

Дослідження методу та засобу вимірювання швидкості руху снаряда в каналі ствола вогнепальної зброї

О.М. Крюков, В.Г. Мудрик, Р.О. Кайдалов, О.І. Біленко

Національна академія Національної гвардії України, м-н Захисників України, 3, 61001, Харків, Україна
mudrik.vad@gmail.com

Анотація

Важливу роль для фахівців при проектуванні, модернізації та оцінюванні технічного стану вогнепальної зброї та боєприпасів до неї має інформація про залежності тиску порохових газів або швидкості руху снаряда каналом ствола в функції часу (так звані балістичні елементи пострілу).

Відомі методи і засоби вимірювання тиску порохових газів у каналі ствола передбачають незворотне руйнування зразка зброї, а розповсюджені методи і відповідні їм засоби вимірювання швидкості руху снарядів добре адаптовані для проведення вимірювань лише за межами каналу ствола.

Одним з перспективних шляхів підвищення точності визначення балістичних елементів пострілу є реалізація вимірювання швидкості руху снаряда всередині каналу ствола.

Викладено принципи побудови засобу вимірювання швидкості руху снаряда на основі подвійного диференційного методу лазерної доплерівської анемометрії. Розглянуто зміст та порядок перетворення вимірювальної інформації, наведено алгоритм її оброблення. Проведено аналіз джерел виникнення похибок засобу вимірювання, отримано вирази для складових похибки, виконано їх кількісне оцінювання. Викладено опис макету для дослідження засобу вимірювання, наведено результати експериментальних досліджень з моделювання внутрішньобалістичного процесу, реєстрації та оброблення вимірювальної інформації.

Експериментальним шляхом підтверджено наявність стійкого вимірювального сигналу та можливість його реєстрації й оброблення в умовах проведення вимірювань, що є близькими до реальних. Результати досліджень можуть стати основою для створення зразка засобу вимірювання швидкості руху снаряда в каналі ствола.

Ключові слова: засіб вимірювання; снаряд; початкова швидкість; лазерна доплерівська анемометрія; балістичні елементи пострілу.

Отримано: 19.02.2020

Відредаговано: 01.04.2020

Схвалено до друку: 06.04.2020

Вступ

Важливу роль при оцінюванні технічного стану, а також проектуванні й модернізації стрілецької зброї та боєприпасів до неї відіграє інформація про балістичні елементи пострілу (БЕП), до яких відносяться залежності тиску $P(t)$ порохових газів та швидкості $V(t)$ снаряда в функції часу його руху каналом ствола протягом першого та другого періодів пострілу. Зокрема, дані про БЕП використовуються при проектуванні ствола, деталей вузла запирання, розрахунку кінематики і динаміки рухомих частин, при оцінюванні технічного стану каналів стволів та ін. [1–4].

Одним зі шляхів подальшого підвищення точності визначення балістичних елементів пострілу є реалізація вимірювання швидкості руху снаряда або тиску порохових газів [5]. Відомі методи і засо-

би вимірювання тиску передбачають врізання давача у ствол, що веде до незворотного руйнування зразка зброї [6]. На відміну від цього, вимірювання швидкості руху снаряда можливо реалізувати безконтактним способом, що є більш доцільним та перспективним.

Таким чином, обґрунтування шляхів реалізації неруйнівного вимірювання швидкості руху снаряда із заданою точністю є актуальним науковим завданням.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Розповсюджені методи і відповідні їм засоби вимірювання (ЗВ) швидкості руху снарядів (хронограф, оптичний та індукційний ЗВ тощо) передбачають проведення вимірювань лише за межами каналу ствола і не адаптовані для застосування

під час першого та другого періодів пострілу [7, 8]. Доплерівські ЗВ швидкості руху, які працюють у надвисокочастотному діапазоні радіохвиль, характеризуються низькою роздільною здатністю, що зумовлено порівняно великою довжиною хвилі та малим відношенням “сигнал/завада” за рахунок обмеженості частки потужності генератора, яка потрапляє до поверхні снаряда [9].

До відомих ЗВ можна також віднести лазерні доплерівські вимірювачі швидкості руху об'єктів [10]. Основним їх недоліком є неможливість реєстрації миттєвих значень швидкості, що змінюється у досить широкому діапазоні за дуже короткий проміжок часу. Відомі двопроменеві (диференційні) схеми лазерних ЗВ швидкості не дозволяють проводити вимірювання в каналах стволів, оскільки при просторовій неузгодженості лазерних променів на поверхні снаряда амплітуда корисного сигналу стрімко падає.

На цей час відсутні результати моделювання похибок та кількісного оцінювання метрологічних характеристик подібних ЗВ [11]. Крім того, не отримали достатнього розвитку алгоритмічні основи реєстрування та оброблення вимірювальної інформації, яка міститься у фотострумі з швидкозмінними параметрами спектру.

Тому розроблення теоретичних і прикладних основ вимірювання швидкості снаряда, що рухається безпосередньо в каналі ствола, є актуальним науковим завданням.

