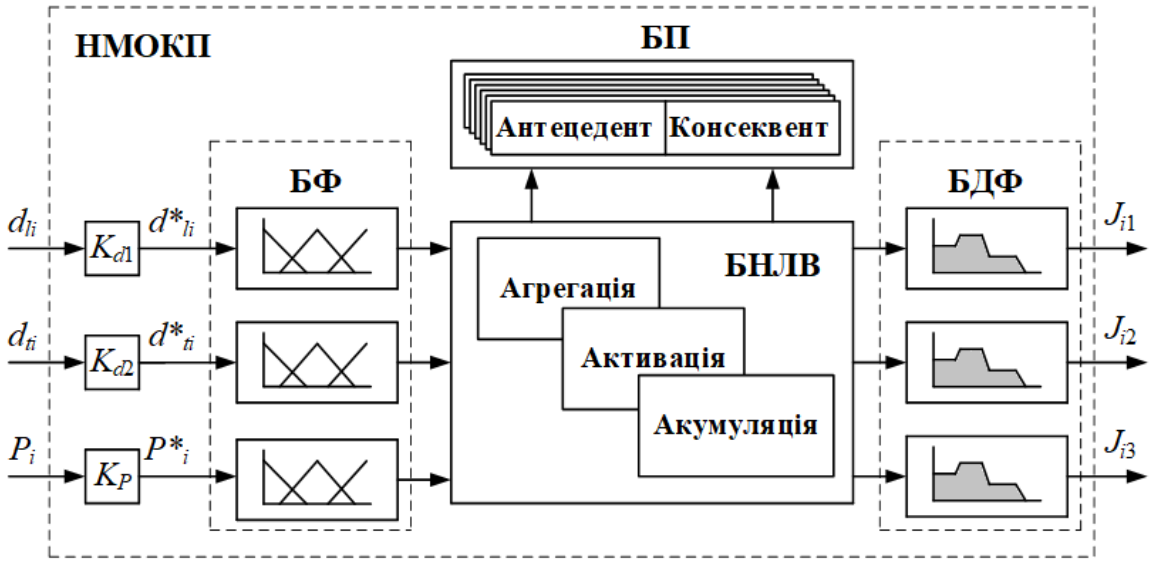

Рис. 4.13 Структура нечіткої моделі для обчислення значень критерію придатності акустичних сенсорів
(розроблено автором)

На рис. 4.13 прийнято такі позначення: НМОКП – нечітка модель обчислення критерію придатності; БФ – блок фаззифікації; БНЛВ – блок нечіткого логічного виведення; БДФ – блок дефаззифікації; БП – база правил; K_{d1}, K_{d2}, K_P – нормувальні коефіцієнти, які застосовуються для переведення вхідних змінних

моделі d_{li}, d_{ti} та P_i у відносні одиниці від їх максимальних значень; d^*_{li}, d^*_{ti} та P^*_i – нормовані значення відповідних вхідних змінних нечіткої моделі.

Як видно з рис. 4.13, запропонована модель має три вихідні змінні (J_{i1}, J_{i2}, J_{i3}), кожна з яких показує придатність i-го акустичного сенсора в якості першого, другого чи третього сенсорів, в залежності від вхідних параметрів d_{li}, d_{ti} та P_i відповідно до розробленої бази правил.

У даному випадку для нечіткої моделі із запропонованою структурою (рис. 4.13) доцільно обрати тип нечіткого логічного виведення Мамдані [114]. Як показують результати низки прикладних досліджень, нечіткі системи такого типу мають досить високу ефективність та відносно просту процедуру синтезу та налаштування [112].

Блок фаззифікації визначає ступені належності числових значень вхідних змінних d_{li}, d_{ti} та P_i до відповідних нечітких лінгвістичних термів (ЛТ) нечіткої моделі [111]. Блок нечіткого логічного виведення виконує послідовні операції агрегації, активації та акумуляції, взаємодіючи з базою правил та залучаючи необхідні дані з БП. База правил, своєю чергою, містить набір правил, що складаються з відповідних умов (антецедентів) і висновків (консеквентів). Блок дефаззифікації перетворює консолідоване нечітке логічне виведення (результатну нечітку множину) у чіткий числовий сигнал вихідної змінної J_i [114].

Далі детально розглянемо основні процедури синтезу нечітко-логічної моделі для розрахунку критерію придатності акустичних сенсорів.

Нормувальні коефіцієнти представленої моделі K_{d1} та K_{d2} розраховуються за допомогою таких виразів:

$$K_{d1} = \frac{1}{L_{\text{ндш}}}; \tag{4.29}$$

$$K_{d2} = \frac{2}{L_{\text{AD}}}, \tag{4.30}$$

де $L_{\text{ндш}}$ – довжина ділянки польоту снаряда з надзвуковою швидкістю для поточного пострілу; L_{AD} – довжина відрізка AD (рис. 4.11). Це дозволяє здійснювати перетворення поточних значень вхідних змінних d_{li}, d_{ti} у відносні одиниці від їх максимальних значень ($d_{li\max} = L_{\text{ндш}}$; $d_{ti\max} = L_{\text{AD}}/2$).

Оскільки ймовірність безвідмовної роботи P_i для кожного i-го акустичного сенсора може приймати значення від 0 до 1, а в якості робочого діапазону даної змінної доцільно обрати інтервал від 0,75 до 1, то коефіцієнт K_P у даному випадку дорівнює 1. Крім того, якщо i-й сенсор має поточне значення ймовірності безвідмовної роботи $P_i(t) < 0{,}75$, то він до подальшого оцінювання не допускається.

Для вхідних (d_{li}, d_{ti}, P_i) і вихідних (J_{i1}, J_{i2}, J_{i3}) змінних представленої нечіткої моделі вибрано наступні набори лінгвістичних термів (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 − Лінгвістичні терми НМОКП

Змінні нечіткої моделі	Кількість лінгвістичних термів	Обрані лінгвістичні терми	Тип функцій належності ЛТ
d_{li}	5	VS – дуже мала (very short); S – мала (short); M – середня (medium); LN – велика (long); VLN – дуже велика (very long)	трикутна
d_{ti}	3	S – мала (short); M – середня (medium); LN – велика (long)	трикутна
P_i	3	L – низька (low); A – середня (average); H – висока (high)	трикутна
J_{i1}, J_{i2}, J_{i3}	7	VL – дуже низька (very low); L – низька (low); BA – нижче середньої (below average); A – середня (average); AA – вище середньої (above average); H – висока (high); VH – дуже висока (very high)	трикутна

Розроблено автором

Трикутна функція належності ЛТ на прикладі змінної d_{li} представлена виразом (4.31).

$$\mu(d_{li}) = \begin{cases} 0, \text{ при } d_{li} \le a; \\ \dfrac{d_{li} - a}{b - a}, \text{при } a < d_{li} \le b; \\ \dfrac{c - d_{li}}{c - b}, \text{при } b < d_{li} < c; \\ 0, \text{ при } d_{li} \ge c, \end{cases} \tag{4.31}$$

де a, b, c – регульовані параметри даної функцій належності. Крім того, вираз (4.31) справедливий при $a \le b \le c$.

Зовнішній вигляд лінгвістичних термів для вхідних і вихідних змінних НМОКП із заданими параметрами показано на рис. 4.14.

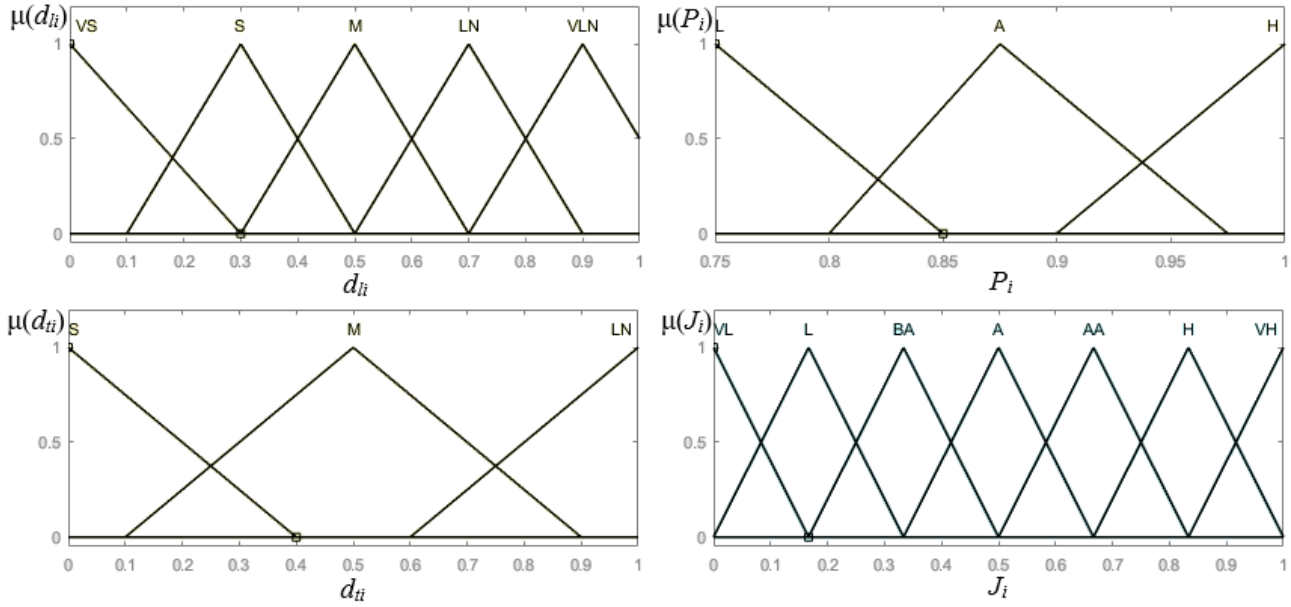

Рис. 4.14 Лінгвістичні терми (з встановленими параметрами) для вхідних і вихідних змінних НМОКП
(розроблено автором)

Як видно з табл. 4.1 та рис. 4.14, для трьох вихідних змінних J_{i1}, J_{i2} та J_{i3} обрано однакові набори лінгвістичних термів.

Правила бази запропонованої нечіткої моделі для обчислення значень критерію придатності акустичних сенсорів сформульовані у вигляді:

$$\begin{gathered}\text{IF “}d_{li} = LT_{dl}\text{” AND “}d_{ti} = LT_{dt}\text{” AND “}P_i = LT_P\text{”} \\ \text{THEN “}J_{i1} = LT_{J1}\text{”AND “}J_{i2} = LT_{J2}\text{”AND “}J_{i3} = LT_{J3}\text{”},\end{gathered} \tag{4.32}$$

де LT_{dl}, LT_{dt}, LT_P, LT_{J1}, LT_{J2}, LT_{J3} – певні лінгвістичні терми вхідних та вихідних змінних.

