

ANALYSIS OF DYNAMIC PROCESSES IN LIFTING BOOM CRANES

L. Velychko, R. Kovalchuk, N. Sokulska

Intense oscillatory phenomena occur during start-up, changes in drive mode, or braking of a lifting boom crane. These cause a significant increase in forces in the elements of its structure. Dynamic loads determine the strength of structural elements and significantly reduce the accuracy and efficiency of the machine's operations. In addition, mechanical vibrations that occur during transient processes lead to the accumulation of fatigue damage in materials. They also reduce the service life of structural elements, and therefore, the technical object as a whole.

The peculiarity of the analysis of the start-up processes of drive systems is the need to take into account in detail the inertial and elastic-dissipative characteristics of mechanical links, the dynamic properties of drive engines to ensure sufficient accuracy of calculations. Moreover, the development of mathematical models for these dynamic processes frequently entails the simultaneous analysis of oscillatory phenomena arising from diverse physical mechanisms.

Non-stationary modes of operation of load-lifting jib cranes for both civilian and military purposes are studied in the article. The level of dynamic loads can be reduced by developing rational operating modes of the crane and making changes to the mechanism design (installation of elastic couplings, vibration dampers, etc.).

A mathematical model of dynamic processes of lifting boom cranes system with four degrees of freedom is proposed in this work. The mathematical model includes differential equations of motion of the load, the rotary mechanism with the jib and the drum. It is built taking into account the simultaneous vertical and rotational movements of the load by winding the rope onto the drum. The results of mathematical modeling are analyzed. Graphical dependences of the angles of rotation and angular velocities in time of the considered moving elements of the crane and the load are constructed. Their analysis is carried out. The possibility of using mathematical modeling to increase the efficiency of operation of a jib crane is substantiated.

Keywords: dynamic processes, boom-type lifting crane, equations of motion, oscillatory phenomena.

УДК 623.4:004.93:519.6

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.32.2025.9-17>

В.Я. Гера, А.В. Баган, О.О. Лаврут, К.І. Снітков, О.І. Сівак

Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

Article history: 14 February 2025; Revised 24 February 2025; Accepted 04 March 2025

**МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ МІНОМЕТНОГО БОЄПРИПАСУ НА
ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ**

У роботі запропоновано метод визначення швидкості мінометної міни на основі комп'ютерного зору. Метод базується на відеозаписі польоту мінометної міни з частотою 60 кадрів за секунду та використанні алгоритмів аналізу зображень для ідентифікації об'єкта, визначення його просторових координат і розрахунку швидкості. Запропонований підхід не потребує спеціалізованого обладнання, оскільки використовує лише камеру сучасного смартфона. Це робить його доступним для застосування в польових умовах без залучення складних технологій та дорогих оптичних систем.

Алгоритм передбачає взаємодію користувача з програмою у покадровому режимі для точного визначення позиції мінометного боєприпасу. Використовуючи масштабне перетворення піксельних координат у метричну систему, програма дозволяє визначити пройденої відстань між послідовними кадрами та розрахувати середню швидкість руху об'єкта. Для цього враховуються часові мітки кадрів, отримані на основі частоти запису відео. Проведені польові вимірювання показали, що використання відеозаписів із частотою 60 кадрів за секунду забезпечує оптимальну точність визначення швидкості пострілу мінометного боєприпасу.

Перевагою методу є його доступність та простота реалізації, що дозволяє використовувати його в польових умовах без потреби в складних апаратних рішеннях. На відміну від традиційних радіолокаційних систем або високошвидкісних камер цей метод дозволяє отримати точні кінематичні параметри боєприпасу, використовуючи лише мобільний пристрій та алгоритми комп'ютерного зору.

Отримані результати підтверджують ефективність запропонованого методу у реальних бойових або випробувальних умовах. Впровадження цієї технології дозволить артилерійським підрозділам більш точно оцінювати швидкість боєприпасів, що є важливим для розрахунку дальності польоту та підвищення ефективності вогню.

Перспективи подальших досліджень включають автоматизацію процесу виявлення боєприпасів за допомогою штучного інтелекту, що дозволить зменшити вплив людського фактора на точність вимірювань.

В.Я. Гера, А.В. Баган, О.О. Лаврут, К.І. Снітков, О.І. Сівак

Також можливе розширення методу для аналізу інших типів снарядів і об'єктів, які швидко рухаються, що робить його універсальним для військових і наукових застосувань.

Ключові слова: мінометний боєприпас, визначення швидкості, комп'ютерний зір, відеоаналіз, обробка зображень, масштабне перетворення, артилерійські розрахунки, траєкторія руху, покадровий аналіз, алгоритми ідентифікації, військові технології, кінематичні параметри, нейронні мережі, автоматизація вимірювань, бойові випробування.

Постановка проблеми

Визначення швидкості мінометного боєприпасу є критично важливим завданням для підвищення точності вогню та ефективності артилерійських підрозділів. Традиційно для цього застосовуються артилерійські балістичні станції (АБС), які дозволяють визначати початкову швидкість міни. Однак використання АБС має низку суттєвих недоліків. По-перше, такі системи є дорогими у виробництві та обслуговуванні, що унеможливує їхнє широке розповсюдження серед тактичних підрозділів. По-друге, АБС працюють в активному режимі, випромінюючи радіосигнали, це значно підвищує ризик виявлення та демаскування позиції артилерійського підрозділу, що в умовах сучасної війни може призвести до контрбатарейного вогню [1].

