

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 артилерійського 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 здійснення ефективного 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 порошу 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 порошу 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., Boltchenkov 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. Boltenev 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.