Наприклад, перше правило БП представлено виразом (4.33)

$$\begin{gathered}\text{IF “}d_{li} = \text{VS”} \text{ AND “}d_{ti} = \text{S”} \text{ AND “}P_i = \text{L”} \\ \text{THEN “}J_{i1} = \text{VL”AND “}J_{i2} = \text{VL”AND “}J_{i3} = \text{VL”}.\end{gathered} \tag{4.33}$$

Загальна кількість правил БП запропонованої нечіткої моделі визначається кількістю всіх можливих комбінацій лінгвістичних термів вхідних змінних (d_{li}, d_{ti}, P_i) і складає $5 \cdot 3 \cdot 3 = 45$.

У свою чергу, повна розроблена база правил нечіткої моделі для обчислення значень критерію придатності акустичних сенсорів зведена у табл. 4.2.

У запропонованій нечіткій моделі процедури агрегації та активації виконуються за допомогою операції «min» [110]. Після виконання даних операцій на етапі акумуляції усічені функції належності об'єднуються для отримання остаточної нечіткої підмножини вихідної змінної. Дана процедура виконується з використанням операції "max". Останнім етапом обчислень є дефаззифікація, яка включає перехід від функції належності вихідної лінгвістичної змінної до її точного (числового) значення. У даному випадку в якості методу дефаззифікації нечіткої моделі обрано метод центру тяжіння [111].

Таблиця 4.2 − База правил нечіткої моделі для обчислення значень критерію придатності акустичних сенсорів

№ правила	Лінгвістичні терми вхідних змінних			Лінгвістичні терми вихідних змінних		
	d_{li}	d_{ti}	P_i	J_{i1}	J_{i2}	J_{i3}
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
1	VS	S	L	VL	VL	VL
2	VS	S	A	VL	VL	VL
3	VS	S	H	BA	VL	VL
4	VS	M	L	VL	VL	VL
5	VS	M	A	VL	VL	VL
6	VS	M	H	L	VL	VL
7	VS	LN	L	VL	VL	VL
8	VS	LN	A	VL	VL	VL
9	VS	LN	H	VL	VL	VL
10	S	S	L	VL	VL	VL
11	S	S	A	A	VL	VL
12	S	S	H	AA	BA	VL
13	S	M	L	VL	VL	VL
14	S	M	A	BA	VL	VL
15	S	M	H	A	L	VL
16	S	LN	L	VL	VL	VL
17	S	LN	A	L	VL	VL
18	S	LN	H	BA	VL	VL
19	M	S	L	BA	VL	VL
20	M	S	A	H	A	VL
21	M	S	H	VH	AA	BA
22	M	M	L	L	VL	VL

Продовження таблиці 4.2

1	2	3	4	5	6	7
23	M	M	A	AA	BA	VL
24	M	M	H	H	A	L
25	M	LN	L	VL	VL	VL
26	M	LN	A	A	L	VL
27	M	LN	H	AA	BA	VL
28	LN	S	L	VL	BA	VL
29	LN	S	A	A	H	A
30	LN	S	H	AA	VH	AA
31	LN	M	L	VL	L	VL
32	LN	M	A	BA	AA	BA
33	LN	M	H	A	H	A
34	LN	LN	L	VL	VL	VL
35	LN	LN	A	L	A	L
36	LN	LN	H	BA	AA	BA
37	VLN	S	L	VL	VL	BA
38	VLN	S	A	VL	A	H
39	VLN	S	H	BA	AA	VH
40	VLN	M	L	VL	VL	L
41	VLN	M	A	VL	BA	AA
42	VLN	M	H	L	A	H
43	VLN	LN	L	VL	VL	VL
44	VLN	LN	A	VL	L	A
45	VLN	LN	H	VL	BA	AA

Розроблено автором

Для графічного зображення встановлених нелінійних залежностей розробленої нечіткої моделі на рис. 4.15-4.17 представлені її відповідні характеристичні поверхні.

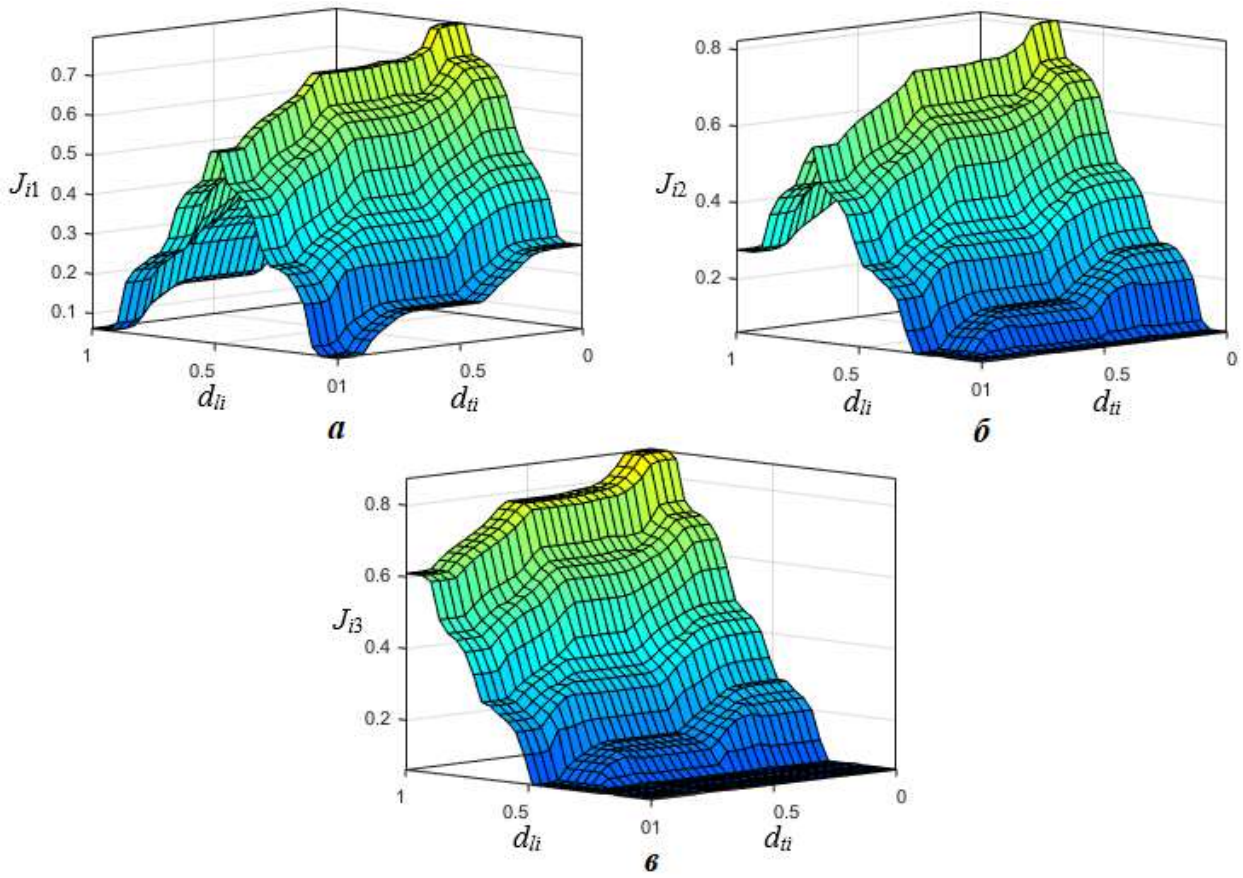

Рис. 4.15 Характеристичні поверхні НМОКП: *а*) $J_{i1} = f(d_{li}, d_{ti})$; *б*) $J_{i2} = f(d_{li}, d_{ti})$; *в*) $J_{i3} = f(d_{li}, d_{ti})$

Джерело: розроблено автором за [38]

Зокрема, на рис. 4.15 наведено залежності значень критерію придатності сенсорів J_i від вхідних змінних моделі d_{li} та d_{ti} при фіксованому значенні змінної $P_i = 0{,}95$: *а*) $J_{i1} = f(d_{li}, d_{ti})$; *б*) $J_{i2} = f(d_{li}, d_{ti})$; *в*) $J_{i3} = f(d_{li}, d_{ti})$. На рис. 4.16 представлено залежності значень критерію придатності J_i від вхідних змінних d_{ti} та P_i при фіксованому значенні змінної $d_{li} = 0{,}5$: *а*) $J_{i1} = f(d_{ti}, P_i)$; *б*) $J_{i2} = f(d_{ti}, P_i)$; *в*) $J_{i3} = f(d_{ti}, P_i)$.