Досвід російсько-Української війни показав [1], що проблема вимірювання швидкості мін набуває ще більшої актуальності через нестандартність боєприпасів. На практиці артилерійські розрахунки часто стикаються з тим, що мінометні боєприпаси та порохові заряди надходять не тільки з різних партій, а й від різних виробників. Це призводить до значних відхилень у балістичних характеристиках, що суттєво впливає на точність ураження. Командири бойових з'єднань та артилерійських підрозділів неодноразово наголошували на необхідності швидкого та точного визначення швидкості міни без залучення складного обладнання.

Вимірювання початкової швидкості мінометного пострілу є критично важливим для кількох аспектів бойового застосування та експлуатації мінометної системи. По-перше, це точність вогню – початкова швидкість мінометної міни безпосередньо впливає на її балістику. Відхилення від розрахункової швидкості може призвести до неточного влучання в ціль.

По-друге, коригування стрільби – дані про початкову швидкість дозволяють коригувати вогонь у режимі реального часу, особливо при зміні температури, вологості чи зношеності ствола.

По-третє, контроль стану озброєння – вимірювання швидкості допомагає оцінити зношення каналу ствола, втрати енергії заряду та необхідність технічного обслуговування або заміни компонентів (обтюрального кільця тощо). А це, в свою чергу, призведе до забезпечення безпеки – якщо початкова швидкість значно відхиляється від норми, це може

свідчити про несправності або неправильний підбір заряду, що може призвести до небезпечних ситуацій.

По-четверте, автоматизація розрахунків – сучасні системи управління мінометним вогнем можуть використовувати ці дані для розрахунку траєкторії в реальному часі, підвищуючи ефективність ураження цілі.

Саме тому визначення початкової швидкості є важливим елементом ефективного використання мінометного озброєння.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Основні групи оперативно-тактичних вимог (ОТВ) при створенні колісних ББМ розглянуто у роботі [3]. Зокрема, вимоги щодо маневреності та надійності: потужність силової установки, трансмісія і ходова частина (ХЧ) повинні забезпечувати прохідність у різних дорожніх і кліматичних умовах; середня швидкість на місцевості – не менше ніж 40...45 км/год. Визначення показників груп ОТВ стосовно перспективних колісних ББМ повинно йти шляхом автоматизації процесів управління вогнем і рухом, підвищення захищеності, живучості, командної керованості, автономності та ергономіки.

У роботі [4] вказується, що при розробці та проектуванні нових поколінь вузлів СП ББМ необхідно оцінити їх існуючий технічний рівень, досягнутий кращими світовими зразками за прийнятими групами функціональних, технологічних, економічних і антропологічних критеріїв. Середня швидкість на місцевості повинна складати 50...55 км/год, а в перспективі підвищитися до 65 км/год.

У роботі [5] розглянуто формування вимог до автомобілів та ББМ Національної гвардії України. Серед них: висока оперативно-тактична рухливість, можливість здійснення маршів з високими швидкостями руху, прохідністю по ґрунтових дорогах та поза ними, висока стійкість і маневреність; надійність та живучість конструкції; захист особового складу при підриві на вибухових пристроях; високі техніко-економічні показники у виробництві й експлуатації. СП повинна забезпечувати мінімальну втомлюваність водія при русі по ґрунтових дорогах протягом не менше 3-х годин. Запас ходу повинен бути 800...1000 км.

Необхідно зазначити, що формування і аналіз ОТВ та забезпечення високих ТТХ перспективних

ББМ потрібно будувати на основі аналізу світових тенденцій розвитку ОБТ передових країн.

У роботі [6] розглянуто питання реалізації основних тенденцій розвитку ОБТ, що реалізуються на світовому рівні, насамперед в передових у військовому відношенні країнах. Виділено 11 тенденцій. Серед них стосовно ББМ:

- створення нових високоефективних відносно легких ББМ, які повинні прийти на заміну (частково або повністю) основним бойовим танкам;
- пріоритетна розробка високоефективних транспортних засобів (ТЗ) середнього і великого радіуса дії з метою оперативного маневрування військами, підвищення маневреності самих зразків;
- підвищення скритності і захищеності ББМ від ураження звичайною зброєю та зброєю масового електромагнітного ураження.

У роботі [7] вказується, що всі танки (це стосується і ББМ) оцінюються за чотирма основними бойовими властивостями: захищеністю, вогневою могутністю, рухливістю та командним управлінням. При цьому конструктори намагаються вирішувати питання їх оптимальної комбінації, що є важливим. Підвищення захищеності здійснюється, у тому числі, шляхом зниження імовірності виявлення та помітності, що досягається, зокрема, зниженням силуету. Застосування гідропневматичних підвісок (ГПП) має забезпечити плавність ходу за будь-яким типом місцевості, шляхом автоматичної зміни своїх основних характеристик залежно від умов руху.

У роботі [8] зазначається, що з метою підвищення рухливості на перспективних колісних ББМ планується застосування ГПП та електричних приводів коліс. Вказується, що американські фахівці відпрацьовують технології застосування гібридних двигунів, створення редукторів у маточинах коліс, активної ГПП та застосування технічних рішень (ТР), які дозволять зменшити витрати палива. Подальше вдосконалювання колісних ББМ спрямовано на захист екіпажу, застосування нових компоновальних рішень, автоматизацію процесів управління вогнем, рухом машин, підвищення їх живучості, автономності та поліпшення ергономіки роботи.

