

*Вимірюйте
усе доступне вимірюванню
й робіть недоступне вимірюванню
доступним.*

Галілео Галілей

Метрологія



та прилади

№ 1 (57), 2016

Науково-виробничий журнал

Засновники:

Академія метрології України,
Харківський національний
університет радіоелектроніки (ХНУРЕ),
ТОВ виробничо-комерційна
фірма «Фавор ЛТД»

Видається з березня 2006 року
Рік випуску десятий
Передплатний індекс 92386

Редакційна колегія:

Большаков В. Б., д. т. н., с. н. с.
Варша З., д. т. н., Польща
Величко О. М., д. т. н., проф.
Віткін Л. М., д. т. н., проф.
Володарський Є. Т., д. т. н., проф.
Гінзбург М. Д., д. т. н., проф.
Грищенко Т. Г., д. т. н., с. н. с.
Гудрун В., д. т. н., Німеччина
Жагора М. А., д. т. н., проф., Білорусь
Захаров І. П., д. т. н., проф.
Зенкін А. С., д. т. н., проф.
Коломієць Л. В., д. т. н., проф.
Косач Н. І., д. т. н., проф.
Копєва Л. О., д. т. н., проф.
Крюков О. М., д. т. н., проф.
Кузьменко Ю. В.
Кухарчук В. В., д. т. н., проф.
Мачехін Ю. П., д. т. н., проф.
Назаренко Л. А., д. т. н., проф.
Несмаков П. І., д. т. н. доц.
Петришин І. С., д. т. н., проф.
Пістун Є. П., д. т. н., проф.
Радєв Х., д. т. н., проф., Болгарія
Рожнов М. С., к. х. н., с. н. с.
Руженцев І. В., д. т. н., проф.
Скубіс Т., д. т. н., проф., Польща
Столярчук П. Г., д. т. н., проф.
Сурду М. М., д. т. н., проф.
Туз Ю. М., д. т. н., проф.
Хакімов О., д. т. н., проф., Узбекистан
Чалий В. П., к. т. н., с. н. с.
Черепков С. Т., к. т. н. доц.
Чуновкіна А. Г., д. т. н., Росія

Редакційна група:

Головний редактор Фісун В. П.
Науковий редактор — відповідальний
секретар Винокуров Л. І.
Дизайнер-верстальник Зайцев Ю. О.

Журнал рекомендовано до друку
вченою радою ХНУРЕ
(протокол №3 від 19.02.2016)

Адреса редакції:

61002, Харків,
вул. Мירוносицька, 46а, оф. 1;
Тел.: (057) 752-00-89, (095) 00-68-665
E-mail: metrolog-prylady@ukr.net
http://www.amu.in.ua/journal1

Видавець та виготовлювач:

ВКФ «Фавор ЛТД»
61140, Харків, пр-т. Гагаріна, 94-А, кв. 35;
Свідоцтво про внесення
до Держреєстру видавців,
виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції
серія ХК № 90 від 17.12.2003.

Підписано до друку 04.03.2016.
Формат 60×84/8. Папір крейдований.
Ум. друк. арк. 8,43. Обл.-вид. арк. 7,13.
Друк офсетний. Тираж 400 прим.
Замовлення № 5.

© «Метрологія та прилади», 2015

Журнал зареєстровано
у Державній реєстраційній
службі України, свідоцтво серія
КВ № 20033-8933ПР від 17.05.2013;
включено до Переліку наукових
фахових видань України, наказ
Міністерства освіти і науки України
№ 747 від 13.07.2015

Журнал включено до Міжнародної
наукометричної бази даних
Index Copernicus, лист від 08.03.2013

*Початок весни, довгоочікуване тепло, внутрішній спокій
і впевненість у тому, що все буде добре, завжди асоціюють-
ся зі щасливою родиною, затишком у своїй оселі, які, у першу чер-
гу, створюються жінками. І те, що саме в перші весняні дні від-
значається свято жінок — Міжнародний день 8 березня, глибоко
символічно.*

*Це свято — данина безмежної вдячності людства жін-
кам за їхню визначну роль у забезпеченні його життєздатнос-
ті, стабільності й розвитку цілих країн і народів протягом
тисячоліть.*