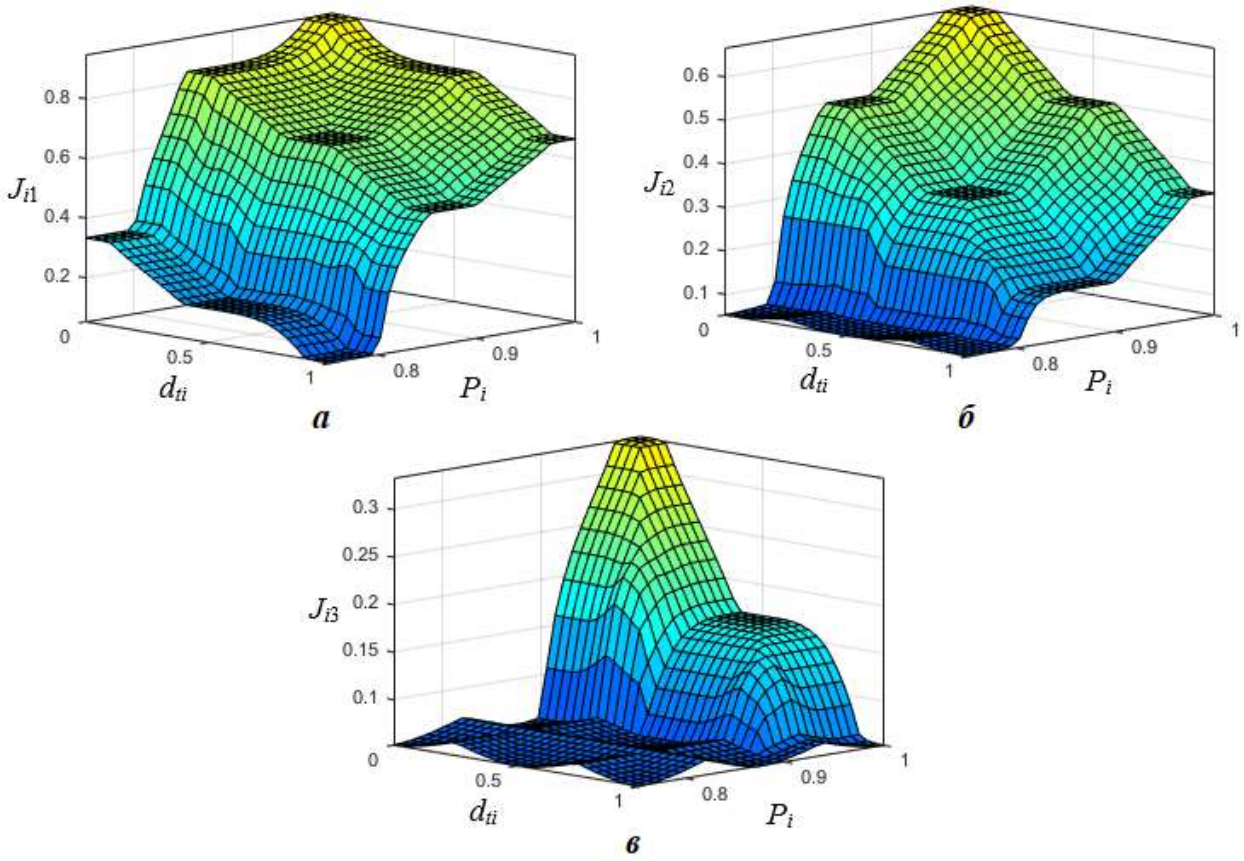

Рис. 4.16 Характеристичні поверхні НМОКП: *а*) $J_{i1} = f(d_{ti}, P_i)$; *б*) $J_{i2} = f(d_{ti}, P_i)$; *в*) $J_{i3} = f(d_{ti}, P_i)$

Джерело: розроблено автором за [38]

На рис. 4.17 показано залежності значень критерію придатності J_i від вхідних змінних P_i та d_{li} при фіксованому значенні змінної $d_{ti} = 0{,}3$: *а*) $J_{i1} = f(P_i, d_{li})$; *б*) $J_{i2} = f(P_i, d_{li})$; *в*) $J_{i3} = f(P_i, d_{li})$.

Для підтвердження коректності функціонування запропонованої нечіткої моделі в табл. 4.3 наведено результати обчислень критерію придатності акустичних сенсорів в залежності від різних значень вхідних змінних d_{li}, d_{ti} та P_i.

Як видно з табл. 4.3, запропонована нечітка модель коректно визначає значення придатності акустичних сенсорів в якості першого, другого та третього сенсорів J_{i1}, J_{i2} та J_{i3} для верифікації пострілу в залежності від поточних значень вхідних змінних d_{li}, d_{ti} та P_i. Так, у перших трьох рядках табл. 4.3 значення довжини d_{li} у відносних одиницях близькі до оптимального значення відстані від

першого сенсора до гармати вздовж лінії стрільби ($d_{l1\text{opt}} = 0{,}5L_{\text{ндш}}$). Тому в цих рядках найбільші значення має придатність J_{i1}. У свою чергу, у рядках 4-6 найбільші значення має придатність J_{i2}, оскільки відповідні значення d_{li} найбільш близькі до оптимального значення відстані для другого сенсора $d_{l2\text{opt}} = 0{,}7L_{\text{ндш}}$. Аналогічна залежність спостерігається і в рядках 7-9 для третього сенсора.

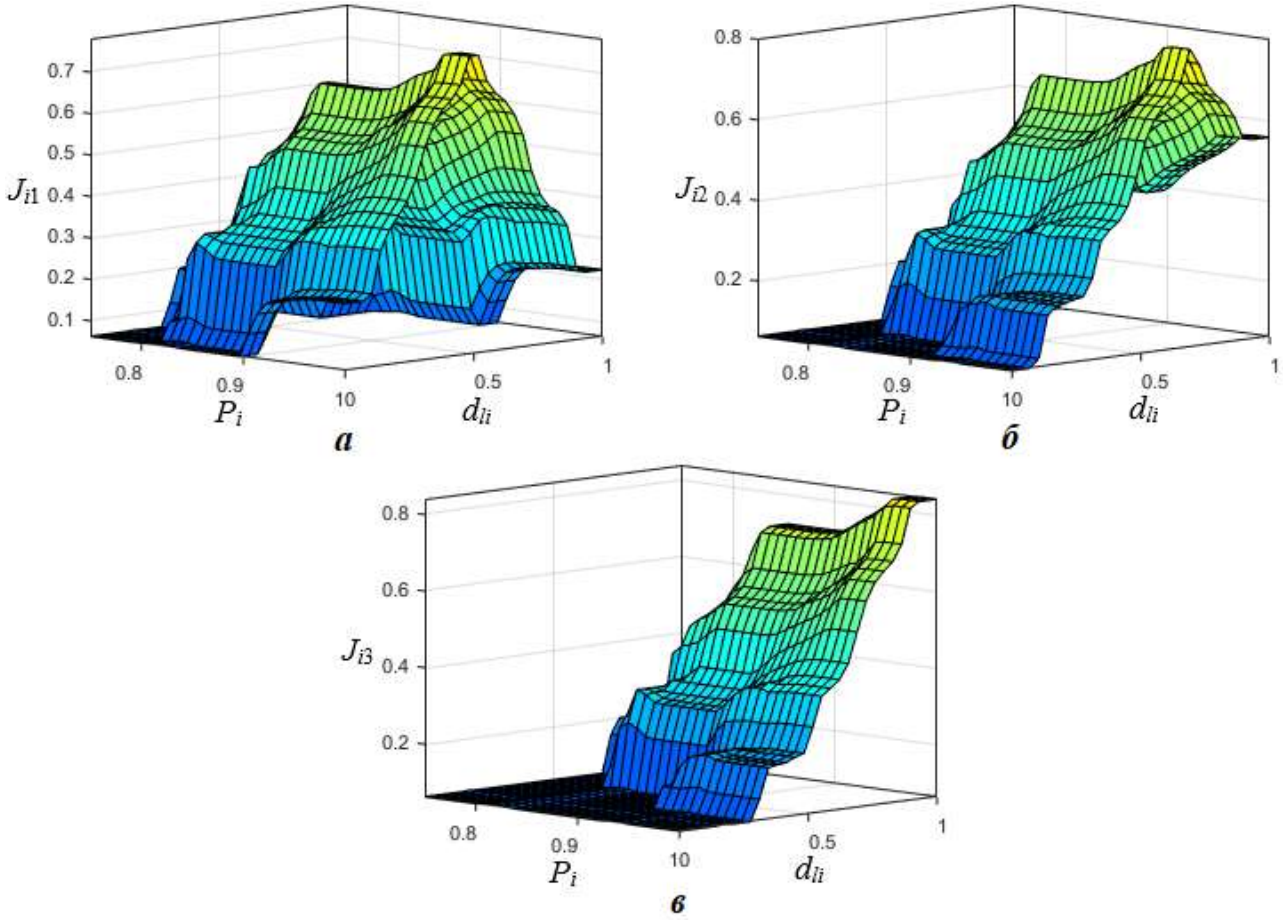

Рис. 4.17 Характеристичні поверхні НМОКП: *а*) $J_{i1} = f(P_i, d_{li})$; *б*) $J_{i2} = f(P_i, d_{li})$; *в*) $J_{i3} = f(P_i, d_{li})$

Джерело: розроблено автором за [38]

Також на придатність того чи іншого сенсора суттєво впливають і параметри d_{ti} та P_i, що відображається відповідною зміною значень J_{i1}, J_{i2} та J_{i3} у рядках 1-9. Крім того, для повноцінної перевірки працездатності розробленої нечіткої моделі у десятому рядку табл. 4.3 встановлені такі значення вхідних змінних, які є неприйнятними як для першого, так і для другого та третього

сенсорів системи. У цьому випадку розраховані за допомогою моделі значення придатності J_{i1}, J_{i2} та J_{i3} є дуже малими, що свідчить про непридатність відповідних сенсорів для реалізації процесу верифікації артилерійських пострілів. Це також підтверджує коректність функціонування розробленої нечіткої моделі.

Таблиця 4.3 − Результати обчислень значень критерію придатності акустичних сенсорів на основі запропонованої нечіткої моделі

№	Вхідні змінні			Вихідні змінні		
	d_{li}	d_{ti}	P_i	J_{i1}	J_{i2}	J_{i3}
1	0,5	0,5	0,875	0,667	0,333	0,0523
2	0,54	0,133	0,91	0,725	0,591	0,301
3	0,48	0,32	0,86	0,651	0,353	0,0608
4	0,7	0,04	0,93	0,568	0,844	0,568
5	0,71	0,6	0,82	0,237	0,404	0,288
6	0,67	0,1	0,79	0,165	0,296	0,0593
7	0,9	0,03	0,915	0,166	0,536	0,836
8	0,92	0,43	0,95	0,159	0,443	0,776
9	0,86	0,21	0,89	0,274	0,546	0,65
10	0,05	0,98	0,76	0,054	0,054	0,054

Розроблено автором

У наступному підрозділі проведено дослідження ефективності розробленого методу визначення трьох акустичних сенсорів для реєстрації балістичної хвилі артилерійського пострілу на конкретних прикладах.

4.4 Дослідження ефективності методу визначення трьох акустичних сенсорів для реєстрації балістичної хвилі артилерійського пострілу

У даному підрозділі дослідження ефективності методу визначення трьох акустичних сенсорів для реєстрації балістичної та дульної хвиль проведено на двох прикладах артилерійських пострілів з різними параметрами. У першому прикладі застосовуються 30 функціонуючих акустичних сенсорів, розподілених у зоні ведення артилерійської стрільби, координати та поточні значення ймовірності безвідмовної роботи P_i яких наведено у табл. 4.4.

На першому кроці запропонованого методу зафіксовано параметри сенсорів (табл. 4.4), а також обрано такі значення регульованих параметрів, що застосовуються у розрахунках. Ширина зони AD можливої реєстрації балістичної та дульної хвиль $L_{AD} = 100$ м; оптимальні відстані від артилерійської установки до першого, другого та третього сенсорів вздовж лінії напрямку стрільби: $d_{l1opt} = 0{,}5L_{ндш}$; $d_{l2opt} = 0{,}7L_{ндш}$; $d_{l3opt} = 0{,}9L_{ндш}$; координати артилерійської установки: $x_{АУ} = 5200$, $y_{АУ} = 0$; поточні координати цілі: $x_{ц} = 5700$, $y_{ц} = 15100$.