Мета та завдання дослідження

Метою роботи є викладення принципів побудови доплерівського ЗВ швидкості руху снаряда та результатів експериментального підтвердження наявності стійкого вимірювального сигналу і можливості його оброблення в умовах проведення вимірювань, що є близькими до реальних.

Для досягнення поставленої мети вирішувались такі завдання:

- обґрунтування методу вимірювання та принципів побудови ЗВ;
- обґрунтування способів та алгоритмічних основ оброблення вимірювальної інформації;

- аналіз джерел виникнення похибок, дослідження складових похибки ЗВ та їх кількісне оцінювання;

- експериментальне дослідження діючої макету ЗВ, апробація алгоритмічних основ оброблення вимірювальної інформації.

Метод вимірювання та принципи побудови ЗВ

В основу ЗВ швидкості руху снаряда в каналі ствола доцільно покласти оптичний диференційний доплерівський метод [10]. Він ґрунтується на відокремленні та реєструванні доплерівського зсуву частот між зондувальними хвилями когерентного лазерного випромінювання, які спрямовуються на снаряд під різними кутами нахилу. Для подолання обмежень, які пов'язані з малим відношенням “сигнал/завада” на виході вимірювального перетворювача, доцільно застосовувати світлоповертальне покриття на основі мікросклопризм або мікросклокульок, яке попередньо наноситься на оживальну поверхню снаряда. При цьому основна потужність відбитого випромінювання зосереджується в тілесному куті θ , що становить декілька одиниць градусів.

При застосуванні подвійного диференційного доплерівського методу (рис. 1) сумарне випромінювання, що надходить на фотоприймач, формується чотирма хвилями, кожен з яких отримано в результаті падіння випромінювання з напрямку A або B та їх розсіювання в цих самих напрямках. Хвилі, що розсіяні в напрямі спостереження, формують інтерференційну картину, яка несе інформацію про швидкість руху снаряда і сприймається фотоприймачем. При детектуванні ці хвилі формують електричний струм, сила якого пропорційна інтенсивності сумарного поля, відповідно до принципу суперпозиції електромагнітних коливань. Вираз для інтенсивності сумарного поля має декілька доданків, деякі з котрих відповідають виведенням гармонічним складовим (з нульовою частотою), а інші характеризуються нестійкою амплітудою (виникають на спектрограмі лише на незначних за протяжність ділянках руху снаряда). Виведення виразів для доплерівських частот вказа-

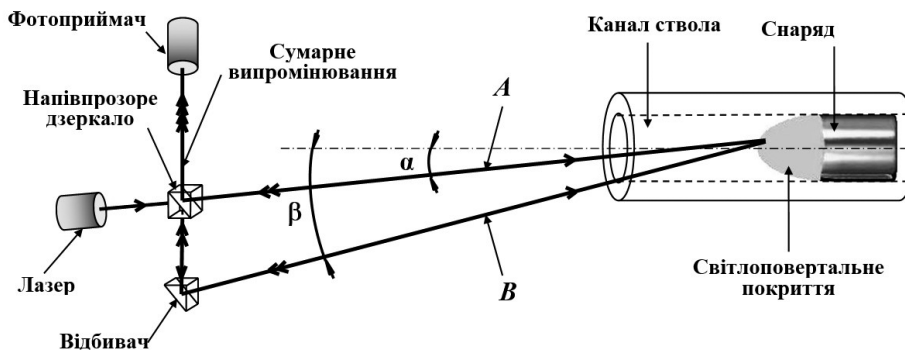


Рис. 1. Схема ЗВ на основі подвійного диференційного доплерівського методу

них складових детально відображене в роботі [10] і в межах статті не розглядається.

Таким чином, на спектрограмі вихідного струму фотоприймача з'являється лише одна складова частотою f , яка характеризується стійкістю незалежно від просторової неузгодженості променів на поверхні снаряда:

$$f = \frac{2F(\cos\alpha - \cos\beta)}{c} V = bV, \quad (1)$$

де: f – доплерівський зсув частоти; F – частота лазерного випромінювання; V – швидкість снаряда; α, β – кути зондування лазерними променями снаряда (рис. 1); c – швидкість світла;

$$b = \frac{2F(\cos\alpha - \cos\beta)}{c} - \text{коефіцієнт.}$$

Неперервна реєстрація різницевої частоти f за час, протягом якого триває постріл, дозволяє отримувати масиви миттєвих значень швидкості для подальшого їх оброблення з метою обчислення балістичних елементів пострілу.

Як видно з (1), частота змінної складової сили струму на виході фотодетектора залежить від α, β, V і, таким чином, може використовуватися для визначення миттєвих значень швидкості згідно з виразом

$$V = \frac{fc}{2F(\cos\alpha - \cos\beta)}. \quad (2)$$

Для різних зразків зброї параметри схеми ЗВ варіюються. Так, виходячи з умов забезпечення зондування поверхні снаряда від початкової точки його руху та виведення елементів оптичної схеми з траєкторії руху снаряда, кути зондування α, β залежно від калібру та довжини ствола перебувають у діапазоні значень $0,42^\circ \dots 0,65^\circ$ та $3,6^\circ \dots 4,9^\circ$ відповідно. При цьому коефіцієнт b становить від $\approx 110 \text{ м}^{-1}$ для зразків із довгим стволом до $\approx 6500 \text{ м}^{-1}$ для зразків із порівняно коротким стволом. Відповідно до цього верхня межа діапазону значень доплерівського зсуву частоти для типових зразків стрілецької зброї становить близько 2 МГц.