У роботі [9] на основі аналізу перспективних напрямків розвитку СП ББМ зроблено, зокрема, наступні висновки:

- подальше вдосконалення СП шляхом розробок, що використовують традиційні матеріали і відомі ТР та фізичні принципи дії (ФПД) практично себе вичерпало;
- нові ТР та застосування нових матеріалів спрямоване на забезпечення і полегшення керування характеристиками вузлів СП.

На сьогодні у розвинених країнах з метою підвищення ТТХ ББМ виконується ряд програм і проєктів, у тому числі, такими відомими організаціями, як

DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) – агенція передових дослідницьких проєктів міністерства оборони США, ЄОА – Європейська оборонна агенція, що виконує роль координатора у країнах Європи, та ФПД – Фонд перспективних досліджень (росія). Одним із правил їх діяльності є застосування виключно проривних революційних технологій без всіляких модернізацій та удосконалення відомих ТР.

Неабиякий інтерес становлять тенденції розвитку ББМ, які окреслено у прийнятих програмах досліджень DARPA. Так наразі отримано чергові результати виконання програми GXV-T (Ground X-Vehicle Technologies), яка була запущена у 2014 році [10–12]. За цією програмою досліджуються концепції створення легкої колісної ББМ як альтернативи важким машинам. Ця ББМ повинна мати високі показники захищеності за рахунок високої мобільності і можливості у разі обстрілу ухилитися та «присідати» на підвісці. Крім того, вона повинна мати вдвічі більшу середню швидкість руху, забезпечувати прохідність по 95% місцевості та швидко змінювати рух у трьох вимірах.

Аналогічні програми прийняті до виконання і ФПД росії. З відкритих джерел відомо, що виконуються проєкти з підвищення мобільності машин на пересіченій місцевості, розробки активних засобів протидії факторам, що уражують ББМ, та застосування інтелектуальних систем захисту.

З проведеного аналізу витікає, що формування ОТВ, підвищення ТТХ та світові тенденції розвитку ББМ очікувано спрямовані на подальше підвищення їх вогневої могутності, захищеності, рухливості та командної керованості. Підвищення рухливості передбачається шляхом застосування ГПП, систем керування характеристиками СП та застосування нових ТР, які дозволять суттєво підвищити її можливості, надійність, ремонтпридатність і ресурс. Вказується на необхідності взаємопогодження характеристик СП, комплексів озброєння, силової установки та трансмісії.

Тим не менш, відсутній аналіз цього взаємопогодження та не виділено основні напрями розвитку СП, які можуть принципово вплинути на комплексне підвищення ТТХ ББМ і забезпечити зростання їх показників за рахунок підвищення досконалості СП.

Мета досліджень

Метою цієї статті дослідження є розробка доступного, ефективного та точного методу визначення швидкості мінометного боєприпасу без використання дорогого обладнання або складних обчислювальних алгоритмів. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі задачі: розробити математичну модель ідентифікації міни на відеозаписі, визначення її координат у кожному кадрі та переведення

траєкторії польоту з піксельної у метричну систему; створити алгоритм для комп'ютерної програми, що дозволить автоматизовано обчислювати швидкість боєприпасу на основі аналізу відеокадрів; провести польові випробування для оцінки точності та працездатності запропонованого методу в реальних умовах.

Виклад основного матеріалу

Основним завданням запропонованого методу визначення початкової швидкості мінометного боєприпасу є виділення його контуру на відеозаписі в момент вильоту з каналу ствола. Оскільки швидкість боєприпасу є високою, на зображенні його краї будуть розмитими, а сам об'єкт може виглядати розтягнутим у напрямку руху. Тому оптимальним рішенням є використання сірої градації для виділення міни як окремого об'єкта.

Яскравість у відтінках сірого вимірюється в інтенсивності пікселів (pixel intensity) і має значення в діапазоні від 0 до 255 (0 – чорний колір, 255 – білий колір) у 8-бітних зображеннях (найбільш поширений формат у комп'ютерному зорі) [6]:

- 0 – абсолютно чорний піксель.
- 255 – абсолютно білий піксель.
- будь-яке значення між 0 і 255 – відтінок сірого.

Для зображень з глибшою розрядністю (наприклад, 16-бітні) інтенсивність пікселів може змінюватися в діапазоні 0 – 65535, де принцип залишається таким самим [8, 10].

Процес знаходження центра міни складається з кількох етапів. Перший – конвертація зображення у градації відтінку сірого. Оскільки кольорове зображення складається з трьох каналів (R – червоний, G – зелений, B – синій), для спрощення обчислень його перетворюють у відтінки сірого за формулою [5, 7, 8]

$$I_{gray}(x,y)=0.299R(x,y)+5.87G(x,y)+0.114B(x,y), \quad (1)$$

де $I_{gray}(x,y)$ – яскравість у відтінках сірого; $R(x,y)$, $G(x,y)$, $B(x,y)$ – значення кольорових каналів.

Використання вагових коефіцієнтів (0.299, 5.87, 0.114) зумовлене налаштованими алгоритмами комп'ютерного зору: найбільша чутливість припадає на зелений колір, а найменша – на синій [6, 7].