На 2-му кроці під час виконання початкових розрахунків на основі залежності (4.5) визначено необхідну дальність стрільби $L_{с}$=15108,3 м та на основі залежності (4.6) розраховано значення кута $\alpha = 1{,}896°$. Також для даного пострілу обчислено довжину ділянки польоту снаряда з надзвуковою швидкістю $L_{ндш} = 11874$ м за допомогою моделі польоту снаряда [103, 104]. Крім того, складено рівняння лінії напрямку стрільби (4.7) та визначено його коефіцієнти: $a_{лс} = 30{,}2$; $b_{лс} = -1$; $c_{лс} = -157040$.

На третьому кроці визначено зону можливої реєстрації балістичної та дульної хвиль поточного артилерійського пострілу ABCD. Так, за допомогою виразів (4.8)-(4.11) знайдені координати точок A, B, C, D: $x_A = 5150$; $y_A = 0$; $x_B = 5542{,}96$; $y_B = 11867{,}5$; $x_C = 5642{,}96$; $y_C = 11867{,}5$; $x_D = 5250$; $y_D = 0$. Рівняння чотирьох прямих, що проходять через точки A, B, C та D, визначені у вигляді відповідних рівнянь (4.14)-(4.17), а їх коефіцієнти складають: $a_{AB} = 30{,}2$; $b_{AB} = -155530$; $a_{DC} = 30{,}2$; $b_{DC} = -158550$; $a_{AD} = 0$; $b_{AD} = 0$; $a_{BC} = 0$; $b_{BC} = 11867{,}5$.

На четвертому кроці проведено відсортування сенсорів, що входять до зони ABCD. До того ж всі 30 сенсорів (табл. 4.4) послідовно перевірено на виконання умови (4.18). В результаті відібрано 11 сенсорів, що відповідають даній умові, для подальших розрахунків: 4-й, 6-й, 8-й, 11-й, 12-й, 14-й, 16-й, 18-й, 22-й, 23-й, 28-й. Після цього дані сенсори пронумеровано за порядком від 1-го до 11-го.

Таблиця 4.4 − Параметри акустичних сенсорів, що функціонують у зоні ведення артилерійської стрільби.

№	x_i	y_i	P_i
1	4980,2	3422,8	0,92
2	3376,1	6785,2	0,878
3	5102,8	4421,7	0,782
4	5391,2	5988,7	0,914
5	5268,2	5912,7	0,922
6	5510,2	8450,3	0,867
7	7982,4	8321,2	0,931
8	5434,2	6230,5	0,899
9	5130,7	1138,8	0,813
10	6280,5	3325,7	0,801
11	5481,5	8299,3	0,941
12	5444,2	8630,2	0,821
13	5302,1	9348,1	0,889
14	5356,1	5870,4	0,903
15	3216,7	11547,8	0,774
16	5513,7	9390,8	0,923
17	4688,4	12428,6	0,796
18	5544,7	10691,7	0,934
19	6721,6	13430,2	0,913
20	5552,8	14556,1	0,944
21	5534,2	13245,7	0,878
22	5587,2	10245,5	0,895
23	5518,8	10970,9	0,927
24	3563,7	3786,3	0,833
25	2658,7	12532,2	0,841
26	5598,2	12180,8	0,817
27	8138,1	11634,5	0,912
28	5522,3	10132,2	0,901
29	7314,6	5769,7	0,873
30	6211,7	14137,8	0,799

Розроблено автором

Згодом на кроках 5, 6 та 7 запропонованого методу визначено значення відстаней d_{li}, d_{ti} та P_i для кожного i-го відібраного сенсора (i = 1, 2, …, 11). При цьому відстані d_{li} розраховані за допомогою виразів (4.19)-(4.21), а відстань d_{ti} – за використанням формули (4.22). Поточні значення ймовірності безвідмовної роботи $P_i(t)$ взято безпосередньо з табл. 4.4. У свою чергу отримані значення наведених параметрів зведено в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 − Розраховані параметри відібраних акустичних сенсорів

№	d_{li}	d_{ti}	P_i
1	5991,75	7,09	0,914
2	8455,94	30,37	0,867
3	6234,83	27,88	0,899
4	8304,07	6,69	0,941
5	8633,55	41,54	0,821
6	5872,35	38,26	0,903
7	9396,04	2,74	0,923
8	10697,25	9,32	0,934
9	10252,7	47,92	0,895
10	10975,44	44,45	0,927
11	10137,32	13,19	0,901

Розроблено автором

На кроці 8 на основі отриманих параметрів (табл. 4.5) для кожного i-го сенсора розраховано по 3 значення комплексного критерію придатності J_{i1}, J_{i2}, J_{i3} за допомогою нечіткої моделі з урахуванням того, в якості якого саме сенсора (першого, другого або третього) він буде використаний. Нормувальні коефіцієнти нечіткої моделі K_{d1} та K_{d2} розраховані за допомогою виразів (4.29) та (4.30) і складають відповідно: K_{d1} = 0,0000842; K_{d2} = 0,02.

На дев’ятому кроці методу для кожного з відібраних сенсорів за допомогою виразу (4.28) розраховано остаточну придатність J_{if} з визначенням типу, в якості якого він буде застосований (перший, другий або третій), та сформовано 3 групи потенційних перших, других та третіх сенсорів. Після цього усі сенсори розподілено по трьох наведених групах. У табл. 4.6 для кожного i-го сенсора

наведено обчислені значення критерію придатності, а також номер групи, в яку він розподілений.

Таблиця 4.6 − Розраховані параметри відібраних акустичних сенсорів

№ сенсора	J_{i1}	J_{i2}	J_{i3}	J_{if}	№ групи
1	0,791	0,516	0,188	0,791	1
2	0,318	0,621	0,366	0,621	2
3	0,601	0,403	0,145	0,601	1
4	0,567	0,821	0,563	0,821	2
5	0,213	0,393	0,335	0,393	2
6	0,563	0,252	0,0808	0,563	1
7	0,402	0,681	0,666	0,681	2
8	0,23	0,521	0,792	0,792	3
9	0,103	0,253	0,414	0,414	3
10	0,0755	0,238	0,571	0,571	3
11	0,302	0,54	0,618	0,618	3

Розроблено автором

Таким чином, до групи потенційних перших сенсорів розподілено 1-й, 3-й та 6-й сенсори. До групи потенційних других сенсорів – 2-й, 4-й та 5-й. До потенційних третіх сенсорів – 8-й, 9-й, 10-й та 11-й сенсори.

На останньому 10-му кроці запропонованого методу у кожній з трьох груп обрано по одному найкращому сенсору за визначеними максимальними значеннями придатності: $J_{best1} = 0,791$; $J_{best2} = 0,821$; $J_{best3} = 0,792$. Отже, в якості найкращих першого, другого та третього сенсорів обрано 1-й, 4-й та 8-й акустичні сенсори.

Отже, в ході реалізації запропонованого методу з усього наведеного у табл. 4.4 набору акустичних сенсорів обрано 3 сенсори (4-й, 11-й та 18-й), які найкращим чином підходять для реєстрації балістичної та дульної хвиль

поточного артилерійського пострілу. Дані сенсори мають такі координати: $x_1 = 5391,2$; $y_1 = 5988,7$; $x_2 = 5481,5$; $y_2 = 8299,3$; $x_3 = 5544,7$; $y_3 = 10691,7$.

У другому прикладі застосовуються інші 30 функціонуючих акустичних сенсорів, розподілених у зоні ведення артилерійської стрільби, координати та поточні значення ймовірності безвідмовної роботи P_i яких наведено у табл. 4.7.

Таблиця 4.7 − Параметри акустичних сенсорів, що функціонують у зоні ведення артилерійської стрільби

№	x_i	y_i	P_i
1	**2**	**3**	**4**
1	4125,6	7829,2	0,901
2	4728,2	5670,1	0,821
3	4032,2	10582,3	0,771
4	3274,2	6328,6	0,927
5	4891,5	7278,4	0,765
6	4569,2	5902,1	0,903
7	3923,3	8413,2	0,927
8	3890,2	12330,6	0,841
9	4283,3	8246,2	0,843
10	4280,7	2324,1	0,801
11	3278,7	3297,3	0,967
12	4478,8	5789,6	0,816
13	4071,2	10671,1	0,936
14	4877,7	4729,2	0,867
15	4271,3	8392,2	0,792
16	5423,7	10897,1	0,907
17	4305,3	8257,7	0,945
18	4140,9	5789,2	0,951

1	2	3	4
19	7726,6	11430,2	0,893
20	4542,8	5801,2	0,79
21	4528,8	5912,3	0,89
22	3800,3	13467,7	0,951
23	4023,3	10730,9	0,901
24	4563,7	3186,3	0,867
25	4534,2	5813,3	0,821
26	3882,2	12749,8	0,917
27	4002,2	10892,1	0,871
28	4112,2	10532,7	0,798
29	6514,6	4769,2	0,936
30	4115,8	5669,8	0,849

Розроблено автором

Для другого прикладу координати артилерійської установки не змінились ($x_{АУ} = 5200$, $y_{АУ} = 0$), а поточні координати цілі становлять: $x_ц = 3600$, $y_ц = 15000$. На першому кроці методу наведені параметри сенсорів, артилерійської установки та цілі зафіксовано, а для всіх регульованих параметрів застосовувались такі ж значення, як і в першому прикладі.

На кроці 2 при виконанні початкових розрахунків визначено необхідну дальність стрільби $L_с$ =15085,092 м та значення кута $\alpha = –6{,}088°$. Також для даного пострілу обчислено довжину ділянки польоту снаряда з надзвуковою швидкістю $L_{ндш}$ = 11855 м. Крім того, складено рівняння лінії напрямку стрільби (4.7) та визначено його коефіцієнти: $a_{лс} = –9{,}375$; $b_{лс} = –1$; $c_{лс} = 48750$.

На третьому кроці визначено зону можливої реєстрації балістичної та дульної хвиль поточного артилерійського пострілу ABCD. У свою чергу, знайдені координати точок A, B, C, D: $x_A = 5150$; $y_A = 0$; $x_B = 3892{,}6$; $y_B = 11788{,}13$; $x_C = 3992{,}6$; $y_C = 11788{,}13$; $x_D = 5250$; $y_D = 0$. Рівняння чотирьох прямих, що проходять

через точки A, B, C та D, визначені у вигляді рівнянь (4.14)-(4.17), а їх коефіцієнти складають: $a_{AB} = –9{,}375$; $b_{AB} = 48281{,}25$; $a_{DC} = –9{,}375$; $b_{DC} = 49218{,}75$; $a_{AD} = 0$; $b_{AD} = 0$; $a_{BC} = 0$; $b_{BC} = 11788{,}13$.

На четвертому кроці проведено відсортування сенсорів, що входять до зони ABCD. Так, всі 30 сенсорів (табл. 4.7) послідовно перевірено на виконання умови (4.18). В результаті відібрано 12 сенсорів, які задовольняють даній умові, для подальших розрахунків: 3-й, 6-й, 9-й, 13-й, 15-й, 17-й, 20-й, 21-й, 23-й, 25-й, 27-й та 28-й. Після цього дані сенсори пронумеровано за порядком від 1-го до 12-го.