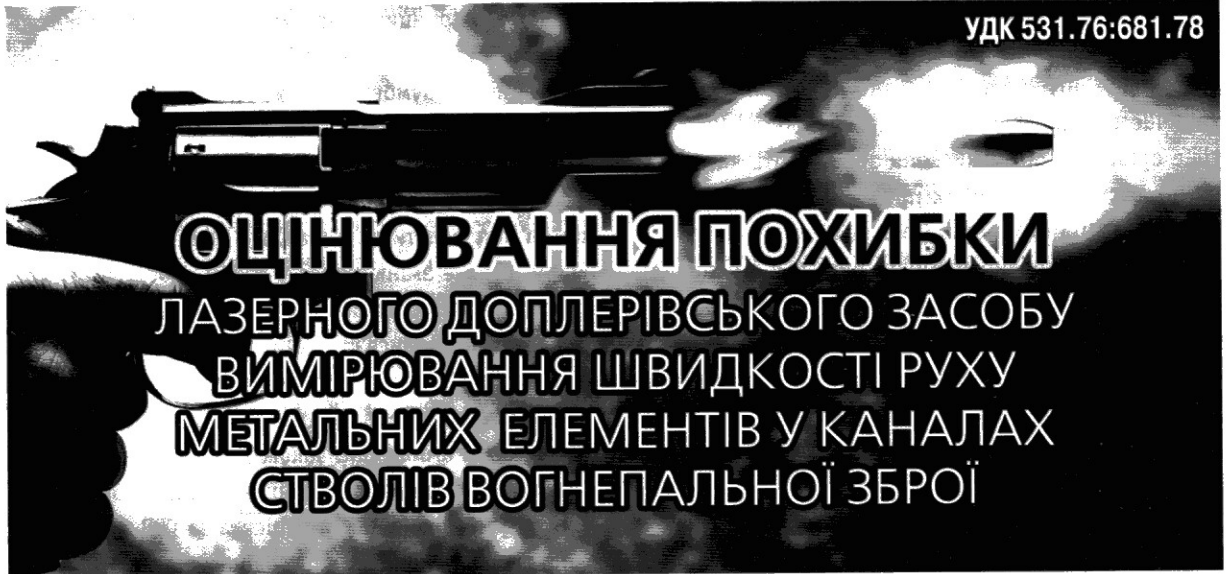
*Яскравий приклад у цьому плані — українки: і в часи перших
поселень; і Київської Русі; і козацької України; і світових і гро-
мадянської воєн; і боротьби за незалежність України; і наявної
російської агресії й окупації частини території нашої держави.
Події останніх двох років, які особливо близькі всім нам, у черго-
вий раз засвідчили патріотизм і самовідданість жінок України.
Вони віддали на захист Батьківщини найдорожче — своїх синів,
чоловіків, батьків, братів; замінили їх на промислових і сіль-
ськогосподарських підприємствах; розгорнули для допомоги
воїнам широкий волонтерський рух; добровольцями вступали
до українського війська. І це значною мірою дозволило Україні
вистояти, зупинити агресора, незважаючи на його значну пере-
вагу в озброєнні й чисельності. Низький уклін Вам за це, дорогі
наші жінки!*

*Редакція та редколегія журналу «Метрологія та прилади»
щиро вітають зі святом жінок-метрологів, усіх жінок України!
Щастя, здоров'я, любові, добробуту і достатку Вам і Вашим
родинам!*

*Успіхів у Вашій професійній діяльності, визнання, поваги спів-
робітників на роботі! Миру, спокою, міжнародної підтримки,
територіальної цілісності нашої рідній Україні!*

ТЕНДЕНЦІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ		TRENDS AND PROSPECTS FOR DEVELOPMENT	
Попруга Ю. Департамент технічного регулювання Мінекономрозвитку: метрологічна діяльність у 2015 році 3	Popruga Yu. Technical Regulation Department of Economic Development and Trade Ministry of Ukraine: metrological activity in 2015	Заходи щодо реформування системи технічного регулювання в Україні..... 6	
ЗАКОНОДАВЧА МЕТРОЛОГІЯ		LEGAL METROLOGY	
Трищ Р., Москаленко М., Малецька О. Забезпечення єдності вимірювань на підприємстві з урахуванням вимог Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» 10	Trishch R., Moskalenko M., Maletska O. Ensuring Traceability in the Company to Meet the Requirements of the Law of Ukraine «On Metrology and Metrological Activity»	Заходи щодо реформування системи технічного регулювання в Україні	
НОРМАТИВНА БАЗА		NORMATIVE BASE	
Косач Н., Большаков В. Упровадження в Україні стандартів ISO 7066-1 та ISO 7066-2 з оцінювання невизначеності під час калібрування та застосування приладів вимірювання витрати (частина 2)..... 16	Kosach N., Bolshakov V. Implementation in Ukraine Standards ISO 7066-1 and ISO 7066-2 Evaluation of Uncertainty in Calibration and Devices Flowmeter (Part 2)	Методи додаткових вимірювань за корекції систематичних похибок ЗВТ 22	
МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ		METHODS AND PROCEDURES	
Кондрашов С., Григоренко І., Глоба С. Методи додаткових вимірювань за корекції систематичних похибок ЗВТ 22	Kondrashov S., Hrihorenko I., Hloba S. Methods of Additional Measurement in Compensation Systematic Error of Measuring Instruments	Метрологічна експертиза	
МЕТРОЛОГІЧНА ЕКСПЕРТИЗА		METROLOGICAL EXPERTISE	
Кветний Р., Маслій Р., Гармаш В. Оцінка достовірності бінарної класифікації об'єктів у зображенні..... 27	Kvyetnyy R., Masliy R., Garmash V. Reliability Estimation for a Binary Classification of Objects in an Image	Якість та ефективність	
ЯКІСТЬ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ		QUALITY AND EFFICIENCY	
Назаренко Л., Чернець В. Актуальні фактори світлового забруднення для України 32	Nazarenko L., Chernets V. Key Factors of Light Pollution for Ukraine	Вимірювальні прилади та системи	
ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ ТА СИСТЕМИ		MEASURING INSTRUMENTS AND SYSTEMS	
Походило Є., Антонюк О. Аналіз перетворювачів імпедансу біологічних тканин на напругу 41	Pokhodylo Y., Antoniuk O. Analysis of Biological Tissues Impedance Transducers Into Voltage	Похибки та невизначеності	
ПОХИБКИ ТА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ		ERRORS AND UNCERTAINTY	
Гоц Н., Дзіковська Ю. Аналізування складових непевності результатів вимірювання температури за інфрачервоним випроміненням тепловізійним методом 48	Hots N., Dzikovska Yu. Analysis of Uncertainty Components of Temperature Measurement Results by Infrared Radiation Using Thermal Imaging Method	Методи та методики	
МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ		METHODS AND PROCEDURES	
Габрук Р. Гарантування безпеки динамічного позионування за умов мілководдя локально обмеженого простору..... 54	Gabruk R. Guarantee of the Safety of Dynamic Positioning Under Local Cramped Space Limitations	Метрологія в медицині	
МЕТРОЛОГІЯ В МЕДИЦИНІ		METROLOGY IN MEDICINE	
Коломієць Р. До питання щодо відтворюваності результатів кірліанографічних досліджень 59	Kolomiets R. To Question about Producibility of Results which are Got by Method of Kirlianography	Військова метрологія	
ВІЙСЬКОВА МЕТРОЛОГІЯ		MILITARY METROLOGY	
Крюков О., Мудрик В., Чадаєв І. Оцінювання похибки лазерного доплерівського засобу вимірювання швидкості руху металевих елементів у каналах стволів вогнепальної зброї..... 64	Kryukov O., Mudrik V., Chadaev O. Evaluation of Error the Laser Doppler Measuring Tool of the Velocity of Throwing Elements in the Barrel of Firearms	Семінари, конференції, з'їзди	
СЕМІНАРИ, КОНФЕРЕНЦІЇ, З'ЇЗДИ		SEMINARS, CONFERENCES, CONGRESSES	
Большаков В. II-га Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical using of Measurement-2016» 70	Bolshakov V. II National Scientific and Technical Conference of young scientists in the field of metrology «Technical using of Measurement-2016»	Підготовка фахівців	
ПІДГОТОВКА ФАХІВЦІВ		TRAINING EXPERTS	
План набору слухачів на 2016 рік 72	State Enterprise for Year 2016		

УДК 531.76:681.78



ОЦІНЮВАННЯ ПОХИБКИ ЛАЗЕРНОГО ДОПЛЕРІВСЬКОГО ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ МЕТАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ У КАНАЛАХ СТВОЛІВ ВОГНЕПАЛЬНОЇ ЗБРОЇ

О. Крюков, доктор технічних наук, професор кафедри озброєння та спеціальної техніки,
В. Мудрик, кандидат технічних наук, викладач кафедри,
І. Чадаєв, магістрант,
 Національна академія Національної гвардії України, м. Харків

Проведено аналіз джерел виникнення похибок засобу вимірювання швидкості руху металічних елементів у каналі ствола зброї вогнепальної зброї. Встановлено закономірності характеристик цих похибок. Для визначення величини загальної похибки складових похибок запропоновано засіб вимірювання швидкості руху металічних елементів у каналі ствола зброї вогнепальної зброї. Статистично оцінено величину допустимих похибок.

The analysis of the sources of errors of measuring tool of metal projectile velocity in the channel of firearms are performed. The relation between the characteristics of the components of the error and the errors that influence on it are established. Formulas for error components and for the final measuring error are proposed. Quantitative assessment of the borders of admissible values of errors is performed.

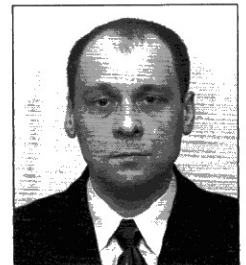
Ключові слова: засіб вимірювання, швидкість руху, вогнепальна зброя, інструментальна похибка.
Keywords: measurement tool, velocity, firearms, instrumental error.

Значний інтерес у процесі проектування, модернізації та оцінювання технічного стану вогнепальної зброї та боєприпасів представляють відомості стосовно балістичних елементів пострілу — залежності зміни тиску $P(t)$ порохових газів та швидкості $V(t)$ металічного елемента (МЕ) як функції часу його руху в каналі ствола від початку першого періоду пострілу до моменту виходу з дульного отвору [1, 2].

Один із перспективних шляхів отримання достовірної інформації стосовно балістичних елементів пострілу — реалізація вимірювання миттєвих значень швидкості $V(t)$ руху МЕ в каналі ствола під час пострілу із застосуванням засобу вимірювання (ЗВ), запропонованого у [3]. При цьому можливість та межі застосування такого ЗВ, а також практична корисність отриманої вимірювальної інформації значною мірою залежатиме від досягнутої межі допустимої інструментальної похибки вимірювання.