Структура ЗВ визначається поєднанням оптичної частини (яка забезпечує зондування поверхні снаряда та направлення відбитого випромінювання на фотоприймач), елементів, що забезпечують перетворення оптичного сигналу в електричний із потрібними параметрами (фотоприймач, узгоджувальний пристрій), аналого-цифрового перетворювача (який перетворює сигнал з виходу узгоджувального пристрою у масив миттєвих значень напруги) та обчислювального компонента (що являє собою комплекс апаратного і програмного забезпечення для оброблення і зберігання вимірювальної інформації). Викладені вище положення ілюструють сутність методу вимірювання та принципів побудови ЗВ.

Алгоритмічні основи оброблення вимірювальної інформації

Основний зміст перетворень вимірювальної інформації, які відбуваються в ЗВ, доцільно подати у вигляді структурно-алгоритмічної схеми (рис. 2), яка відображає взаємодію елементів, що реалізуються фізично, і блоків, які є фрагментами обчислювального компонента ЗВ.

Оптична частина забезпечує формування вхідного сигналу фотоприймача, спектр якого містить складову, що визначається виразом (1). В узгоджувальному пристрої створюється частотно-модульований сигнал

$$U(t) = U_m \sin((2\pi f(t)), \quad (3)$$

а також напруга фотоструму масштабується до границь діапазону перетворення аналого-цифрового перетворювача (АЦП):

$$U_k(t) = k \cdot U(t). \quad (4)$$

Згідно з попередніми оцінками інформативних параметрів сигналу, фотоприймач (фотоелектронний помножувач) повинен мати такі параметри: робочий діапазон довжин хвиль – не вужче 400–800 нм; час відгуку – не більше 1 нс; розмір чутливої області – 5–10 мм; типова квантова ефективність (при $\lambda=500$ нм) – не менше 10–15%. В АЦП у дискретні моменти часу формуються коди миттєвих значень напруги:

$$U_k(nT') = U_k(t) \Big|_{t=nT'}. \quad (5)$$

Вимога до максимальної частоти дискретизації АЦП визначається на підставі необхідності забезпечення реєстрації сигналів із граничною частотою 2 МГц, а для обмеження похибки квантування на рівні не більше 0,1% розрядність АЦП має становити не менше 10 біт.

Блок генерування таблиці миттєвих значень напруги на кожному n -му такті отримує від АЦП код значення напруги $U_k(nT')$ та заносить його до строки $U(n)$ таблиці. При цьому в реальному масштабі часу протягом пострілу потрібно вести лише неперервну реєстрацію значень напруги $U_k(nT')$. Подальше оброблення цього масиву значень для обчислення швидкості можливо реалізувати вже після отримання такої інформації як за допомогою спеціалізованого обчислювача, так і на окремій ПЕОМ.

У блоці фільтрування сигнал $U(n)$ піддається обробленню смуговим режекторним цифровим фільтром, який видаляє шум, викликаний завадами (зокрема, електричними мережами). Блок виокремлення ділянки сигналу зі значущими даними $U_2(m)$ виключає з подальшого оброблення

початкову та кінцеву частини сигналу $U_1(n)$, які не містять вимірювальну інформацію про швидкість руху снаряда.

Блок формування часових інтервалів виділяє G інтервалів відліків, що являють собою фрагменти сигналу в L довільних точках часу:

$$U_{3G} = U_2(m), m = \overline{m_{\text{поч}}, m_{\text{поч}} + M/L}. \quad (6)$$