Згодом на кроках 5, 6 та 7 запропонованого методу визначено значення відстаней d_{li}, d_{ti} та P_i для кожного i-го відібраного сенсора (i = 1, 2, …, 12). При цьому відстані d_{li} розраховані за допомогою виразів (4.19)-(4.21), а відстань d_{ti} – за використанням формули (4.22). Поточні значення ймовірності безвідмовної роботи $P_i(t)$ взято безпосередньо з табл. 4.7. Отримані значення наведених параметрів зведено в табл. 4.8.

Таблиця 4.8 − Розраховані параметри відібраних акустичних сенсорів

№	d_{li}	d_{ti}	P_i
1	10646,47	38,801	0,771
2	5935,713	1,236	0,903
3	8296,915	36,89	0,843
4	10730,63	9,39	0,936
5	8443,364	33,34	0,792
6	8306,016	13,8	0,945
7	5838,183	38,18	0,79
8	5950,141	40,33	0,89
9	10795,18	31,89	0,901
10	5851,126	45,46	0,821
11	10957,7	35,77	0,871
12	10588,66	35,49	0,798

Розроблено автором

На кроці 8 на основі отриманих параметрів (табл. 4.8) для кожного i-го сенсора розраховано по 3 значення комплексного критерія придатності J_{i1}, J_{i2}, J_{i3}

за допомогою нечіткої моделі з урахуванням того, в якості якого саме сенсора (першого, другого або третього) він буде використаний. Своєю чергою, нормувальні коефіцієнти нечіткої моделі K_{d1} та K_{d2} розраховані за допомогою виразів (4.29) та (4.30) і складають відповідно: $K_{d1} = 0{,}0000843$; $K_{d2} = 0{,}02$.

На дев'ятому кроці методу для кожного з відібраних сенсорів за допомогою виразу (4.28) розраховано остаточну придатність J_{if} з визначенням типу, в якості якого він буде застосований (перший, другий або третій), та сформовано 3 групи потенційних перших, других та третіх сенсорів. Після цього усі сенсори розподілено по трьох наведених групах. У табл. 4.9 для кожного i-го сенсора наведено обчисленні значення критерія придатності, а також номер групи, в яку він розподілений.

Таблиця 4.9 − Розраховані параметри відібраних акустичних сенсорів

№ сенсора	J_{i1}	J_{i2}	J_{i3}	J_{if}	№ групи
1	0,0642	0,0694	0,139	0,139	3
2	0,834	0,508	0,0879	0,834	1
3	0,259	0,537	0,255	0,537	2
4	0,235	0,524	0,791	0,791	3
5	0,059	0,163	0,083	0,163	2
6	0,502	0,777	0,501	0,777	2
7	0,144	0,0653	0,0654	0,144	1
8	0,546	0,229	0,074	0,546	1
9	0,0628	0,313	0,646	0,646	3
10	0,344	0,151	0,069	0,344	1
11	0,0635	0,268	0,602	0,602	3
12	0,0631	0,078	0,157	0,157	3

Джерело: розроблено автором за [38]

Таким чином, до групи потенційних перших сенсорів розподілено 2-й, 7-й, 8-й та 10-й сенсори. До групи потенційних других сенсорів – 3-й, 5-й та 6-й. До потенційних третіх сенсорів – 1-й, 4-й, 9-й, 11-й та 12-й сенсори.

На останньому 10-му кроці запропонованого методу у кожній з трьох груп обрано по одному найкращому сенсору за визначеними максимальними значеннями придатності: $J_{best1} = 0{,}834$; $J_{best2} = 0{,}777$; $J_{best3} = 0{,}791$. Отже, в якості найкращих першого, другого та третього сенсорів обрано 2-й, 6-й та 4-й акустичні сенсори.

Таким чином, у ході реалізації запропонованого методу з усього наведеного у табл. 4.7 набору акустичних сенсорів обрано 3 сенсори (6-й, 17-й та 13-й), які найкращим чином підходять для реєстрації балістичної та дульної хвиль поточного артилерійського пострілу. Дані сенсори мають такі координати: $x_1 = 4569{,}2$; $y_1 = 5902{,}1$; $x_2 = 4305{,}3$; $y_2 = 8257{,}7$; $x_3 = 4071{,}2$; $y_3 = 10671{,}1$.

Проведені у даному підрозділі дослідження на двох різних прикладах артилерійських пострілів показують, що запропонований метод дозволяє досить ефективно визначати три акустичні сенсори, які найкращим чином підходять для реєстрації балістичної та дульної хвиль поточного пострілу. Зокрема, в обох прикладах з існуючих наборів сенсорів з різними параметрами визначено по три найкращих сенсори, сумарно враховуючи їх розташування по відношенню до лінії напрямку стрільби, похибку вимірювання та ймовірність працездатного стану. Отримані результати досліджень в цілому підтверджують доцільність застосування запропонованого методу для визначення трьох найкращих сенсорів з метою подальшої реєстрації балістичної та дульної хвиль з високою точністю для реалізації методу верифікації артилерійського пострілу з випадковими збуреннями та визначення координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота містить отримані автором самостійно нові науково обґрунтовані результати з підвищення ефективності та зменшення часу виконання бойової роботи КІСУ практичними стрільбами гарматою при виникненні різних збурень засобом удосконалення імітаційної моделі пострілу і методів верифікації ланок ланцюга станів життєвого циклу кожного артилерійського пострілу, що утворюють зворотний зв’язок.

Отримані результати дають можливість зробити такі висновки.

1. На основі аналізу відкритих джерел літератури виділено ланки ланцюга станів «заряд – зарядна камора – ствол – траєкторія снаряда – ціль» життєвого циклу окремого артилерійського пострілу. Існують моделі і методи автоматизованого діагностування стволів гармат за рівнем зношеності на основі поточного аналізу та класифікації акустичних полів пострілів у вигляді дульної і балістичної хвиль. Розроблено модель і метод автоматизованої параметричної діагностики технічного стану пострілу на основі ідентифікації незалежних параметрів при розширенні порохових газів та догоранні вільного вуглецю в атмосфері в процесі пострілу. Представлено метод відстеження рухомого артилерійського снаряду під час впливу на нього збурень на основі реєстрації балістичної та дульної хвиль на відстані, що утворюються з дальністю його переміщення. Розглянуті методи і моделі дозволяють частково здійснити верифікацію окремих ланок пострілу артилерійської гармати.

2. Удосконалено модель та алгоритм розрахунку процесу рівноважної термодеструкції порохової суміші. Для визначення рівноважного складу ПГ, що містять газоподібну та конденсовану фази, використані мольні частини. Для цього було модифіковано представлення завершального і лінеаризованого рівняння закону мас для врахування конденсованої фази. На основі ознак хімічної рівноваги зафіксовано константи для мольних часток.

Запропоновано модель визначення температури суміші інертного газу та ПГ у ємності фіксованого об’єму. Необхідність використання ємності фіксованого об’єму викликана спалюванням при випробуваннях навішувань пороху фіксованої маси. Під час спалювання пороху постійного складу зміна температури порохових газів забезпечується шляхом спалювання його навішувань змінної маси та змішуванням з інертним газом постійного об'єму. Інертний газ забезпечує відсутність повного окислення ПГ при від’ємному кисневому балансі порохової суміші.

Проведено верифікацію та валідацію методу розрахунку складу ПГ для заповнення бібліотеки. Продемонстровано адекватний характер відображення зміни кількості конденсованої фази при зміні температури та збіг кількісних характеристик у реперних точках. Показано чутливість визначення кількісного складу та температури продуктів згорання при виборі їх компонування, що відрізняється від дійсного.

3. Проведено моделювання за умов зміни вогневих позицій причіпних артилерійських установок, що дозволило врахувати час на транспортування до бойової позиції, можливі втрати боєздатності під час руху та ризик виявлення та атаки з боку супротивника під час переміщення до бойової позиції. В основу моделювання покладено стохастичну імітаційну модель бойової роботи причіпних артилерійських установок, що дозволило врахувати випадковий характер таких параметрів, як швидкість снаряда, час на перезарядку, ймовірність виявлення супротивником. Розроблено алгоритми для визначення оптимальних стратегій зміни вогневих позицій, який враховує такі зовнішні збурення, як погодні умови та технічний стан артилерійських установок перед здійсненням пострілу.

– Розроблено моделі бойової роботи окремої самохідної артилерійської системи на базі причіпної артилерійської одиниці. Для цього розроблено методику динамічного оцінювання поточного стану боєздатності окремої

самохідної артилерійської системи. Розроблено дерево станів боєздатності окремої самохідної артилерійської системи та виявлено рівень залежності кількості пострілів, необхідних для ураження цілі підвищеної небезпеки впродовж заданого інтервалу часу.

Зазнала суттєвого удосконалення імітаційна модель пострілу та метод ефективного керування станами бойової роботи причіпної артилерійської гармати за наявності зовнішніх динамічних збурень, які залежать від часу здійснення пострілів при зміні вогневої позиції, що дало можливість визначити час виконання бойового завдання окремих самохідних артилерійських систем за умов втрати боєздатності тільки за рахунок внутрішніх динамічних збурень при використанні запропонованої чотирикомпонентної моделі керування бойовими діями окремої самохідної артилерійської системи без зміни вогневої позиції, що дозволило провести верифікацію ланки траєкторії в ланцюгу станів життєвого циклу артилерійського пострілу.

4. Запропоновано метод визначення трьох акустичних сенсорів для реєстрації балістичної та дульної хвиль артилерійського пострілу. Запропонований метод дозволяє виконати завдання вибору трьох акустичних вимірювачів з безлічі наявних у зоні ведення стрільби, які дають змогу здійснювати ефективну реєстрацію балістичної та дульної хвиль пострілу з урахуванням їх розташування по відношенню до лінії напрямку стрільби, похибки вимірювання та ймовірності безперебійної роботи. Для оцінювання акустичних сенсорів у представленому методі застосовується розроблена нечітко-логічна модель, що дозволяє розраховувати значення критерія придатності сенсорів для верифікації поточного артилерійського пострілу.

Для дослідження ефективності запропонованого методу проведено обчислювальні експерименти на двох прикладах артилерійських пострілів з різними параметрами. В обох досліджуваних випадках було визначено по три акустичні сенсори, які найкращим чином підходили для точної реєстрації

балістичної та дульної хвиль поточного пострілу, що в цілому підтверджує високу ефективність розробленого методу та доцільність його застосування для визначення трьох найкращих сенсорів з метою подальшої реалізації методу верифікації артилерійського пострілу з випадковими збуреннями та визначення координати зіткнення снаряда з поверхнею.