Після перетворення у градації сірого застосовується алгоритм Каннінга (Canny Edge Detection), який дозволяє чітко визначити контури міни [9, 10]

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}, \quad (2)$$

де G_x , G_y – градієнти яскравості вздовж осей координат.

Контури, отримані за допомогою цього методу, очищуються морфологічною обробкою (операція "закриття" – closing), що дозволяє уникнути розривів у контурах.

Геометричний центр об'єкта є ключовим параметром для точного вимірювання його положення у просторі. Визначення цієї точки дозволяє мінімізувати вплив зміни кутів знімання та деформацій об'єкта під час його руху. Для коректного визначення геометричного центра використовується аналіз контурів об'єкта, отриманих після обробки відеокадрів.

Один із надійних підходів полягає у визначенні центра мінімального обмежувального прямокутника (Bounding Box), який можна отримати за допомогою алгоритму мінімальної площі обгортки. Інший метод – знаходження центроїда форми міни через аналіз розподілу її контуру.

У випадках, коли краї об'єкта розмиті, визначення його центра може бути здійснене шляхом обчислення середньої координати точок контуру за формулою (3), де координати центра x_{center} та y_{center} визначаються як середнє арифметичне значення відповідних координат усіх точок контуру (рис. 1):

$$x_{centr} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad y_{centr} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (3)$$

де n – кількість точок контуру; x_i , y_i – координати кожної точки контуру.

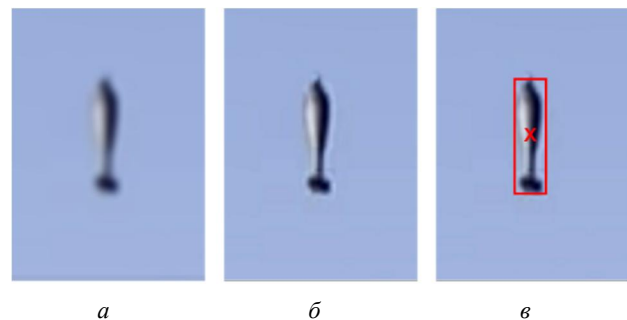


Рис. 1. Етапи обробки зображення мінометного боєприпасу:

- a – зображення перед обробкою нейромережі;
- b – оброблене нейромережею (виділення контуру);
- v – визначення центра боєприпасу

Такий підхід дозволяє зменшити похибки, спричинені спотворенням об'єкта внаслідок швидкості його руху або особливостей освітлення.

Після обробки розмитого зображення боєприпасу та визначення його геометричного центра стає

можливим точно виміряти відстань, яку міна подолала за певний проміжок часу. Для забезпечення коректних розрахунків необхідно враховувати масштабний коефіцієнт, що відображає співвідношення між піксельними та метричними величинами. Це дозволяє перевести координати, виміряні у пікселях, у метричну систему для досягнення високої точності обчислень.

Авторами запропоновано аналітичні вирази (4) та (5), які використовуються для визначення відстані у пікселях та її переведення у метричні одиниці.

$$d_{px} = \sqrt{(x_{2_center} - x_{1_center})^2 + (y_{2_center} - y_{1_center})^2} \cdot (4)$$

Для визначення фізичної відстані d_{cm} , яку пролетіла міна, можна скористатися наступним виразом

$$d_{cm} = d_{px} \cdot \frac{H_{cm}}{H_{px}}, \quad (5)$$

де H_{cm} – реальна висота міни (у сантиметрах); H_{px} – висота міни у пікселях на відеокадрі зображення.

Це рівняння дозволяє перетворити значення, отримані під час обробки зображення, на фізичні параметри. Використання цього підходу забезпечує масштабування вимірювань відповідно до реальних розмірів об'єкта, що дозволить отримати точні розрахунки початкової швидкості.

Часовий інтервал Δt між двома кадрами відео є важливим для розрахунку швидкості міни. Оскільки

$$v_0 = \frac{\sqrt{(x_{2_center} - x_{1_center})^2 + (y_{2_center} - y_{1_center})^2} \cdot \frac{H_{cm}}{H_{px}}}{\frac{N_2 - N_1}{f}} = \sqrt{(x_{2_center} - x_{1_center})^2 + (y_{2_center} - y_{1_center})^2} \cdot \frac{H_{cm} \cdot f}{H_{px} \cdot (N_2 - N_1)}. \quad (8)$$

Одним із ключових параметрів, що впливають на точність визначення швидкості мінометного боеприпасу, є частота кадрів відеозапису (рис. 2). Зі збільшенням частоти кадрів зменшується інтервал часу між кадрами, що підвищує точність вимірювання переміщення об'єкта в просторі [9].

На практиці, при недостатній частоті кадрів похибка визначення координат зростає, особливо при високих швидкостях руху боеприпасу. Це пов'язано з дискретністю зображення та можливою неточністю розпізнавання контурів при мінімальному зміщенні між кадрами.

Запропонований алгоритм розрахунку швидкості мінометного боеприпасу базується на методах комп'ютерного зору та інтерактивній взаємодії користувача з програмою. Він реалізує покадровий аналіз відео, дозволяючи ідентифікувати та відстежувати рух об'єкта в кадрах.

