

АНОТАЦІЯ

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

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

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

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

– Визначено ключові фактори, які впливають на надійність і ефективність артилерійських систем за умов динамічних збурень. Аналіз процесів показав, що навіть відносно невелике переміщення цілі без урахування її динаміки зумовлює промах з відхиленням точки влучання, що значно перевищує радіус ураження цілі.

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

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

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

У другому розділі «Інформаційне моделювання зносу артилерійських стволів» удосконалено імітаційні моделі зношення артилерійських стволів і зарядних камор, які враховують акустичні та візуальні поля, з метою забезпечення діагностики їх стану за миттєвою швидкістю снаряда, який виходить з каналу ствола, і об'єму порохових газів, що утворюються під час пострілу.

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

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

– Одержані результати підтверджують доцільність використання об'єднаних акустичних та оптичних параметрів у форматі єдиної інформаційної одиниці для оперативної діагностики зношеності, а визначення початкової швидкості та яскравості дульного спалаху дає змогу розраховувати рівень деградації ствола в режимі реального часу. Імітаційне моделювання сприяло додатковому дослідженню впливу варіативності характеристик боєприпасів. Встановлено, що порохові заряди зі значним терміном зберігання зумовлюють прискорення ерозійної зношеності. Удосконалені імітаційні моделі з

використанням нових інформаційних одиниць формують базу для інтегрованої системи моніторингу за допомогою програмного забезпечення, здатного виявляти критичну зношеність безперервно, без виведення гармати з бойової експлуатації.

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

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

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

– Визначено метод, який зумовлює оновлення Марківського контролю станів, що забезпечує зворотний зв'язок між поточними властивостями артилерійського озброєння і прогнозами в інформаційній моделі. Якщо класифікатор ідентифікує початкові ознаки критичного зношення, то ймовірність успішного ураження зменшується, що спричиняє зміну стратегії: гармата

тимчасово вилучається із залпу або ідентифікується як менш затребувана в розподілі пострілів. Це забезпечує реалізацію адаптивного управління, де Марківські стани не є фіксованими, а динамічно уточнюються на основі симуляційних спостережень, що принципово відрізняє даний підхід від класичних схем зазначених моделей.

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

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

– Розроблено узагальнену структуру інформаційно-аналітичної підсистеми моніторингу стану гармат і адаптивного управління вогнем, реалізовану за принципом безперервного збору даних та автоматизованого циклу «сенсори–аналіз–управління». Підсистема включає акустичні й оптичні сенсори,

модулі оцифрування й попередньої обробки сигналів, оснащена автоматизованою системою управління і балістичним обчислювачем польоту снаряда та визначає координати його зіткнення з поверхнею. Структура побудована на засадах об'єктно-орієнтованого проєктування, що забезпечує модульність і сумісність із наявними системами управління.

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

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

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

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

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні результати дисертації:

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

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

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

4. Dobrynin Ye.V., Boltenev V.O., Kuzmenko V.V., **Maksymov O.M.** Development of a universal binary classifier of the state of artillery barrels by the physical fields of shots. *Applied Aspects of Information Technology*. 2022. Vol.5 №4. P. 289–302. <https://doi.org/10.15276/aait.05.2022.19> (категорія Б)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Опубліковані праці апробаційного характеру:

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

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

16. Тарахтій О.С., Гульцов П. С., **Максимов О. М.** Удосконалення методу управління бойовою здатністю артилерійської гармати. *European congress of scientific achievements*: proceedings of the 1st International scientific and practical conference. Barca Academy Publishing. Barcelona, Spain. 2024. P. 120-125. <https://sci-conf.com.ua/i-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-european-congress-of-scientific-achievements-29-31-01-2024-barselona-ispaniya-arhiv>

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

ABSTRACT

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

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

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

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

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

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

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

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

In Chapter 2, «Information modeling of artillery barrel wear», improved simulation models of artillery barrel and chamber wear have been developed,

incorporating acoustic and visual fields generated during firing to enable diagnostics based on the instantaneous projectile velocity exiting the barrel channel and the volume of propellant gases produced during firing.

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

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

– The obtained results confirm the practicality of utilizing combined acoustic and optical parameters within a unified informational unit format for the real-time diagnostics of wear. Determining the muzzle velocity and the brightness of muzzle flash enables calculation of barrel degradation levels in real time. Simulation modeling has allowed additional research into the impact of ammunition characteristic variability, establishing that propellant charges with extended storage durations accelerate erosive

wear. Improved simulation models employing informational units form the foundation for an integrated monitoring system utilizing software capable of continuously detecting critical wear without withdrawing artillery from combat positions.

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

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

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

- A method was developed that facilitates the updating of Markov state estimations, providing feedback between the real properties of artillery systems and predictions made by the informational model. If the classifier identifies initial signs of critical wear, the probability of successful target engagement is reduced, modifying the artillery strategy: the gun may be temporarily excluded from a salvo or allocated reduced propellant charges during the battery's salvo distribution. This approach enables adaptive control, where Markov states are not fixed but dynamically refined based on

simulation observations, fundamentally differentiating it from classical fixed mathematical model approaches.

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

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

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

– A simulation experiment confirmed the high efficiency of the integrated system. The probability of hitting the target with the first shot increased to 78%. The average

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

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

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

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

LIST OF PUBLICATIONS BY THE APPLICANT

Scientific works publishing the main dissertation results:

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

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

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

4. Dobrynin Ye.V., Boltenev V.O., Kuzmenko V.V., **Maksymov O.M.** Development of a universal binary classifier of the state of artillery barrels by the physical fields of shots. *Applied Aspects of Information Technology*. 2022. Vol.5 №4. P. 289–302. <https://doi.org/10.15276/aait.05.2022.19> (Category B)

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

6. Maksymova O.B., Boltenev V.O., Maksymov M. V., Gultsov P.S. **Maksymov O.M.** Development and Optimization of Simulation Models and Methods

for Controlling Virtual Artillery Units in Game Scenarios. *Herald of Advanced Information Technology*. 2023. Vol.6. No.4. p. 320–337. DOI: <https://doi.org/10.15276/hait.06.2023.21>. (Category B)

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

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

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

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

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

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

13. Sposib vyznachennia kilkosti poslidovnoho pusku raket puskovoiu ustanovkoiu dlia znyschennia morskoi tsili: pat. Ukrainy na na korysnu model № 155594; zaiavl. 02.10.2023; opubl. 13.03.2024. Biul. №11. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1788150>

Published works of an approbation nature:

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

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

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

17. Tarakhtii O. S., Hultsov P. S., Maksymov O. M. Metod parabolichnoi aproksimatsii vyznachennia koordynaty zitknennia artyleriiskoho snariada z poverkhneiu. Modern problems of science, education and society: proceedings of the 12th International scientific and practical conference. SPC "Sci-conf.com.ua". Kyiv, Ukraine. 2024. P. 21-27. <https://sci-conf.com.ua/xii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-modern-problems-of-science-education-and-society-5-7-02-2024-kiyiv-ukrayina-arhiv>