Тому певний інтерес викликає проблема оцінювання характеристик похибки ЗВ швидкості руху МЕ у каналі ствола.

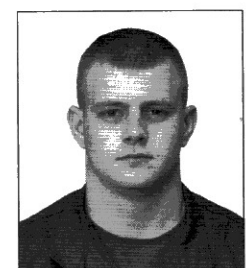
В основу зазначеного ЗВ миттєвих значень швидкості руху МЕ покладено подвійну диференційну схему (рис. 1) лазерної доплерівської анемометрії [4]. Метод вимірювання базується на виділенні та реєстрації доплерівського зсуву частот (ДЗЧ) F між двома хвилями 10, 11 когерентного лазерного випромінювання частотою f , які спрямовуються на МЕ 7 під різними кутами нахилу α та β . Для збільшення відношення «сигнал/завада» на МЕ наноситься світлоповертальне покриття 8 на основі мікросклоульок.



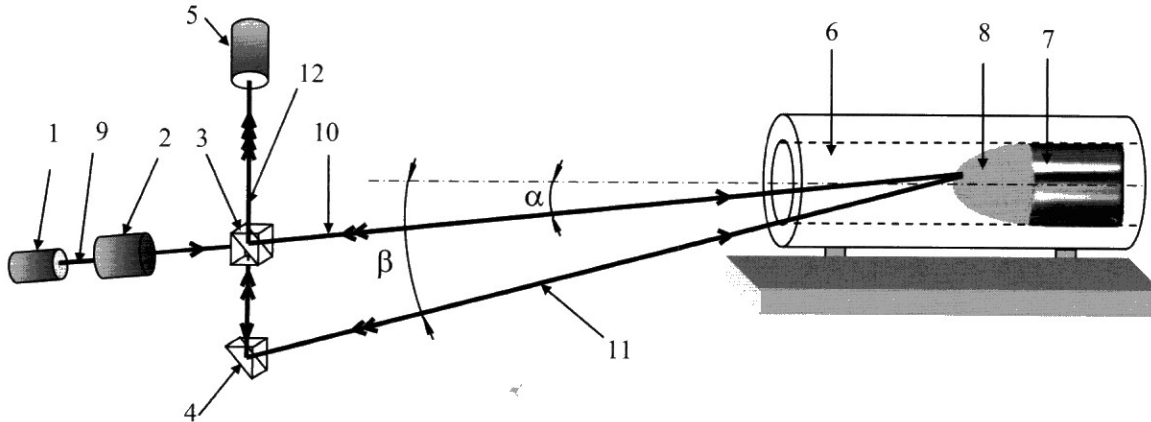
О. Крюков



В. Мудрик



І. Чадаєв



1 — лазер; 2 — коліматор; 3 — світлоподільна прямокутна призма; 4 — відбивач; 5 — фотоприймач; 6 — канал ствола; 7 — металевий елемент; 8 — світлоповертальне покриття; 9 — первинний лазерний промінь; 10, 11 — зондувальні промені; 12 — результувальне випромінювання.

Рис. 1. Схема ЗВ швидкості руху МЕ у каналі ствола

Fig.1. Scheme of means velocity measuring of the thrown element in the barrel

Вихідним сигналом оптичної частини ЗВ є ДЗЧ

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

де c — швидкість світла.

Сигнал на виході фотоприймача 5 у виді фотоструму перетворюється на напругу. Миттєве значення частоти цієї напруги несе інформацію стосовно швидкості руху МЕ. Більш детально особливості будови та принцип дії такого ЗВ викладено у [3].

За практичної реалізації ЗВ доцільно перетворювати аналоговий вихідний сигнал фотоприймача на цифровий з подальшим застосуванням алгоритму швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) [5], який дозволяє визначати спектральний склад вимірювального сигналу. Для виконання розрахунків, пов'язаних з алгоритмом ШПФ, до складу ЗВ вводиться обчислювальний компонент.

Відомі засоби вимірювання швидкості руху МЕ у каналах стволів за використаними технічними рішеннями суттєво відрізняються від запропонованого ЗВ, оскільки передбачають використання електромагнітних хвиль у радіодіапазоні, потребують незворотного (руйнівного) врізання окремих елементів у канал ствола, а також мають відмінності за умов проведення вимірювань [6—9]. Тому в літературних джерелах аналіз похибок лазерного доплерівського ЗВ швидкості руху МЕ відсутній, а проблема кількісного оцінювання впливу характеристик такого ЗВ на точність вимірювань на сьогодні залишається невирішеною.

Мета статті — математичне моделювання складових похибки лазерного доплерівського ЗВ швидкості руху МЕ, їх аналіз та кількісне оцінення.

ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

На основі аналізу схеми ЗВ (рис. 1), методу вимірювання, особливостей явища пострілу та умов проведення вимірювань визначимо основні джерела складових інструментальної похибки, а також проведемо дослідження впливу зазначених джерел на похибку ЗВ.