частота запису відео відома і залишається незмінною, цей інтервал можна легко визначити програмно. Його розрахунок здійснюється за такою формулою

$$\Delta t = \frac{N_2 - N_1}{f}, \quad (6)$$

де N_2, N_1 – номери двох послідовних кадрів, між якими визначається швидкість; f – частота кадрів відео (к/с – кадрів за секунду).

Оскільки відеокамери фіксують зображення з певною періодичністю, час між двома кадрами визначається як обернена величина частоти відеозапису. Наприклад, якщо відео записане з частотою 60 к/с, то часовий інтервал між двома суміжними кадрами становитиме

$$\Delta t = \frac{1}{60} = 0.166667 \text{ с}. \quad (7)$$

Таким чином, знаючи номер кадру та частоту відеозапису, а також відстань, яку пролетіла міна, можна точно визначити момент часу для кожного з кадрів та розрахувати швидкість міни у будь-який момент її руху.

За допомогою формул (4) – (7) авторами запропонована математична модель формула (8), яка дозволяє аналітично визначити відстань d_{cm} , часовий інтервал Δt та швидкість руху міни на основі обробки відеозапису. Ця математична модель враховує особливості масштабування, кінематичні параметри та частоту кадрів, що забезпечує високу точність розрахунків.

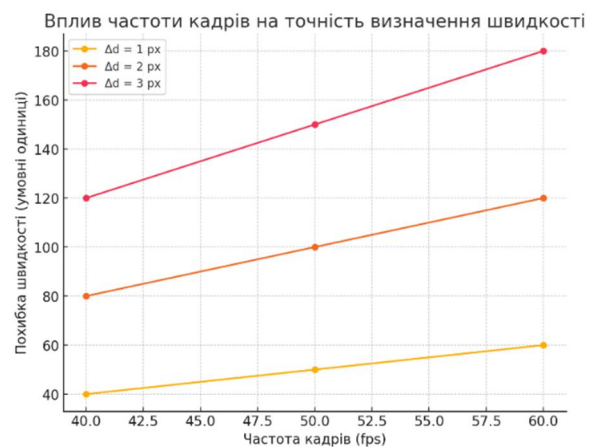


Рис. 2. Залежність похибки швидкості (Δv_0) від частоти кадрів (f) для різних значень похибки у вимірюванні відстані (Δd в пікселях)

Основні етапи алгоритму включають завантаження відеофайлу, ручну ініціалізацію ідентифікації об'єкта користувачем, сегментацію контуру міни та розрахунок її геометричного центра. На основі відомих розмірів об'єкта здійснюється масштабування координат із піксельної системи у метричну.

Після обробки координат та визначення часових міток між кадрами розраховується швидкість (формула 8). Результати візуалізуються у вигляді маркерів та підписів безпосередньо на відео. На рис. 3 наведено блок-схему алгоритму програми на мові Python.