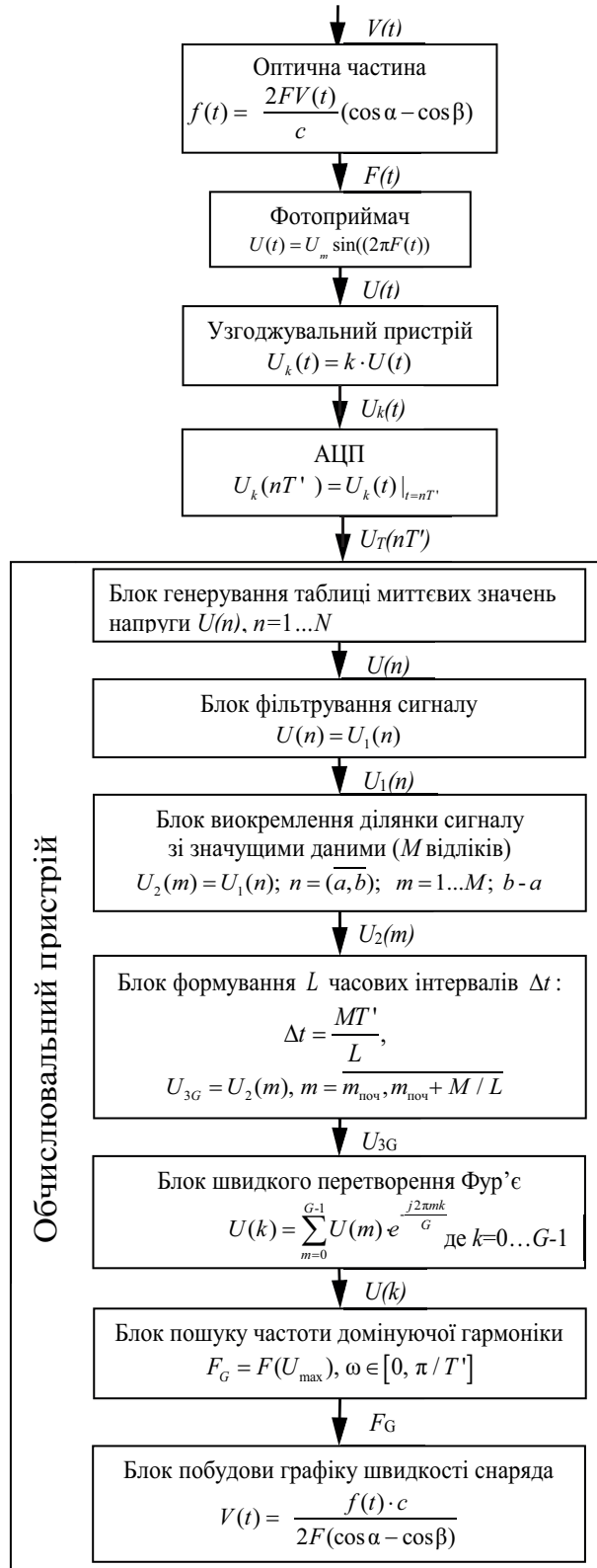


Рис. 2. Структурно-алгоритмічна схема ЗВ

Блок швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) здійснює оброблення кожного з L фрагментів сигналу для проведення їх спектрального аналізу:

$$U(k) = \sum_{m=0}^{G-1} U(m) \cdot e^{-\frac{j2\pi mk}{G}}. \quad (7)$$

Незважаючи на певні обмеження щодо мінімальної швидкодії обчислювального пристрою для реалізації алгоритму ШПФ, це питання залишено за межами роботи, оскільки надалі авторами віддано перевагу варіанту реалізації обчислювального пристрою не в реальному масштабі часу, а на базі ПЕОМ, тобто вже після реєстрування вихідної напруги фотоприймача.

Блок пошуку частоти домінуючої гармоніки FG для кожного із зазначених L фрагментів сигналу відшукує гармонічну складову, яка має найбільшу серед інших амплітуду, а надалі визначає частоту $F(U_{\text{max}})$ цієї складової. У блоці побудови графіку швидкості снаряда для кожного з L фрагментів сигналу розраховується швидкість снаряда згідно з (2).

Математичне моделювання та кількісне оцінювання складових похибки ЗВ

Виникнення похибки ЗВ обумовлюється відхиленням параметрів оптичної схеми від їх розрахункових (номінальних) значень, недосконалістю реалізації алгоритму ШПФ, а також наявністю обертого руху снаряда в каналі ствола.

За технологічних або експлуатаційних причин параметри оптичної схеми ЗВ (частота лазерного випромінювання F , кути зондування α та β) можуть набувати приростів ΔF , $\Delta \alpha$, $\Delta \beta$, що вестиме до змінювання доплерівського зсуву частот і появи складових похибки.

Оскільки частота лазерного випромінювання входить до залежності (1), як співмножник у першому ступені, відносна похибка δ_F за рахунок відхилення частоти лазерного випромінювання, визначатиметься виразом

$$\delta_F = \Delta F / F. \quad (8)$$

Використовуючи тригонометричні перетворення, можна отримати вирази і для складових інструментальної похибки δ_α , δ_β , зумовлених відхиленням кутів зондування:

$$\delta_\alpha = \frac{\Delta F_\alpha}{F} = -\frac{\sin \alpha \Delta \alpha}{\cos \alpha - \cos \beta},$$

$$\delta_\beta = \frac{\Delta F_\beta}{F} = \frac{\sin \beta \Delta \beta}{\cos \alpha - \cos \beta}. \quad (9)$$

Кількісне оцінювання цих складових здійснювалося на підставі відомостей про межі допустимих абсолютних похибок приладів для визначення довжини хвилі випромінювання (зокрема, прилад

SHR [12]) та гоніометрів-спектрометрів для вимірювання кутів зондування (ГС-1Л [13] та ін.). У найгіршому випадку δ_α не перевищує 0,15%, а $\delta_\beta = 0,20\%$. Складова δ_f за будь-яких сполучень параметрів ЗВ не перевищує 0,001%, тобто є нехтовно малою.

Обчислювальний компонент характеризується похибкою, яка зумовлена недосконалістю алгоритму, що здійснює спектральний аналіз фрагментів сигналу на основі ШПФ. Моделювання такої похибки здійснювалося за допомогою чисельного експерименту на ЕОМ, у ході якого синтезувався сигнал із поліноміальною частотною модуляцією (ПЧМ) з доданими до нього завадами, та реалізувався алгоритм ШПФ.