5. Дисертаційне дослідження проведено в НУ «Одеська політехніка» і апробовано в д/б НДР № 224-47 (№ ДР 0122U200907) за темою «Підвищення ефективності АСК спеціального призначення за рахунок моделювання нелінійних високоенергетичних динамічних процесів». На Всеукраїнському конкурсі МО ЗСУ результати розробки ланцюгів для системи верифікації перемогли в номінації «Кращий винахід 2023 року» у сухопутних і десантно-штурмових військах, що знайшло застосування в патенті України на винахід № 127193 «Спосіб визначення координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею».

ЛІТЕРАТУРА

1. Fox M. A. Understanding modern Russian war: Ubiquitous rocket, artillery to enable bttlefield swarming, siege warfare. *Fires Bulletin*. 2017. P. 20–25. https://tradocfcoeccafcoepfwprod.blob.core.usgovcloudapi.net/fires-bulletin-archive/2017/sep-oct/sep-oct.pdf

2. Ratliff T. M. Field artillery and fire support at the operational level: An analysis of operation Desert storm and operation Iraqi freedom : monograf. 2017. 44 p. URL: https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1039906.pdf.

3. Bowman T. U.S. military trainers teach Afghan troops to wield artillery. *National Public Radio*. 2016, July 5. URL: https://www.wkms.org/2016-07-05/u-s-military-trainers-teach-afghan-troops-to-wield-artillery.

4. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ: Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції (Львов, 17-18 травня 2018 року). Львов: НАСВ, 2018. 389 с.

5. А.Г. Додонов, А.В. Никифоров, В.Г. Путятин. Тенденции и проблемы развития автоматизации управления военными силами. *Математичні машини і системи*. 2019. № 3. С. 3–16.

6. В.И. Слюсар. Информационные технологии в артиллерийских системах стран НАТО. *Озброєння та військова техніка*. 2018. №3 (19). С. 69-75.

7. Л.С. Демидко, П.Є. Трофименко, Г.В. Сорокоумов, І.С. Луговський. Напрями удосконалення автоматизованих систем управління для артилерії сухопутних військ збройних сил України. *Системи озброєння і військова техніка.* 2018. № 2(54). С. 83-88. DOI: 10.30748/soivt.2018.54.11

8. Гребонос В.В. Основні напрямки розвитку та модернізації ствольної артилерії на сучасному етапі. *Збірник наукових праць ЦНДІ ОВТ ЗС України*. 2016. № 1. С. 7-12.

9. А. Ліцман, Д. Нестеров. 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. 2019. Том 80 № 2. С. 283-299.

10. Гончаренко П.Д., Хайков В.Л. Современные средства контроля износа канала орудийного ствола. *Збірник наукових праць. Академія військово-морських сил імені П.С. Нахімова*. 2012. Випуск 1(9). С. 22-27.

11. Li X., Mu L., Zang Y., Qin Q. 2020. Study on performance degradation and failure analysis of machine gun barrel, Defence Technology. Vol. 16, Issue 2. 2020.P. 362-373. https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.05.008.

12. A. Banerjee, N. Nayak, D. Giri and K. Bandha, "Effect of Gun Barrel Wear on Muzzle Velocity of a typical Artillery Shell. *2019 International Conference on Range Technology (ICORT)*. Balasore. India. 2019. P. 1-3. doi: 10.1109/ICORT46471.2019.9069641.

13. E. Dobrynin, M. Maksymov, V. Boltenkov. 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, No 5 (105). p.6–18. doi.org/10.15587/1729–4061.2020.206114

14. Dobrynin Y., Volkov V., Maksymov M., Boltenkov V. The Development of Physical Models for Acoustic Wave Formation at the Artillery Shot and Study of Possibilities for Separate Registration of Various Types Waves. *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol 4, № 5 (106). p.6–15.

15. 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, No 4 (105). p. 20–26. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.205107

16. Shim, Y., & Atkinson, M. P. Analysis of artillery shoot-and-scoot tactics. *Naval Research Logistics (NRL)*. 2018. № 65(3), P. 42–274. doi:10.1002/nav.21803

17. 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. № 4/1 (112). . P. 41–53. Indexed in SCOPUS, DOI: 10.15587/1729-4061.2021.239150

18. Тарахтій О. С., Гульцов П. С., Максимов О. М. Моделювання утворення дульного викиду як діагностичної ознаки про стан пострілу. *Science and society: modern trends in a changing world*. Proceedings of the 2nd International scientific and practical conference. MDPC Publishing. Vienna. Austria. 2024. P. 184-190. URL: URL: 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/.

19. 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. DOI: https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.24.

20. 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.

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

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

23. Спосіб визначення зношення дула і зарядної камори артилерійської гармати: пат. України № 126356; заявл. 13.08.20; опубл. 21.09.2022, Бюл. № 3.

24. Спосіб визначення координати зустрічі артилерійського снаряда з поверхнею : пат. України № 127193; заявл. 20.11.20 ; опубл. 31.05.2023. Бюл. №22.

25.Brunetkin, O., Maksymov, M., Dobrynin, Y., Demydenko, V., Sidelnykov, O. *Development of a process model for determining the composition and energy characteristics of a pyrotechnic mixture using the library method*. EUREKA: Physics and Engineering. 2024. №5, P.99-112. Indexed in SCOPUS, https://doi.org/10.21303/2461-4262.2024.003453

26. Бутенко О.В., Максимов М.В., Демиденко В.Е., Брунеткін О.І. Метод пошуку розв'язання складної задачі інтерпретації для розв'язання зворотної задачі з визначення складу пального. *Суднові енергетичні установки*. *Науково-технічний збірник*. Одеса. 2019. №39. С. 30–42.

http://seu.onma.edu.ua/wp-content/uploads/2020/09/2019_39.pdf

27. Максимов М. В., Демиденко В. Е., Бутенко О. В., Брунеткін О. І. Модель піролізу органічних речовин змінного складу. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2020. №3. С. 12-24. DOI: 10.20998/2078-5364.2020.3.02

28. А.В. Бутенко, В.Э. Демиденко, А.И. Брунеткин. Разработка метода моделирования технических систем. *Наука: відкриття і прогрес:* Збірник статей III Міжнародної наукової конференції. Чехія, Карлови Вари, 2018. С. 17-25.

29. Бутенко А.В., Демиденко В.Е., Максимов М.М., Максимова О.Б. Разработка метода определения целевой функции оптимизации энергетической установки. *Modern scientific challenges and trends*: a collection scientific works of the

International scientific conference., Warsaw, Poland, 20th October, 2018. Warsaw. 2018. Issue. 9. P.128-133.

30. Бутенко А.В., Демиденко Э.В., Брунеткин А.И. Метод идентификации состава газообразного горючего. *Сучасні тенденції розвитку науки*: матеріали II міжнародної науково-практичної конференції, 17–18 березня 2018 р. (частина II). Київ. МНЦД. С. 39-40.

31. Бутенко О.В., Демиденко В.Е., Брунеткін О.І Метод ідентифікації складу газоподібного пального. *Перспективні напрямки наукової думки*: матеріали міжнародної науковопрактичної конференції, 18 квітня 2018 р. Том 5. Тернопіль. ГО «Європейська наукова платформа» С. 63-69.

32. Бутенко О.В., Демиденко В.Е., Бондаренко В.В., Брунеткін О.І Модель і метод визначення витрати продуктів згорання газів природного і штучного походження. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП_18_2018)*: матеріали XVIII міжнародної науковотехнічної конференції 8–13 червня 2018 р. Одеса (Затока). С. 56-59.

33. Boltenkov V, Brunetkin O, 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*. 2021. Vol 6. № 3 (114). P. 6-7. Indexed in SCOPUS, doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245854.

34. Demydenko V.E., Maksymov M.V.., Boltenkov 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.

35. 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

36. Butenko A.V., Demidenko V.E., Maksymova O.B. Development of the control system data ware and software for a heat supply variable structure system. *Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine*: a collection scientific works of the International scientific and practical conference., Wloclawek, Republic of Poland, December 21-22, 2018. Wloclawek. 2018. P.67 – 71.

37. 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. Indexed in SCOPUS, DOI: 10.15587/1729-4061.2020.220326

38. Демиденко В.Е., Реценко С.С., Максимов М.М. Метод визначення трьох акустичних сенсорів для реєстрації балістичної хвилі артилерійського пострілу. Електротехнічні та комп'ютерні системи. 2024. №41(117). с.43- 52. https://doi.org/10.15276/eltecs.41.117.2024.5

39. Демиденко В.Е., Максимов М.В., Болтьонков В.О. Автоматична класифікація артилерійських стволів за рівнем зносу на підставі акустичних сигнатур пострілів. *Problems of Emergency Situations*: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. – Харків: Національний університет цивільного захисту України. 2021. С. 35-36.

40. Oprean, Laurean-Georgel. Artillery from the Perspective of Firing Effects and Ensured Capabilities. *Scientific Bulletin*. 2020. №25. P. 107-113. 10.2478/bsaft-2020-0015.

41. 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

42. Świętochowski N. Field Artillery in the defensive war of Ukraine 2022-2023. Part I. Combat potential, tasks and tactics. *Scientific Journal of the Military University*

of Land Forces. 2023. vol. 210 № 4. P. 341-358. https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.1631.

43. Świętochowski N. Field Artillery in the defensive war of Ukraine 2022-2023. Part II. Methods of task implementation. *Scientific Journal of the Military University of Land Forces*. 2024. vol. 211 № 1. P. 57-76. https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.4136.

44. D. Markov, "Use of artillery fire support assets in the attrition approach in the Russia-Ukraine conflict", *Environment. Technology. Resources. Rezekne, Latvia*: Proceedings of the 15th International Scientific and Practical Conference. Jun. 2024. Vol. IV. P. 178-182 doi: 10.17770/etr2024vol4.8208.

45. Ganjiyev Shuxratjon Jurayevich, Usmonov Shaxobiddin Ruzimurodovich, Karimov Azamat Xoldarovich. 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://www.giirj.com/index.php/giirj/article/view/4825

46. Shoot-and-Scoot: The Archer Artillery System in Ukraine. *Gunpowder Magazine:* veb site. January 25, 2023. URL https://gunpowdermagazine.com/shoot-and-scoot-the-archer-artillery-system-in-ukraine/

47. Aliev A. A., Bayramov A. A., Sabziev E. N. Effectiveness of

artillery systems. *Advanced Information Systems*. 2018. Vol. 2(3). P.115–122. doi: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.3.20

48. Katsev I. Evaluation method of the artillery's effectiveness against unitary target. *Security & Future*, 2018. Vol. 2(4). P. 196–198. URL: https://stumejournals.com/journals/confsec/2018/4/196.full.pdf

49. Moon S.H. Weapon effectiveness and the shapes of damage functions. *Defence Technology*. 2021. Vol. 17(2). P.617–632. doi: https://doi.org/10.1016/ j.dt.2020.04.009

50. Ткачук П.П., Бударецький Ю.І., Щавінський Ю.В., Прокопенко В.В. Вплив засобів автоматизації управління підрозділами і вогнем артилерії на ефективність її застосування. *Військово-технічний збірник*. 2015. № 12. С. 75- 82.