Виникнення похибки ЗВ зумовлюється:

- відхиленням параметрів оптичної схеми ЗВ від їхніх номінальних (розрахункових) значень;
- недосконалістю алгоритму ШПФ, який реалізовано в обчислювальному компоненті;
- наявністю оберտального руху МЕ в каналі ствола.

За технологічних або експлуатаційних відхилень параметри оптичної схеми ЗВ (частота лазерного випромінювання f , кути спрямування лазерних променів α та β) можуть набувати приростів Δf , $\Delta \alpha$, $\Delta \beta$, кожний із яких змінить ДЗЧ до значень:

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

$$F'_{\alpha} = \frac{2fV}{c}(\cos \alpha' - \cos \beta), \quad (3)$$

$$F'_{\beta} = \frac{2fV}{c}(\cos \alpha - \cos \beta'), \quad (4)$$

які відрізняються від номінального значення F . При цьому

$$f' = f + \Delta f, \quad \alpha' = \alpha + \Delta \alpha, \quad \beta' = \beta + \Delta \beta.$$

З урахуванням (2) — (4) отримаємо вирази для абсолютних ΔF_f , ΔF_{α} , ΔF_{β} та відносних δF_f , δF_{α} , δF_{β} відхилень ДЗЧ:

$$\Delta F_f = \frac{2V}{c}(\cos \alpha - \cos \beta) \Delta f;$$

$$\begin{aligned} \delta F_f &= \frac{\Delta f}{f} \\ \Delta F_\alpha &= F'_\alpha - F = \\ &= \frac{2fV}{c} (\cos(\alpha + \Delta\alpha) - \cos\alpha). \end{aligned}$$

Використавши формулу для різниці косинусів та урахувавши, що

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = 1,$$

остаточний вираз для ΔF_α можна подати у виді:

$$\Delta F_\alpha = -\frac{2fV}{c} (\sin\alpha) \cdot \Delta\alpha.$$

Аналогічно отримуємо й вираз для ΔF_β :

$$\Delta F_\beta = \frac{2fV}{c} (\sin\beta) \cdot \Delta\beta.$$

Відносні відхилення подамо у виді:

$$\delta F_\alpha = \frac{\Delta F_\alpha}{F} = -\frac{\sin\alpha\Delta\alpha}{\cos\alpha - \cos\beta}, \quad (5)$$

$$\delta F_\beta = \frac{\Delta F_\beta}{F} = \frac{\sin\beta\Delta\beta}{\cos\alpha - \cos\beta}. \quad (6)$$

Проведемо кількісні оцінювання цих складових.

Для визначення f застосовують ЗВ довжини хвилі лазерного випромінювання, наприклад, прилад SHR [10]. Цей ЗВ дозволяє визначити довжину хвилі випромінювання із межею допустимої абсолютної похибки ± 3 пм. За таких умов складова δF_f не перевищуватиме 0,0006 % (незалежно від типу вогнепальної зброї).

Кути спрямування лазерних променів α та β визначаються за допомогою гоніометрів-спектрометрів (ГС) [11]. Наявні моделі гоніометрів ГС-5, ГС-2, ГС-1М, ГС-1Л, при цьому найбільш доцільним є використання моделі ГС-1Л, межа допустимої абсолютної похибки якого під час вимірювання кутів не перевищує 0,00028°. Із аналізу схеми ЗВ швидкості руху (рис. 1) і виразів (1), (5), (6) впливає, що максимальні значення складові δF_α та δF_β матимуть за використання зброї малого калібру з довгим каналом ствола, а також високою швидкістю руху МЕ (наприклад, автомат Калашникова АК-74 калібру 5,45 мм, довжина каналу ствола 372 мм, дульна швидкість МЕ 900 м/с). Для вихідних даних, що відповідають 5,45 мм АК-74 ($\alpha = 0,42^\circ$; $\beta = 0,61^\circ$; $f = 0,564$ ПГц), отримаємо $\delta F_\alpha = 0,12\%$, $\delta F_\beta = 0,17\%$. Для зброї більшого калібру та з меншою довжиною каналу ствола, а також з меншою швидкістю руху МЕ (наприклад, пістолета Макарова ПМ калібру 9 мм, довжина каналу ствола 93 мм, дульна швидкість МЕ 300 м/с) похибки є значно меншими. Так, для вихідних даних, що відповідають 9 мм ПМ ($\alpha = 3,55^\circ$; $\beta = 4,89^\circ$; $f = 0,564$ ПГц), отримаємо $\delta F_\alpha = 0,018\%$, $\delta F_\beta = 0,024\%$.

Поява похибки обчислювального компонента зумовлюється обмеженістю розрядності операндів та недосконалістю алгоритму, який реалізує спектральний аналіз сигналу на основі ШПФ [12]. Для моделювання похибки обчислювального компонента запропоновано методику, що передбачає проведення кількісного експерименту на ПЕОМ. Така методика ґрунтується на синтезі сигналу із поліноміальною частотною модуляцією (ПЧМ) з доданими до нього завадами, реалізації ШПФ на ділянках ПЧМ сигналу, відшуканні частоти домінувальної гармоніки та її порівнянні з розрахунковими (еталонними) значеннями.