Нормований ПЧМ-сигнал з нульовою початковою фазою має вигляд

$$y = \sin \left[\left(\sum_{i=0}^m a_i \cdot t^i \right) \cdot t \right]. \quad (10)$$

На практиці вимірювальний сигнал спотворюється тепловим рухом заряджених часток у фотоприймачі та провідниках, зовнішніми завадами, нестабільністю напруги електроживлення тощо. Тому до ПЧМ сигналу (10) доцільно ввести флуктуаційний шум y_ϕ та полігармонічну заваду y_3 :

$$y_3 = \sum_{i=1}^l K_i \sin(\omega_i t), \quad (11)$$

де K_i – рівень i -ї гармоніки; ω_i – кругова частота i -ї гармоніки.

Отже, в ході чисельного експерименту створюється та реєструється у строках таблиці (y_n, t_n) сигнал

$$y_{\text{заг}} = y + y_3 + y_\phi. \quad (12)$$

Рівні y_ϕ та y_3 при моделюванні впливу завад відповідали характерним значенням цих величин, що були зареєстровані у вимірювальному тракті за відсутності оптичного сигналу на вході фотоприймача, і становили близько 25% та 35% відповідно від рівня корисного ПЧМ сигналу.

На наступному етапі на ділянках ПЧМ сигналу відшукувалися частоти домінуючої гармоніки спотвореного сигналу, здійснювалося їх порівняння з розрахунковими значеннями частоти та обчислювалася відносна похибка $\delta_{ок}$.

Моделювання похибки обчислювального компонента, яке проводилося для найбільш характерних сполучень вихідних даних, показало, що $\delta_{ок}$ перебуває в інтервалі значень $\pm(0,15...0,4)\%$.

Обертальний рух снаряда в каналі ствола зумовлюється наявністю в ньому нарізів. Розглядалися нарізи постійного нахилу (крутизни), які характеризуються довжиною їх ходу η [1]. У реальних умовах точка зондування снаряда лазерними променями не знаходиться в площині зондуван-

ня, а зміщується в поперечному напрямку на відстань r (рис. 3). При цьому розташування векторів швидкості \vec{V} поступального руху точки зондування та швидкості $\vec{V}_{об}$ цієї ж точки, що зумовлена обертанням із кутовою швидкістю ω , проілюстроване на рис. 3.

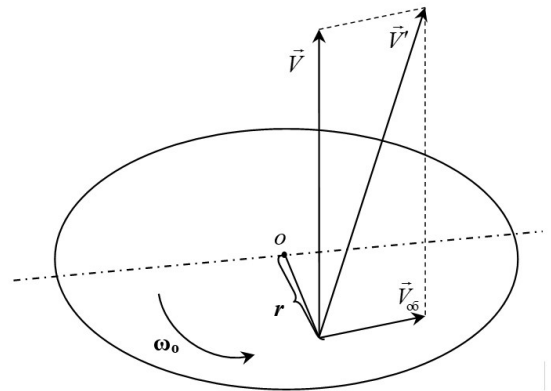


Рис. 3. Розташування векторів \vec{V} , $\vec{V}_{об}$, \vec{V}' у просторі

Сума \vec{V}' цих векторів є вектором реальної швидкості руху точки:

$$V' = \sqrt{(\omega_{об} \cdot r)^2 + V^2}. \quad (13)$$

Оскільки вектор \vec{V}' відхиляється від вектора \vec{V} , кути спрямування лазерних променів отримують приріст ϕ , тобто становитимуть $\alpha'' = \alpha + \phi$, $\beta'' = \beta + \phi$.

На підставі того, що снаряд при проходженні шляху, який відповідає довжині ходу нарізів η , здійснює один оберт (кут обертання становить 2π), зв'язок між кутом обертання снаряда та шляхом матиме вигляд

$$\phi = \frac{2\pi l}{\eta}. \quad (14)$$

Диференціюючи (14) за часом, отримаємо

$$\omega_{об} = \frac{2\pi V}{\eta}. \quad (15)$$

Скористаємося формулами тригонометричних перетворень та, відкидаючи нехтовно малі величини, отримаємо вираз для відносної похибки $\delta_{об}$ ЗВ за рахунок обертання снаряда:

$$\delta_{об} = 2 \left(\frac{\pi \cdot r}{\eta} \right)^2. \quad (16)$$

Кількісне оцінювання складової $\delta_{об}$ свідчить, що похибка за рахунок обертання снаряда знаходиться в діапазоні 0,01...0,05%.

Із отриманих розрахунків видно, що найбільший вплив на інструментальну похибку чинять складові за рахунок визначення кутів зондування та недосконалість алгоритму ШПФ, який реалізовано в обчислювальному компоненті. Цим виснов-

ком визначаються і напрями подальшого підвищення точності вимірювань.

Експериментальна апробація методу вимірювання та алгоритмічних основ оброблення вимірювальної інформації

Для апробації методу вимірювання створено експериментальну установку (ЕУ), яка складається з оптичної, механічної та електронної частин.