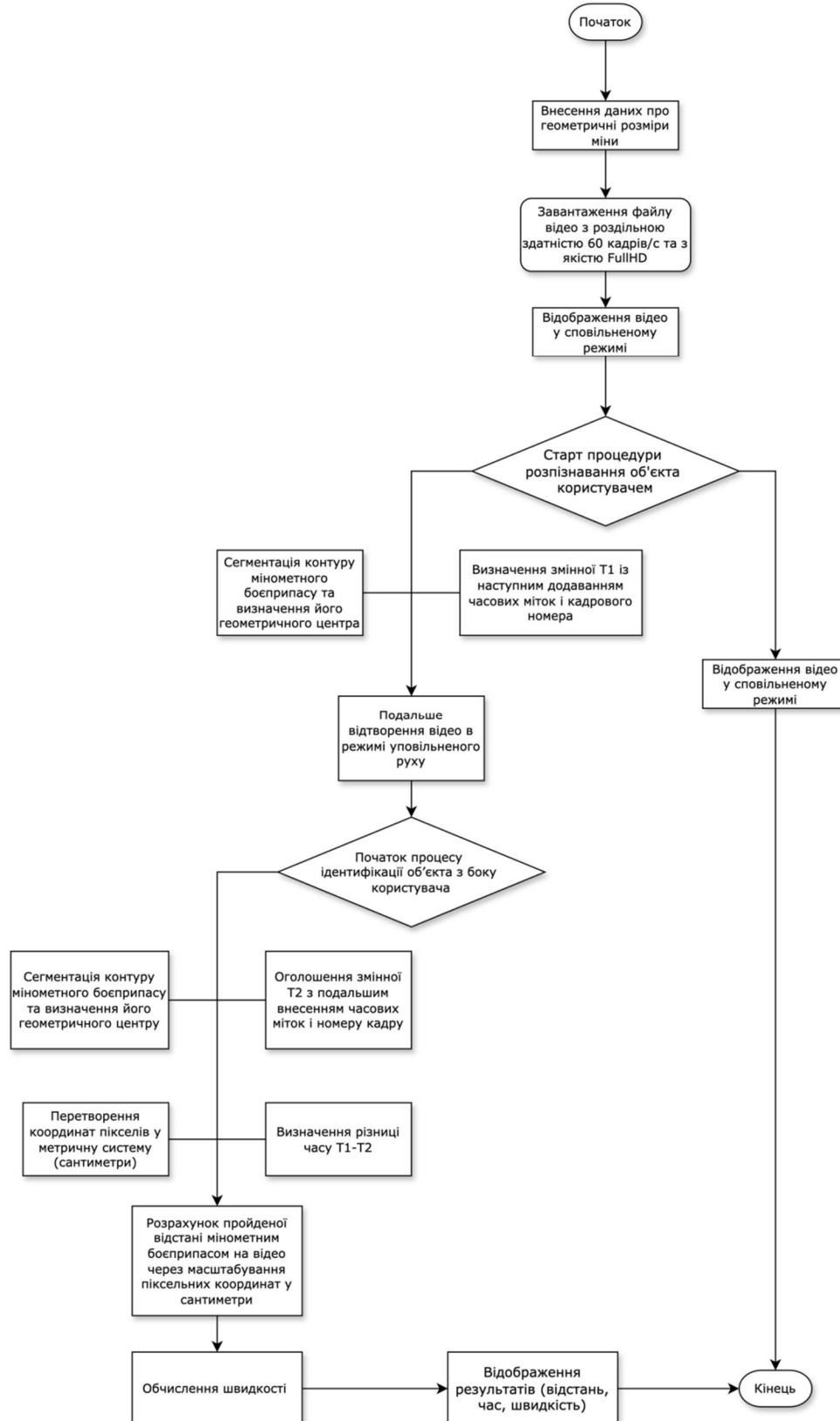


Рис. 3. Блок-схема алгоритму визначення швидкості мінометного боєприпасу

Розроблений алгоритм дозволяє з високою точністю визначати кінематичні параметри об'єкта на основі відеозапису. Основні переваги підходу – використання інтерактивного методу ідентифікації та мінімальна залежність від складних нейромережних моделей.

Під час проведення курсантами НСВА практичних стрільб з міномета 2С12 з міною калібром 120 мм здійснювалась експериментальна перевірка достовірності визначення початкової швидкості боєприпасу. З урахуванням відомого номера заряду кожного пострілу та координат розриву було аналітично визначено початкову швидкість міни з використанням балістичних розрахунків. Отримані дані були зіставлені з результатами, отриманими за допомогою розробленого алгоритму комп'ютерного зору та аналізу відеопотоку. Результати експерименту продемонстрували, що похибка у визначенні швидкості за цим методом не перевищує 10%, що вказує на високу достовірність і ефективність запропонованого підходу для практичного застосування у польових умовах.

Програма використовує бібліотеки OpenCV для обробки зображень, NumPy – для математичних обчислень та cv2 – для взаємодії з відеопотоком. Завдяки можливості покадрового аналізу користувач може ідентифікувати об'єкт вручну, що підвищує точність визначення координат навіть у складних умовах. Крім того, для автоматизованого відстеження об'єкта в кадрі використовується нейронна мережа крєкінгового типу Byte Track, яка забезпечує високу стабільність та точність трекінгу, навіть при частковому перекритті або швидкому русі об'єкта.

Цей підхід є ефективним із доступним способом розрахунку швидкості боєприпасів на основі відеоданих, що може застосовуватися в експериментальних дослідженнях та військових випробуваннях.

На рис. 4 зображено ключові етапи обробки: ідентифікація мінометного боєприпасу на двох послідовних кадрах, побудова вектора переміщення між ними та розрахунок швидкості. Значення швидкості відображається у верхньому лівому куті, тоді як інформація про номер кадру та часову позначку подається біля кожного положення міни.

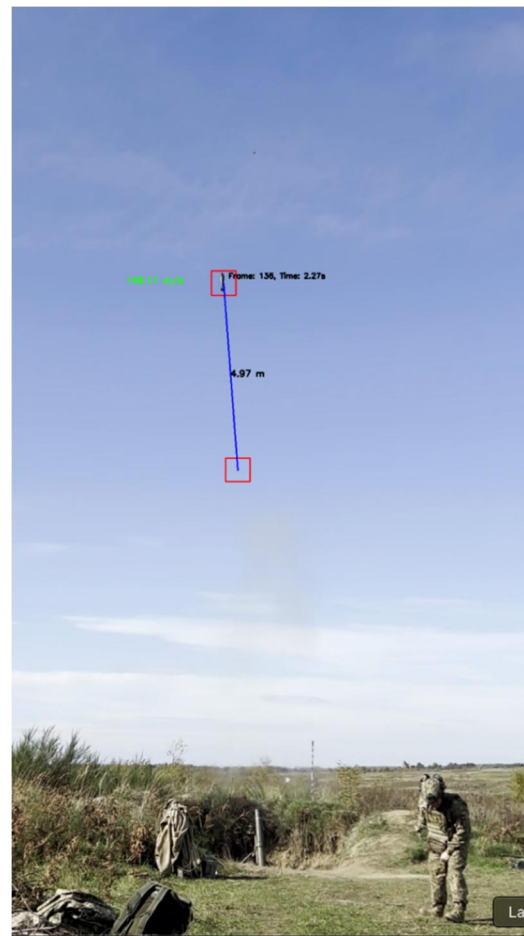


Рис. 4. Візуалізація методу визначення швидкості мінометного боєприпасу на основі комп'ютерного зору

Використаний метод дозволяє проводити вимірювання швидкості боєприпасів у польових умовах, не вимагаючи складного обладнання. Основними

факторами, що впливають на точність розрахунків, є частота кадрів відеозапису та якість ідентифікації об'єкта.