Частота сигналу із ПЧМ змінюється за законом полінома n -го ступеня. Нормований ПЧМ — сигнал із нульовою початковою фазою представимо у виді:

$$y = \sin \left[\left(\sum_{i=0}^m a_i \cdot t^i \right) \cdot t \right]. \quad (7)$$

Такий сигнал синтезується з інтервалом дискретизації Δt для заданих тривалості часу T та кінцевої частоти F_x , які залежать від характеристик конкретного зразка вогнепальної зброї (тривалості пострілу та дульної швидкості). Загальна кількість N дискретних відліків дорівнює $T/\Delta t$ та обирається з урахуванням значення F_x . Відомі коефіцієнти a_i полінома дозволяють визначити розрахункове (еталонне) миттєве значення частоти F_n сигналу в довільний дискретний момент часу $t_n = n\Delta t$.

Оскільки реальний вимірювальний сигнал має форму, яка спотворена зовнішніми завадами, нестабільністю напруги електроживлення, тепловим рухом заряджених часток у фотоприймачеві та провідниках, за проведення обчислювального експерименту до ПЧМ сигналу (7) додатково вводиться флуктуаційний шум y_ϕ , а також стаціонарна полігармонічна завада:

$$y_3 = \sum_{j=1}^l K_j \sin(\omega_j t),$$

де K_j — рівень i -ї гармоніки;

ω_i — кругова частота i -ї гармоніки.

Отже, синтезований сигнал має вид:

$$y_{\text{зар}} = y + y_3 + y_\phi.$$

Цей сигнал реєструється у формі двовимірної матриці (y_n, t_n) , де y_n — миттєве значення сигналу у відповідний момент часу t_n .

Методика опрацювання синтезованого сигналу полягає у такому:

- обирається точка n на осі часу;
- формується симетричний інтервал із L відліків сигналу в околі цієї точки, тривалість такого інтервалу часу t_a становить TL/N ;

- для обраної множини L миттєвих значень сигналу виконується операція ШПФ та визначається осереднений на інтервалі часу t_a спектр ділянки сигналу;

- визначається частота $F_{n \text{ осн}}$ гармоніки, яка є домінуютьною;

- визначається відносна похибка обчислювального компонента

$$\delta F_{ок} = \frac{F_{n \text{ осн}} - F_n}{F_n}$$

За запропонованою методикою для найбільш характерних наборів вихідних даних проведено моделювання похибки обчислювального компонента в математичному пакеті *OriginPro*. Наприклад, синтезувалися та опрацьовувалися сигнали з тривалістю 0,001 с та максимальною частотою 100 кГц (відповідно даним для 5,45 мм АК-74), тривалістю 0,0005 с та максимальною частотою 2 МГц (відповідно даним для 9 мм ПМ) та інші. Приклад спектрограми для певної ділянки сигналу подано на рис. 2. Результати експерименту показали, що відносна похибка $\delta F_{ок}$ міститься в інтервалі значень $\pm (0,13...0,4) \%$.

Обертальний рух МЕ у каналі ствола зумовлюється наявністю в ньому нарізів. Зазвичай, нарізи мають постійний нахил за всією довжиною нарізної частини каналу ствола (нарізи постійної крутизни). Одна із основних характеристик нарізів у каналі ствола — довжина їх ходу η [1], яка дорівнює шляху МЕ, впродовж якого останній здійснює один повний оберт навколо поздовжньої осі.

Розглянемо характер впливу обертального руху МЕ на значення ДЗЧ F .

У загальному випадку точка зондування МЕ лазерними променями не міститься у площині зондування, а може зсуватися у поперечному напрямку на певну відстань r від площини зондування.

Представимо у поперечному перерізі каналу ствола (рис. 3) розташування векторів швидкості \vec{V} поступального руху точки МЕ та швидкості $\vec{V}_{об}$ цієї точки, яка зумовлена обертанням МЕ. Сума \vec{V}' цих векторів є реальною швидкістю руху точки МЕ, в якій відбувається його зондування лазерними променями.

Ураховавши, що $V_{об} = \omega_{об} \cdot r$, визначимо V' :

$$V' = \sqrt{(\omega_{об} \cdot r)^2 + V^2} \tag{8}$$

Оскільки вектор \vec{V}' відхиляється від вектора \vec{V} , але залишається у площині зондування, значення кутів спрямування лазерних променів на МЕ зміняться на кут j (рис. 4), а спотворені кути зондування α'' та β'' становитимуть $\alpha'' = \alpha + \phi$, $\beta'' = \beta + \phi$.