До оптичної частини ЕУ поряд із джерелами лазерного випромінювання двох видів (із довжиною хвилі 532 та 650 нм) включено елементи, які забезпечують заданий хід променів: оптичний коліматор, оптичний відбивач, світлоподільна призма, система дзеркал.

Механічна частина ЕУ дозволила імітувати рух снаряда в каналі ствола. Для приведення снаряда в рух використано стиснене повітря, яке подається до ствола через електромагнітний клапан із можливістю змінювання максимальної швидкості руху шляхом варіювання тиску повітря. На торцеву поверхню снаряда, виконаного у вигляді легкосплавного поршня, попередньо нанесено світлоповертальне покриття. Електронна частина експериментальної установки містить фотоприй-

мач, блок електроживлення та управління, а також цифровий осцилограф. За допомогою блоку управління здійснюється одночасне відкривання електромагнітного клапана та запуск розгортки цифрового осцилографа, при цьому починається реєстрація сигналу.

Перевагу застосуванню цифрового осцилографа було віддано на підставі зручностей налаштування робочого режиму та реєстрації вхідного сигналу. До того ж це дозволило поєднати блок узгоджувального пристрою, АЦП та блок генерування таблиці миттєвих значень напруги в одному пристрої.

За ходом експерименту варіювалися частота F лазерного випромінювання, кут спрямування зондувального променя α , а також тиск повітря. Це дало змогу реалізувати різні закони наростання швидкості снаряда, а також здійснити апробацію методу вимірювання й алгоритмічних основ оброблення вимірювального сигналу для різних сполучень вихідних даних.

Попередні (необроблені) результати експерименту зареєстровані у вигляді дискретних значень напруги фотоструму на виході фотоприймача у відповідні моменти часу. Оброблення вимірювальної інформації згідно з розглянутими вище алгорит-

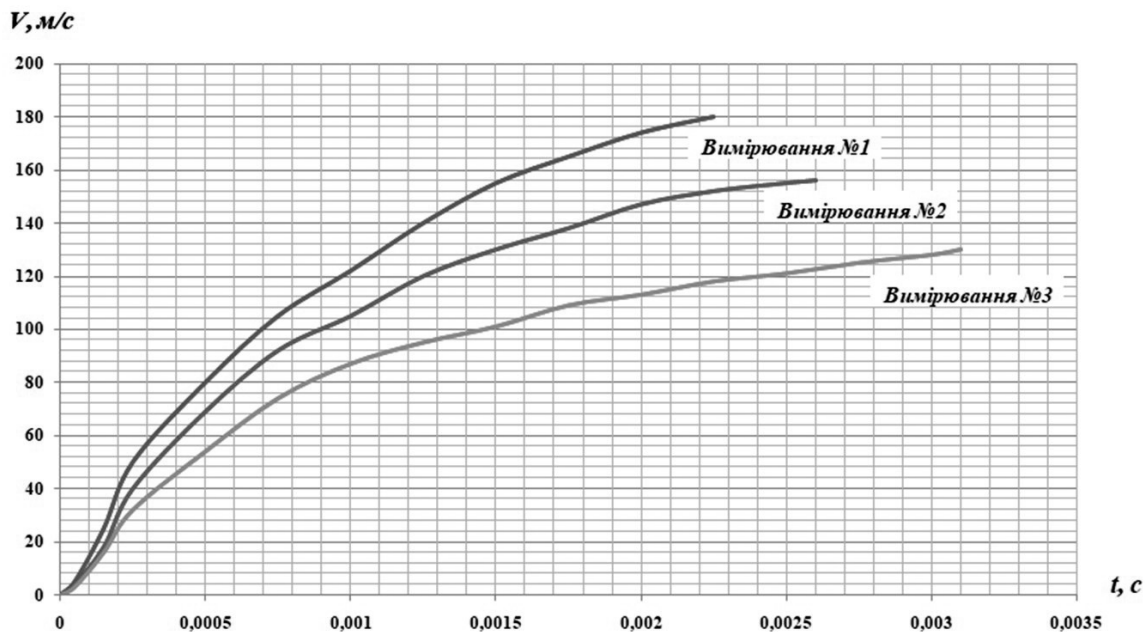


Рис. 4. Графіки залежності швидкості руху снаряда в каналі ствола від часу

мічними основами дозволило отримати серію кривих $V(t)$, приклади яких наведено на рис. 4.

За результатами експериментальних досліджень можна стверджувати:

- при реалізації розглянутого методу та схеми вимірювання спостерігається стійкий вимірювальний сигнал і забезпечується можливість його реєстрації;

- вигляд кривих для доплерівського зсуву частот відповідає реальній динаміці зростання швидкості руху еквіваленту снаряда в експериментальній установці;

- просторова неузгодженість зондувальних променів на поверхні снаряда не веде до ускладнення ідентифікації відповідної гармоніки доплерівського зсуву частоти.