Обчислена швидкість становить 149.11 м/с, а переміщення між двома зафіксованими положеннями міни – 4.97 м. Ця технологія може бути використана для оцінки динамічних характеристик боєприпасів, а також для коригування вогню шляхом аналізу фактичної швидкості польоту снаряда.

Розроблений метод забезпечує швидке та точне визначення швидкості мінометного боєприпасу на основі аналізу відеозапису. Використання алгоритмів комп'ютерного зору дозволяє автоматизувати процес вимірювання, підвищуючи його ефективність у реальних бойових або випробувальних умовах. Отримані результати можуть бути використані як для наукових досліджень, так і для практичного застосування в артилерійських підрозділах з метою підвищення точності стрільби та коригування розрахунків балістичних характеристик.

Висновки

У статті авторами запропоновано альтернативний метод визначення швидкості мінометного боєприпасу, який базується на використанні комп'ютерного зору. Основна ідея полягає у тому, що відеозапис польоту міни, зроблений камерою сучасного смартфона з частотою не менше 60 кадрів за секунду, може бути оброблений методами комп'ютерного зору для точного визначення швидкості міни. Це усуває необхідність застосування дорогих спеціалізованих систем і дозволяє використовувати доступні мобільні пристрої, які вже є у розпорядженні військовослужбовців.

Розроблений алгоритм базується на ручній ідентифікації об'єкта користувачем, що підвищує точність обчислень у складних умовах. Аналіз відеокадрів дозволяє визначити положення міни у просторі, перевести координати з піксельної системи у метричну та обчислити швидкість на основі евклідової відстані між послідовними положеннями боєприпасу. Дослідження підтвердило, що використання високої частоти кадрів мінімізує похибку вимірювань і зменшує вплив шумів у відеопотоці.

Запропонований підхід має низку переваг, зокрема доступність, високу гнучкість і можливість застосування в польових умовах без необхідності використання дорогих спеціалізованих пристроїв. Впровадження таких рішень може значно покращити точність артилерійських розрахунків, що особливо важливо, використання боєприпасів і зарядів різних виробників та партій, внаслідок чого виникають відхилення від табличних характеристик, що може позначатися на точності вогневих завдань.

Отримані під час польових вимірювань результати, які представлені у статті, свідчать про перспективність використання цього методу для визначення швидкості мінометних боєприпасів у реальних бойових або випробувальних умовах. Подальші

дослідження можуть бути спрямовані на автоматизацію процесу виявлення боєприпасів та застосування машинного навчання для підвищення точності аналізу. Це відкриває перспективи для подальшого розвитку технологій обробки відео в артилерійських та випробувальних задачах.

Список літератури

1. Дарницький Ю.В., Ляшенко В.А., Швець С.І., Павлюк Т.В. Особливості застосування системи вимірювання дульної швидкості SL-520PE та доплерівської радарної системи MFTR-2100/40 під час проведення випробувань артилерійського озброєння. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. 2022. Вип. 2(12). С. 29–38. ISSN 2706-7386. DOI: 10.37701/dndivsovt.12.2022.04
2. Qin L., Yu N., Zhao D. Applying the convolutional neural network deep learning technology to behavioural recognition in intelligent video. *Tehnički vjesnik*, 2018. № 25 (6). pp. 1620–1627. DOI: 10.17559/TV-20171229024444
3. Кушнір Н.О., Локтікова Т.М., Морозов А.В., Юрченко В.О. Використання згорткових нейронних мереж у задачах розпізнавання та класифікації об'єктів зображень. *Технічна інженерія*, 2022. № 1(89). С. 93–100. DOI: 10.26642/ten-2022-1(89)-93-100
4. Kappeler A., Yoo S., Dai Q. Video Super-Resolution With Convolutional Neural Networks. *IEEE Transactions on Computational Imaging*. 2016. pp. 109–122.
5. Rebecq H., Ranftl R., Koltun V. High speed and high dynamic range video with an event camera. *IEEE Xplore*. 2019. pp. 10–36. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.07165>
6. Oh J., Guo X., Lee H., Lewis R.L., Singh S. Action-Conditional Video Prediction using Deep Networks in Atari Games. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2015. № 28. DOI: 10.48550/arXiv.1507.08750
7. Жеребух О., Фармага І. Використання нейронних мереж для визначення об'єктів на зображенні. *CDS*, 2024. № 6 (1), pp. 232–240. DOI: 10.23939/cds2024.01.232
8. Hanif M., Iqbal N., Rahman F.U., Khan M.A., Ghazal T.M., Abbas S., Ahmad M., Al Hamadi H., Yeun C.Y. A Novel Grayscale Image Encryption Scheme Based on the Block-Level Swapping of Pixels and the Chaotic System. *Sensors*, 2022. № 22 (16), 6243. DOI: 10.3390/s22166243
9. Nazarkevych M., Lytvyn V., Vysotska V. Method of recognition of moving objects based on the classification of Haar cascades. *Cybersecurity Education Science Technique*, 2024. № 2 (26), pp. 361–373. DOI: 10.28925/2663-4023. 2024. 26.698
10. Huang M., Liu Y., Yang Y. Edge detection of ore and rock on the surface of explosion pile based on improved Canny operator. *Alexandria Engineering Journal*. 2022. Vol. 61, Issue 12. pp. 10769–10777. DOI: 10.1016/j.aej. 2022.04.019