51. Сергієнко Р.В., Дідіченко О.А. Досвід застосування засобів артилерійської розвідки у контрбатарейній боротьбі. *Перспективи розвитку ракетних військ і артилерії Сухопутних військ*: збірник тез доповідей науково-технічної конференції. Львів: Академія Сухопутних військ. 2014. С. 101 - 103.

52. Дмитриев В.О. Совершенствование средств разведки и обеспечения стрельбы полевой артиллерии сухопутных войск США. *Зарубежное военное обозрение*. 2016. № 8. С. 45-51.

53. Крупнов А.В. Автоматизированная система управления огнем полевой артиллерии ADLER II сухопутных сил Германии. *Зарубежное военное обозрение*. 2010. № 10. С. 45-47.

54. Бєляєв М.І., Толмачов О.М. Моніторинг стану самохідної артилерії сухопутних військ Збройних Сил України та визначення напрямків її розвитку. *Військово-технічний збірник*. 2015. № 3(43). С. 11-15.

55. Field Artillery Operations and Fire Support: Field Manual 3-09. Section II. Washington: Headquarters, Department of the Army Washington, 2014. P. 4-12. URL:https://armypubs.army.mil/epubs/DR_pubs/DR_a/pdf/web/fm3_09.pdf.

56. Нові автоматизовані системи управління для армії США. Сухопутні війська.*Офіційний сайт ZVO.SU*: веб-сайт.

URL: http://www.zvo.su/suhoputnye-voyska/novye-asu-dlya-armii-ssha.html.

57. Techniques for the Fires Brigade. *Army Techniques Publication*. 2012. No. 3-09.24. Washington: CreateSpace Independent Publishing Platform, 186 p.

URL:: https://www.amazon.com/TechniquesPublication-3-09-24-3-09-22-November/dp/1481200356.

58. ADLERII Artillery Computer Network Deliveredto Troops. *Army-Technology:* web-site. URL: Army-Technology.com.

59. Field Manual. No. 3-09.22.Headquarters. Department of the Army Washington. DC. 2 March 2001.

URL:https://www.globalsecurity.org/military/library/policy/army/fm/3-09-22/index.html

60. Dobrynin Ye.V., Boltenkov 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. P.117–134

61. Dobrynin, Ye. Davydov V. Simulation Model of the Information Technology for the Technical Diagnosis of Impulse Heat Machine. *Пр. Одес. політехн. ун-ту*. 2020. Вип. 2(61). С. 95-103.

62. Dobrynin Ye.V. Boltenkov V.O., Maksymov M.V. Information Technology for Automated Assessment of the Artillery Barrels Wear Based on SVM Classifier. *Applied Aspects of Information Technology.* 2020. Vol.3 No.3. P. 117-134.

63. Установка для визначення складу горючого газу в процесі його спалювання: пат. України № 120216; заявл. 22.12.2017; опубл. 25.10.2019. Бюл. № 20.

64. Brunetkin O., Dobrynin Y., Maksymenko A., Maksymova O. , Alyokhina S. Model and Method of Conditional Formula Determination of Oxygen-Containing Hydrocarbon Fuel in Combustion. *Energetika*. 2020. T. 66. Nr. 1. P. 1–11.

65. Горохів С.В. Внутрішня балістика ствольних систем: монографія. М.: ЦНДІ інформації, 1985р. 100 с.

66. Olexander Brunetkin, Vitalii Kuzmenko, Olha Soloviova. Mathematical model of energy transformation processes in barrel system for determining shooting perfomance. *Published by Lviv Polytechnic National University*. JEECS. 2022. Vol. 8, Number 1: p. 28 – 39. https://doi.org/10.23939/jeecs2022.01.028

67. 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:

68. Максимов М. В., Гульцов П. С., Болтьонков 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

69. 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/.

70. Тарахтій О. С., Гульцов П. С., Максимов О. М. Удосконалення методу керування бойовою здатністтю 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. URL: https://sci-conf.com.ua/i-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-european-congress-of-scientific-achievements-29-31-01-2024-barselona-ispaniya-arhiv/.

71. Zeng T., Yang R., Li J., Tang W., Li, D. Thermal Decomposition Mechanism of Nitroglycerin by ReaxFF Reactive Molecular Dynamics Simulations. *Combustion Science and Technology*. 2021. Vol.193:3. P. 470-484. DOI:10.1080/00102202.2019.1661999

72. Luo Q., Ren T., Shen H., Zhang J., Liang D. The Thermal Properties of Nitrocellulose: From Thermal Decomposition to Thermal Explosion. *Combustion Science and Technology*. 2018. Vol.190:4. P. 579-590.

DOI:10.1080/00102202.2017.1396586

73. BoulkadidM. K., Lefebvre M. H., Jeunieau L., Dejeaifve A. Burning rate of artificially aged solid double-base gun propellants. *Journal of Energetic Materials*. 2020. Vol. 38:1. P. 1-19. DOI:10.1080/07370652.2019.1657204

74. Berthumeyrie S., Collin S., Bussiere P.-O., Therias S. Photooxidation of cellulose nitrate: New insights into degradation mechanisms. *Journal of Hazardous Materials*. 2014. Vol. 272. P. 137-147. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.02.039

75. Huang J., Zhang A., Xue H. *et al.* Chaetomium elatum treatment of nitrocellulose: investigation on structural and thermal properties. *Cellulose*. 2024. Vol.31, 1159–1173. https://doi.org/10.1007/s10570-023-05700-z

76. Anipko O., Baulin D., Horielyshev S., Boikov I., Babkov Y., Oleksenko O., Misiuk H., Kutsenko V., Ivanets M., Voinov V. Study of the nitrocellulose gunpowder regeneration process using hydrogen peroxide. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2023. Vol. 5, P. 3–13. doi: https://doi.org/10.21303/2461-4262.2023.003104

77. Trache D., Tarchoun A. F. Analytical Methods for Stability Assessment of Nitrate Esters-Based Propellants. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. 2019, Vol. 49:5, P. 415-438. https://doi.org/10.1080/10408347.2018.1540921

78. Lennert E., Bridge C. Correlation and analysis of smokeless powder, smokeless powder residues, and lab generated pyrolysis products via GC–MS. *Forensic Chemis*try. 2021. Vol. 23. P. 100316. https://doi.org/10.1016/j.forc.2021.100316

79. Kagankiewicz F. Statistical Approach in Determining Energy Ballistic Parameters of Gunpowder Contained in the 7.62×39 mm Ammunition Based on Measuring the Development of Pressure in a Manometric Bomb. *Central European Journal of Energetic Materials*. 2023. Vol. 20(3). P. 260-283. DOI:10.22211/cejem/172908

80. Cieślak K., Gańczyk-Specjalska K., Drożdżewska-Szymańska K. *et al.* Effect of stabilizers and nitrogen content on thermal properties of nitrocellulose granules. *J Therm Anal Calorim*. 2021. Vol. **143**. P. 3459–3470. https://doi.org/10.1007/s10973-020-09304-8

81. Jensen T.L., Moxnes J.F., Unneberg E., Dullum O. Calculation of Decomposition Products from Components of Gunpowder by using ReaxFF Reactive Force Field Molecular Dynamics and Thermodynamic Calculations of Equilibrium

Composition. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 2014. Vol. 39, Issue 6 P. 830-837. https://doi.org/10.1002/prep.201300198

82. Pantea D., Brochu S., Thiboutot S., Ampleman G., Scholz G. A morphological investigation of soot produced by the detonation of munitions. Chemosphere. 2006. Vol. 65, Issue 5. Pages 821-831. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.03.027

83. Podlesak D., Huber R. C., Amato R. S., Dattelbaum D. M., Firestone M. A., Gustavsen R. L., Mang J. T., Ringstrand B. S. Characterization of detonation soot produced during steady and overdriven conditions for three high explosive formulations. United States: AIP Conference Proceedings. 2017. P. 030006 doi:10.1063/1.4971464

84. Yan C., Zhu C. Quantitative assessment method of muzzle flash and smoke at high noise level on field environment. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13(1), P.1480 https://doi.org/10.1038/s41598-023-27722-0

85. Muthurajan H., Ghee H. Software Development for the Detonation Product Analysis of High Energetic Materials - Part I. *Central European Journal of Energetic Materials*. 2008. Vol. 5(3-4), P. 19-35. https://www.researchgate.net/publication/228786423_Software_Development_for_the_Detonation_Product_Analysis_of_High_Energetic_Materials-Part_I

86. Khalil M. Study on modeling and production inaccuracies for artillery firing. *Archive of mechanical engineering*. 2022. Vol. 69. No. 1. P. 165–183. https://journals.pan.pl/Content/121939/PDF/AME_2022_139802_2.pdf

87. Petlyuk I., Shchavinsky Y. Use of simulation modeling systems for determination of appropriate characteristics of prospective artillery weapons. *Collection of scientific works of Odesa Military Academy.* 2021. No.14. P. 11-22. https://doi.org/10.37129/2313-7509.2020.14.1.11-22

88. Mady M., Khalil M., Yehia, M. Modelling and production of artillery firing-tables: case-study. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. No. 1507 (8). P. 082043. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1507/8/082043/meta

89. Sun Y., Zhang S., Lu G., Zhao J., Tian J., Xue J. Research on a Simulation Algorithm for Artillery Firepower Assignment According to Region. *3rd International Conference on Computer Science and Management Technology (ICCSMT), Shanghai, China*. 2022. P. 353-356. https://ieeexplore.ieee.org/document/10143885

90. Maneva N.S., Achkoskib J.Z., Petreskic D.T., Gocićd M.L., Rančiće D.D. Smart field artillery information system: model development with an emphasis on collisions in single sign-on authentication. *Military Technical Courier*. 2017. Vol. 65. Is. 2. P. 442-463. https://scindeks.ceon.rs/Article.aspx?artid=0042-84691702442M

91. Krzyzanowski S. How to assess the accuracy of artillery fire. *Scientific Journal of the Military University of Land Forces*. 2018. Vol. 50. No. 1 (187). P. 25-39. https://zeszyty-naukowe.awl.edu.pl/article/117355/en

92. Washburn A.R. Notes on Firing Theory. *Naval Postgraduate School Monterey, California*. 2002. https://faculty.nps.edu/awashburn/Files/Notes/FiringTheory.pdf

93. Брунеткин О., Давыдов В., Бутенко О., Лысюк Г., и Бондаренко А. Определение состава сгоревшего газа с использованием метода ограничений как проблема интерпретации модели. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2019. №*3*/6(99), С. 22–30. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.169219

94. Alemasov V., Glushko V. Thermodynamic and thermophysical properties of combustion products/ translated from Russian [by R. Kondor, and Ch. Nisenbaum]. Jerusalem : Israel Program for Scientific Translations. 1974-1976. https://searchworks.stanford.edu/view/892711

95. Kogler M., Köock E.-M., Klöotzer B., Schachinger T., Wallisch W., Henn R., Huck C.H., Hejny C., Penner, C. High-temperature carbon. deposition on oxide surfaces by CO disproportionation. *J. Phys. Chem.* 2016. №**3**(120). P.1795–1807. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b12210

96. Kotov V.G., Svyatenko A.M., Khovavko A.I., Nebesny A.A., Filonenko D.S. Thermodynamics of Carbon-Black For- mation Process at High Hydrogen Concentration in Gas which Contains Carbon Monoxide. *Energy Technologies & Resource Saving*. 2014. № 1. C. 38-43. http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/127270

97. Martin Fowler. UML Distilled. A Brief Guide to the Standard Object Modeling Language. 3rd Edition. 2004. Addison-Wesley.