Висновки

Розглянуто принципи побудови ЗВ швидкості руху снаряда в каналі ствола. Наведено алгоритмічні основи оброблення вимірювальної інформації, виконано аналіз джерел виникнення похибок ЗВ, а також кількісне оцінювання відповідних складових. Створено експериментальну установку та викладено результати моделювання процесу пострілу, реєстрації й оброблення вимірювальної інформації.

Результати досліджень можуть стати основою для створення дослідного зразка ЗВ швидкості руху снаряда в каналі ствола, який дозволить визначати БЕП за умови забезпечення зростаючих вимог до точності їх отримання.

Подальші дослідження в цьому напрямі можуть бути спрямовані на обґрунтування методів обмеження похибки ЗВ, а також розроблення теоретичних і прикладних основ його метрологічного забезпечення.

Исследование метода и средства измерения скорости движения снаряда в канале ствола огнестрельного оружия

А.М. Крюков, В.Г. Мудрик, Р.О. Кайдалов, А.И. Биленко

Національна академія Національної гвардії України, пл. Захитників України, 3, 61001, Харків, Україна
mudrik.vad@gmail.com

Аннотация

Одним из перспективных путей повышения точности определения баллистических элементов выстрела является реализация измерения мгновенных значений скорости движения снаряда в течение начальных периодов выстрела.

Изложены принципы построения средства измерения скорости движения снаряда на основе двойного дифференциального метода лазерной доплеровской анемометрии. Рассмотрен порядок и особенности преобразования измерительной информации, приведен алгоритм ее обработки. Проведен анализ источников возникновения ошибок средства измерения, получены выражения для составляющих погрешности, выполнено их количественное оценивание. Приведены результаты экспериментальных исследований по моделированию процесса выстрела, регистрации и обработки измерительной информации.

Практически подтверждено наличие устойчивого измерительного сигнала и возможность его регистрации и обработки в условиях проведения измерений, близких к реальным. Результаты исследований могут стать основой для создания опытного образца средства измерения скорости движения снаряда в канале ствола.

Ключевые слова: средство измерения; снаряд; начальная скорость; лазерная доплеровская анемометрия; баллистические элементы выстрела.

Research of the method and instrument of measuring the velocity of a projectile in a barrel of a firearm

O. Kriukov, V. Mudryk, R. Kaidalov, O. Bilenko

The National Academy of the National Guard of Ukraine, Zakhysnykiv Ukrainy square, 3, 61001, Kharkiv, Ukraine
mudrik.vad@gmail.com

Abstract

The information about the dependence of the powder pressure or the velocity of the projectile in the barrel in a function of time (the so-called ballistic elements of the shot) plays an important role for specialists in the design, modernization and assessment of the state of small arms and ammunition.

Known methods and instruments of measuring the powder pressure in the barrel when firing include irreversible destruction of the sample of a weapon, and the common methods and related instruments of measuring the velocity of projectiles are well adapted to take measurements only outside the barrel.

One of the promising ways to increase the accuracy of determining the ballistic elements of a shot is to measure the instantaneous values of the velocity of the projectile during the initial periods of the shot, in particular, inside the barrel.

The paper describes the principles of construction of the instruments of measuring the instantaneous velocity values of the projectile on the basis of the double differential method of laser Doppler anemometry. The order and peculiarities of transformation of measuring information are considered, the algorithm of its processing is given. The sources of errors of the instruments of measuring are analyzed, the expressions for the components of the error are obtained, their quantitative evaluation is performed. The description of the experimental unit for the study of the instruments of measuring is presented, the results of the experimental researches on the modelling of the process of shooting and registration and processing of the measuring information are given.

The presence of a stable measuring signal and the possibility of its registration and processing in the conditions of measurements close to real are practically confirmed. The results of the studies can become the basis for the creation of a prototype of the instruments of measuring the velocity of the projectile in the barrel.

Keywords: measuring instrument; projectile; muzzle velocity; laser Doppler anemometry; ballistic elements of the shot.

Список літератури

1. Carlucci D.E., Jacobson S.S. *Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition*. CRC Press Taylor & Francis Group, 2008. 502 p.
2. Longbridge J.A. *Internal ballistics*. Forgotten books, 2017. 284 p.
3. Крюков О.М., Мельніков Р.С., Біленко О.І., Зозуля А.В. та співавт. Моделювання процесу пострілу на основі чисельного розв'язання рівнянь внутрішньої балістики. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2019. Вип. 1. № 5(97). С. 40–46. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.155357>
4. Беневоольский С.В. *Баллистика*. Пенза, 2005. 510 с.
5. Крюков О.М., Александров О.А. Шляхи підвищення точності моделювання внутрішньобалістичних процесів. *Зб. наук. праць Національної академії Національної гвардії України*. 2009. Вип. 1. С. 11–14. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpavs_2009_1_4
6. Медведева Н.П. *Экспериментальная баллистика. Методы измерения давления*. Томск, 2006. 148 с.
7. Михайлов К.В. *Экспериментальная баллистика. Приборы и методы баллистических измерений*. София: ВТС, 1976. 388 с.
8. Strba J. *Stanovenie priebehu odporového tlaku proti pohybu strely v hlavni zbraňového systému*. Disertacni prace. Univerzita Pardubice, 2011. URL: <http://hdl.handle.net/10195/45797>
9. Reinhard Boschanig, Dr. Bernhard Zagar Inc. (1993). *Method and device for the determination of parameters of motion*. Patent 0415906 Germany, МКІ [IPC] G 01 S 13/58; G 01 P 3/66.