Зважаючи на те, що МЕ за проходження відстані, яка дорівнює довжині ходу нарізів h , обертається на кут 2π , установимо зв'язок між кутом повороту МЕ та пройденим шляхом:

$$\phi = \frac{2\pi l}{\eta} \tag{9}$$

Продиференціюємо вираз (9) за часом:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{dl}{dt} \cdot \frac{2\pi}{\eta}$$

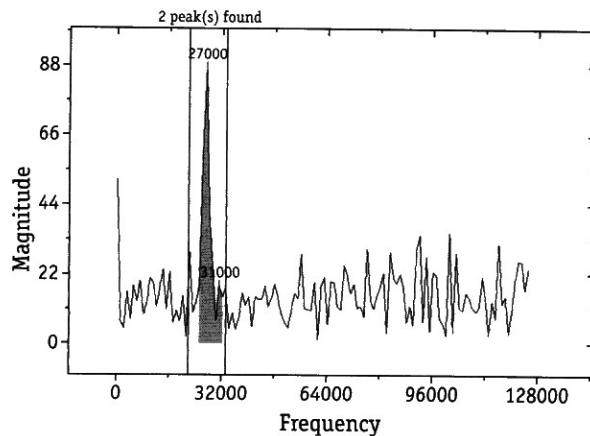


Рис. 2. Вид домінуютьної гармоніки на спектрограмі фрагмента сигналу

Fig. 2. View of dominant harmonic on spectrogram signal fragment

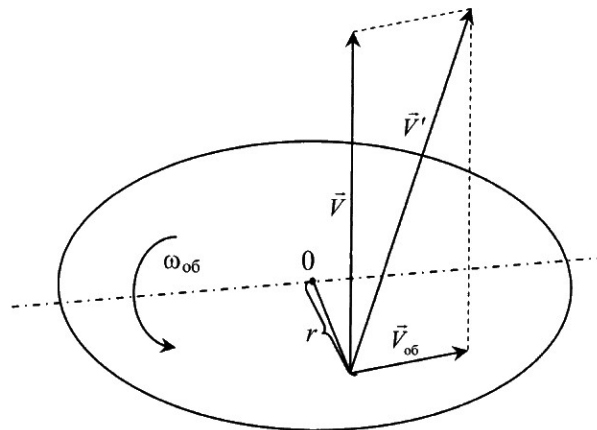


Рис. 3. Розташування векторів \vec{V} , $\vec{V}_{об}$, \vec{V}' у просторі

Fig. 3. Location of vectors \vec{V} , $\vec{V}_{об}$, \vec{V}' in the space

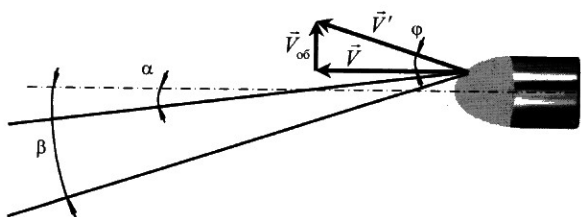


Рис. 4. Кути α , β та ϕ у площині зондування

Fig. 4. The angles α , β and ϕ in the plane of probing

Оскільки $\frac{d\varphi}{dt}$ є кутовою швидкістю ω , а $\frac{dl}{dt}$ — лінійною швидкістю V руху МЕ, отримаємо

$$\omega_{06} = \frac{2\pi V}{\eta}. \quad (10)$$

Значення ДЗЧ F' , що зазнало змінювання внаслідок обертального руху МЕ, матиме вид:

$$F'_{06} = \frac{2f}{c} V' (\cos \alpha'' - \cos \beta''). \quad (11)$$

Відносну похибку вимірювання δF_{06} подамо у виді:

$$\delta F_{06} = \frac{F'_{06} - F}{F}.$$

Використовуючи (1) та (11), отримаємо

$$\delta F_{06} = \frac{V' (\cos \alpha'' - \cos \beta'')}{V (\cos \alpha - \cos \beta)} - 1.$$

Ураховуючи вирази (8) та (10), а також вирази для α'' та β'' , скористаймося тригонометричними формулами приведення і отримаємо вираз для δF_{06} :

$$\delta F_{06} = \frac{\sqrt{\left[\left(\frac{2\pi V}{\eta} \cdot r\right)^2 + V^2\right]}}{V \cdot (\cos \alpha - \cos \beta)} \times \frac{(\cos \alpha \cdot \cos \varphi - \sin \alpha \cdot \sin \varphi - \cos \beta \cdot \cos \varphi + \sin \beta \cdot \sin \varphi)}{V \cdot (\cos \alpha - \cos \beta)} - 1.$$

У цьому виразі добутками $\sin \alpha \cdot \sin \varphi$ та $\sin \beta \cdot \sin \varphi$ можна знехтувати, оскільки кути α та β малі, а φ є близьким до нуля. Також, ураховуючи що $\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \sqrt{1 + \Delta x} = 1 + \frac{\Delta x}{2}$, після відповідних перетворень отримаємо

$$\delta F_{06} = \left[2 \left(\frac{\pi}{\eta} \cdot r \right)^2 + 1 \right] \cdot \cos \varphi - 1.$$

Оскільки φ є близьким до нуля, можна вважати, що $\cos \varphi \approx 1$, тому

$$\delta F_{06} = 2 \left(\frac{\pi}{\eta} \cdot r \right)^2. \quad (12)$$

Із виразу (12) можна побачити, що відносна похибка δF_{06} залежить лише від довжини ходу нарізів η та відстані r .