98. ARCHER Mobile Howitzer 6x6. *BAE Systems: web site. URL:*https://www.baesystems.com/en/product/archer#

99. Горбенко В., Кучинська А., & Гудим В. Особливості таргетингу в сучасних об'єднаних та майбутніх багатодоменних операціях. *Повітряна міць України*. 2023. № 2(5), С.10–16. https://doi.org/10.33099/2786-7714-2023-2-5-10-16

100. Antai I., Hellberg R., & Skoglund P. Logistics growth in the armed forces: development of a theoretical framework and research propositions. *Defence Studies*. 2023. № 24(1), 84–106. https://doi.org/10.1080/14702436.2023.2249441

101. Phyo S. M., Hlaing S. Z. and Lwin M. M. Multi-Criteria Decision Analysis in Urban Transport System by applying Function Resonance Analysis Method. *International Conference on Advanced Information Technologies (ICAIT)*: conference paper. Yangon. Myanmar. 2020. P. 230-235, doi: 10.1109/ICAIT51105.2020.9261795

102. Oran R. Young Constructing diagnostic trees: A stepwise approach to institutional design. *Earth System Governance*. 2019. Vol. 1. P.100002. https://doi.org/10.1016/j.esg.2019.02.001.

103. STANAG 4355 The Lieske modified point mass and five degrees of freedom trajectory models - AOP-4355 EDITION A. (No enabled versions). Washington DC, *United States: United States Department of Defense*. 2022. https://publishers.standardstech.com/content/military-dod-stanag-4355. Accessed: 2023-11-14

104. Aldoegre, M. Comparison between trajectory models for firing table application. North-West University, Potchefstroom. 2019. https://5dok.net/document/7q08x49y-comparison-between-trajectory-models-for-firing-table-application.html

105. Гриньов Б.В., Кириченко І.К. Аналітична геометрія: підруч. для вищих техн. навч. закладів. Харків: Гімназія, 2008. 340 с.

106. Аналітична геометрія у просторі: навч. посібник / Т.М. Кадильникова, І.Б. Кочеткова, Л.Ф. Сушко, О.В. Білова. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2012. 48 с.

107. Бондаренко Н.В., Отрашевська В.В. Аналітична геометрія: конспект лекцій. Київ: КНУБА, 2022. 84 с.

108. Карташов, М.В. Імовірність, процеси, статистика: посібник. – К.: Видавничополіграфічний центр ’Київський університет’, 2008. 494 с.

109. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965. 524 с.

110. Hampel R., Wagenknecht M., Chaker N. Fuzzy control: Theory and practice. New York: Physika-Verlag, Heidelberg, 2000. 410 p. DOI 10.1007/978-3-7908-1841-3.

111. Recent developments and new directions in soft computing /L.A. Zadeh, A.M. Abbasov, R.R. Yager, S.N. Shahbazova, M.Z. Reformat, Eds. STUDFUZ 317, Cham: Springer. 2014. 466 p. DOI 10.1007/978-3-319-06323-2

112. Jamshidi M., Kreinovich V., Kacprzyk J. Advance trends in soft computing., Eds. Cham: Springer-Verlag. 2013. 468 p. DOI https://doi.org/10.1007/978-3-319-03674-8

113. Kosko B. Fuzzy Systems as Universal Approximators. *IEEE Trans. on Computers*. Vol. 43, №11. 1994. – P. 1329-1333. DOI: 10.1109/12.324566

114. Mamdani E.H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International journal of man-machine studies*. 1975. No. 7(1). P. 1-13. DOI: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2.

ДОДАТОК А

Документи про впровадження результатів дослідження

Україна
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

КОД ЄДРПОУ 43861328

пр.Шевченка, 1, м.Одеса, 65044
Україна
тел. +38 048 7223474
факс. +38 048 7221992
E-mail: mail@op.edu.ua

04.11.2024 №1619/47-06
на №

ДОВІДКА
про використання результатів дисертаційної роботи
Демиденка Володимира Едуардовича
представленої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю
151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Надана довідка затверджує, що дисертаційне дослідження Демиденка В .Е. «Імітаційна модель пострілу гармати та методи верифікації його життєвого циклу в комп'ютерно-інтегрованій системі управління» 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. Максимов М.В.
тел. 705-83-71

Україна
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

КОД ЄДРПОУ 43861328

пр.Шевченка, 1, м.Одеса, 65044
Україна
тел. +38 048 7223474
факс. +38 048 7221992
E-mail: mail@op.edu.ua

04.11.2024 № 1618/47-06
на №

ДОВІДКА
про використання результатів дисертаційної роботи
Демиденка Володимира Едуардовича
представленої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю
151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Надана довідка затверджує, що матеріали дисертаційного дослідження Демиденка В .Е. «Імітаційна модель пострілу гармати та методи верифікації його життєвого циклу в комп'ютерно-інтегрованій системі управління» 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;
- Моделювання процесів і систем;
- Сучасні системи керування;
- Оптимальні та адаптивні системи управління.

Довідка надана у зв'язку з захистом дисертації.

Перший проректор Сергій НЕСТЕРЕНКО

Вик. Максимов М.В.
тел. 705-83-71

ДОДАТОК Б

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Brunetkin, O., Maksymov, M., Dobrynin, Y., Demydenko, V., Sidelnykov, O. *Development of a process model for determining the composition and energy characteristics of a pyrotechnic mixture using the library method*. EUREKA: Physics and Engineering. 2024. №5, P.99-112. Indexed in SCOPUS, https://doi.org/10.21303/2461-4262.2024.003453

2. Boltenkov V, Brunetkin O, 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*. 2021. Vol 6. № 3 (114). P. 6-7. Indexed in SCOPUS, doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245854.

3. 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. Indexed in SCOPUS, DOI: 10.15587/1729-4061.2020.220326

4. Демиденко В.Е., Реценко С.С., Максимов М.М. Метод визначення трьох акустичних сенсорів для реєстрації балістичної хвилі артилерійського пострілу. *Електротехнічні та комп'ютерні системи.* 2024. №41(117). с.43- 52. https://doi.org/10.15276/eltecs.41.117.2024.5

5. Бутенко О.В., Максимов М.В., Демиденко В.Е., Брунеткін О.І. Метод пошуку розв'язання складної задачі інтерпретації для розв'язання зворотної задачі з визначення складу пального. *Суднові енергетичні установки*. *Науково-технічний збірник.* Одеса. 2019. №39. С. 30–42.
http://seu.onma.edu.ua/wp-content/uploads/2020/09/2019_39.pdf

6. Максимов М. В., Демиденко В. Е., Бутенко О. В., Брунеткін О. І. Модель піролізу органічних речовин змінного складу. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2020. №3. С. 12-24. DOI: 10.20998/2078-5364.2020.3.02

7. Demydenko V.E., Maksymov M.V.., Boltenkov 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.

8. 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

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

10. Спосіб визначення координати зустрічі артилерійського снаряда з поверхнею : пат. України № 127193; заявл. 20.11.20 ; опубл. 31.05.2023. Бюл. №22.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

11. Демиденко В.Е., Максимов М.В., Болтьонков В.О. Автоматична класифікація артилерійських стволів за рівнем зносу на підставі акустичних сигнатур пострілів. *Problems of Emergency Situations*: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. – Харків: Національний університет цивільного захисту України. 2021. С. 35-36.

12. Бутенко А.В., Демиденко В.Е., Максимов М.М., Максимова О.Б. Разработка метода определения целевой функции оптимизации энергетической установки. *Modern scientific challenges and trends*: a collection scientific works of the International scientific conference., Warsaw, Poland, 20th October, 2018. Warsaw. 2018. Issue. 9. P.128-133.

13. Бутенко А.В., Демиденко Э.В., Брунеткин А.И. Метод идентификации состава газообразного горючего. *Сучасні тенденції розвитку науки*: матеріали II міжнародної науково-практичної конференції, 17–18 березня 2018 р. (частина II). Київ. МНЦД. С. 39-40.

14. Бутенко О.В., Демиденко В.Е., Брунеткін О.І Метод ідентифікації складу газоподібного пального. *Перспективні напрямки наукової думки*: матеріали міжнародної науковопрактичної конференції, 18 квітня 2018 р. Том 5. Тернопіль. ГО «Європейська наукова платформа» С. 63-69.

15. Бутенко О.В., Демиденко В.Е., Бондаренко В.В., Брунеткін О.І Модель і метод визначення витрати продуктів згорання газів природного і штучного походження. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП_18_2018)*: матеріали XVIII міжнародної науковотехнічної конференції 8–13 червня 2018 р. Одеса (Затока). С. 56-59.

16. А.В. Бутенко, В.Э. Демиденко, А.И. Брунеткин. Разработка метода моделирования технических систем. *Наука: відкриття і прогрес:* Збірник статей III Міжнародної наукової конференції. Чехія, Карлови Вари, 2018. С. 17-25.

17. Butenko A.V., Demidenko V.E., Maksymova O.B. Development of the control system data ware and software for a heat supply variable structure system. *Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine*: a collection scientific works of the International scientific and practical conference., Wloclawek, Republic of Poland, December 21-22, 2018. Wloclawek. 2018. P.67 – 71.