10. Доля Г.Н., Крюков А.М., Мудрик В.Г. Дифференциальная лазерная доплеровская анемометрия объектов со световозвращающей поверхностью. *Прикладная радиоэлектроника*. 2013. Т. 12. № 3. С. 436–441.
11. Крюков О.М., Александров О.А. Проблеми вимірювального контролю параметрів внутрішньобалістичних процесів. *Честь і закон*. 2009. № 2. С. 79–89.
12. Григорьев В.В., Лазарев В.А., Митюрёв А.К., Неверова Н.А., Пнев А.Б. Быстродействующий измеритель длины волны лазерного излучения для волоконно-оптических систем передачи информации. Пат. 2425338 RU, МКИ G 01 J 9/02, G 01 B 9/02/; правообладатель ООО “Телеком-прибор”; заявл. 17.08.2009; опубл. 27.07.2011. 12 с.
13. Марков Н.Н., Ганевский Г.М. *Конструкция, расчет и эксплуатация контрольно-измерительных инструментов и приборов*. Москва: Машиностроение, 1993. 416 с.

References

1. Carlucci D.E., Jacobson S.S. *Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition*. CRC Press Taylor & Francis Group, 2008. 502 p.
2. Longbridge J.A. *Internal ballistics*. Forgotten books, 2017. 284 p.
3. Kriukov O.M., Melnikov R.S., Bilenko O.I., Zozulia A.V., Herasimov S.V., Borysenko M.V. et al. *Modeliuvannia protsesu postrilu na osnovi chyselnoho rozv'iazannia rivnian vnutrishnoi balistyky [Modeling of the process of the shot based on the numerical solution of the equations of internal ballistics]*. *Eastern-European Journal of Enterprise*

- Technologies*, 2019, vol. 1, no. 5(97), pp. 40–46 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.155357>
4. Benevolskyi S.V. Ballystyka [Ballistics]. Penza, 2005. 510 p. (in Russian).
 5. Kriukov O.M., Aleksandrov O.A. Shliakhy pidvyshchennia tochnosti modeliuвання vnutrishnobalistychnykh protsesiv [Ways to improve the accuracy of modeling of intra-ballistic processes]. *Collection of Scientific Papers of the Academy of Internal Troops of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine*, 2009, vol. 1, pp. 11–14 (in Ukrainian). Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpavs_2009_1_4
 6. Medvedeva N.P. Eksperimentalnaya ballistika. Metodyi izmereniya davleniya [Experimental ballistics. Methods for pressure measurements]. Tomsk, 2006. 148 p. (in Russian).
 7. Mihaylov K.V. Eksperimentalnaya ballistika. Priboryi i metodyi ballisticheskikh izmereniy [Experimental ballistics. Instruments and methods for ballistic measurements]. Sofia, VTS Publ., 1976. 388 p. (in Russian).
 8. Strba J. Stanovenie priebehu odporového tlaku proti pohybu strely v hlavni zbraňového systému. Disertacni prace. [Pressure determination in the weapons barrel when the projectile moves. Dissertation]. Pardubice University, 2011 (in Czech). Available at: <http://hdl.handle.net/10195/45797>
 9. Reinhard Boschanig, Dr. Bernhard Zagar Inc. (1993). Method and device for the determination of parameters of motion. Patent 0415906 Germany, MKI [IPC] G 01 S 13/58; G 01 P 3/66.
 10. Dolya G.N., Kriukov A.M., Mudrik V.G. Differentsialnaya lazernaya doplerovskaya anemometriya ob'ektov so svetovozvrashchayushey poverhnostyu [Differential laser Doppler anemometry of objects with a retroreflective surface]. *Applied Radio Electronics*, 2013, vol. 12(3), pp. 436–441 (in Russian).
 11. Kriukov O.M., Aleksandrov O.A. Problemy vymiriuvannoho kontroliu parametriv vnutrishnobalistychnykh protsesiv [Problems of measuring control of parameters of intra-ballistic processes]. *Chest i zakon – Honor and Law*, 2009, no. 2, pp. 79–89 (in Ukrainian).
 12. Grigorev V.V., Lazarev V.A., Mityurev A.K., Neverova N.A., Pnev A.B. (2011). Byistrodeystvuyushiy izmeritel dlinyi volnyi lazernogo izlucheniya dlya volokonno-opticheskikh sistem peredachi informatsii [High-Speed Laser Wavelength Meter for Fiber Optic Information Transmission Systems]. Patent 2425338 RU, MKI [IPC] G 01 J 9/02, G 01 B 9/02 (in Russian).
 13. Markov N.N., Ganevskiy G.M. Konstruktsiya, raschet i ekspluatatsiya kontrolno-izmeritelnykh instrumentov i priborov [Design, calculation and operation of instrumentation and instruments]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993. 416 p. (in Russian).