References

1. Darnytskyi Y.V., Lyashenko V.A., Shvets S.I. and Pavlyuk T.V. (2022), "Osoblyvosti zastosuvannya systemy vumiryuvanniadulnoi shvydkosti SL-520PE ta doplerivskoi radarnoi systemy MFTR-2100/40 pid chas provedennia vyprobuvan artyleriiskogo ozbroennia" [Features of the application of the SL-520PE muzzle velocity measurement system and the MFTR-2100/40 Doppler radar system during artillery weapons testing]. *Collection of Scientific Papers of the State Research Institute for Testing and Certification of Weapons and Military Equipment*. Issue 2 (12). pp. 29–38. ISSN 2706-7386. DOI: 10.37701/dndivsovt.12.2022.04 [in Ukrainian]
2. Qin L., Yu N. and Zhao D. (2018), Applying the convolutional neural network deep learning technology to behavioural recognition in intelligent video. *Tekhnichki vjesnik*, № 25 (6), pp. 1620-1627. DOI: 10.17559/TV-20171229024444
3. Kushnir N.O., Loktikova T.M., Morozov A.V. and Yurchenko V.O. (2022), "Vykorystannia zhortkovykh neironnykh merezh u zadachah rospiznavannia ta klasyfikacii obektiv zobrazen" [The use of convolutional neural networks in the tasks of object recognition and classification in images]. *Technical Engineering*, № 1(89), pp. 93–100. DOI: 10.26642/ten-2022-1(89)-93-100 [in Ukrainian]
4. Kappeler A., Yoo S. and Dai Q. (2016), Video Super-Resolution With Convolutional Neural Networks. *IEEE Transactions on Computational Imaging*. 2016. pp. 109–122.
5. Rebecq H., Ranftl R., Koltun V. (2019), High speed and high dynamic range video with an event camera. *IEEE Xplore*. pp. 10–36. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.07165>
6. Oh J., Guo X., Lee H., Lewis R.L. and Singh S. (2015), Action-Conditional Video Prediction using Deep Networks in Atari Games. *Advances in Neural Information Processing Systems*, № 28. DOI: 10.48550/arXiv.1507.08750
7. Zhrebukh O., Farmaga I. (2024), "Vykorystannia neirynnykh merezh dlya vyznachennia obektiv na zobrazenni" [The use of neural networks for object detection in images]. *CDS*. № 6 (1), pp. 232-240. DOI: 10.23939/cds2024.01.232 [in Ukrainian]
8. Hanif M., Iqbal N., Rahman F.U., Khan M.A., Ghazal T.M., Abbas S., Ahmad M., Al Hamadi H. and Yeun C.Y. (2022), A Novel Grayscale Image Encryption Scheme Based on the Block-Level Swapping of Pixels and the Chaotic System. *Sensors*, № 22 (16), 6243. DOI: 10.3390/s22166243
9. Nazarkevych M., Lytvyn V., and Vysotska V. (2024), Method of recognition of moving objects based on the classification of Haar cascades. *Cybersecurity Education Science Technique*, № 2 (26), pp. 361-373. DOI: 10.28925/2663-4023.2024.26.698
10. Huang M., Liu Y. and Yang Y. (2022), Edge detection of ore and rock on the surface of explosion pile based on improved Canny operator. *Alexandria Engineering Journal*. Vol. 61, Issue 12. pp. 10769–10777. DOI: 10.1016/j.aej.2022.04.019

METHOD FOR DETERMINING THE SPEED OF A MORTAR PROJECTILE BASED ON COMPUTER VISION

V. Hera, A. Bahan, O. Lavrut, K. Snitkov, O. Sivak

The study proposes a method for determining the speed of a mortar shell based on computer vision. The method relies on video recording of the mortar shell's flight at 60 frames per second and utilizes image analysis algorithms to identify the object, determine its spatial coordinates, and calculate its speed. The proposed approach does not require specialized equipment, as it uses only a modern smartphone camera. This makes it accessible for field applications without the need for complex technologies or expensive optical systems.

The algorithm involves user interaction with the program in a frame-by-frame mode to accurately determine the position of the mortar munition. By using scale conversion from pixel coordinates to the metric system, the program enables the calculation of the distance traveled between consecutive frames and the computation of the object's average speed. This process takes into account the timestamp of each frame, obtained based on the video recording frequency. Field measurements have shown that using video recordings at 60 frames per second provides optimal accuracy in determining the speed of a mortar munition's shot.

The advantages of the method are its accessibility and ease of implementation, allowing it to be used in field conditions without the need for complex hardware solutions. Unlike traditional radar systems or high-speed cameras, this method enables the acquisition of accurate kinematic parameters of the munition using only a mobile device and computer vision algorithms.

The obtained results confirm the effectiveness of the proposed method in real combat or testing conditions. The implementation of this technology will allow artillery units to more accurately assess the speed of munitions, which is crucial for calculating flight range and enhancing fire efficiency.

Future research prospects include automating the process of munition detection using artificial intelligence, which will reduce the influence of human factors on measurement accuracy. It is also possible to expand the method for analyzing other types of projectiles and fast-moving objects, making it versatile for both military and scientific applications.

Keywords: mortar projectile, speed determination, computer vision, video analysis, image processing, scale transformation, artillery calculations, trajectory tracking, frame-by-frame analysis, identification algorithms, military technology, kinematic parameters, neural networks, measurement automation, combat testing.