Проведемо кількісне оцінювання похибки δF_{06} для вихідних даних, що відповідають відомим зразкам вогнепальної зброї, враховуючи, що значення r визначається візуально окомірним способом та не перевищує ± 1 мм. Так, для 9 мм ПМ ($\eta = 280$ мм)

відносна похибка визначення ДЗЧ не перевищує 0,013%, а для 5,45 мм АК-74 ($\eta = 200$ мм) — 0,025%. Для всіх можливих наборів вихідних даних граничне значення похибки δF_{06} міститься в інтервалі (0,01...0,05) %.

Вираз для підсумкової інструментальної похибки отримаємо з урахуванням кореляційного зв'язку між складовими δF_{α} та δF_{β} , який має місце внаслідок застосування одного засобу вимірювання для визначення обох кутів α і β :

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta F_f^2 + (\delta F_{\alpha} + \delta F_{\beta})^2 + \delta F_{ок}^2 + \delta F_{06}^2}. \quad (13)$$

Кількісне оцінювання за виразом (13) дозволяє стверджувати, що границя відносної похибки ЗВ міститься в діапазоні $\pm (0,14...0,5)$ %. Із отриманих розрахунків видно, що найбільший вплив на інструментальну похибку чинять обмежена точність визначення кутів спрямування лазерних променів та недосконалість алгоритму ШПФ, який реалізовано в обчислювальному компоненті. Тому за необхідності зменшення похибки ЗВ доцільно використовувати більш точні засоби вимірювання кутів під час юстування оптичної схеми та застосувати спеціалізовані (адаптовані до умов проведення вимірювань) алгоритми цифрового опрацювання сигналів.

ВИСНОВКИ

Виникнення інструментальної похибки лазерного доплерівського ЗВ швидкості руху МЕ зумовлюється відхиленням параметрів оптичної схеми від їхніх номінальних (розрахункових) значень, недосконалістю алгоритму ШПФ, який реалізовано в обчислювальному компоненті, а також наявністю обертального руху МЕ у каналі ствола.

Установлено зв'язок між характеристиками складових похибки і впливними величинами, отримано вирази для кількісного оцінювання складових похибки засобу вимірювання. Показано, що границя відносної похибки ЗВ може бути забезпечена на рівні $\pm (0,14...0,5)$ %.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на обґрунтування перспективних шляхів зменшення похибки ЗВ, зокрема, внаслідок використання високоточних методів і засобів контролю кутів спрямування лазерних променів та удосконалених алгоритмів цифрового опрацювання сигналів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Голумбовский, А.К. Теория и расчет автоматического оружия [Текст] / А.К. Голумбовский — Пенза: ПВАИУ

(Golombovskiy A. K. Theory and Design of automatic weapons. Penza: PVAEU), 1973. — 492 с/р.

2. Крюков, О.М. Дослідна установка для вимірювання миттєвих значень тиску в каналах стволів стрілецької зброї та артилерійських систем [Текст] / О.М. Крюков, О.А. Александров // Метрологія та прилади (Kriukov O.M., Alexandrov O.O. The test apparatus for measuring the instantaneous pressure values in barrels of small arms and artillery systems. HNU of RE: scienc. Journal. Kharkiv: Metrologiya ta pruladu). — 2011. — № 4 (30). — С/Р. 62—67.
3. Вимірювання швидкості руху металюного елемента у каналі ствола на основі оптичного диференційного доплеровського методу [Текст] / О.М. Крюков, Г.М. Доля, О.І. Біленко, В.Г. Мудрик // Метрологія та прилади (Kriukov O.M., Dolya G.N., Bilenko O.I., Mudrik V.G. Measurement of the throwing element speed in the barrel based on differential optical Doppler method. HNU of RE: scienc. Journal. Kharkiv: Metrologiya ta pruladu), 2013. — Вип. — 4. — С/Р. 56—60.
4. Мудрик В.Г. Дифференциальная лазерная доплеровская анемометрия объектов со световозвращающей поверхностью [Текст] / А.М. Крюков, Г.Н. Доля, В.Г. Мудрик // Прикладная радиоэлектроника (Kriukov O.M., Dolya G.N., Mudrik V.G. Differential laser Doppler anemometry of the objects with retroreflecting sheet. HNU of RE: science-techn. Journal. Kharkiv: Prikladnaya radioelectronica), 2013. — Том 12. — 3. — С/Р. 436—441.
5. Гоноровский, И.С. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст] / И.С. Гоноровский. — М.: Высшая школа (Gonorovsky I.S. Radio Circuits and Signals. Moscow: Vushaya shkola), 1977. — 608 с/р.
6. Михайлов К.В. Экспериментальная баллистика. Приборы и методы баллистических измерений [Текст] / К.В. Михайлов — София: ВТС (Mihajlov K.V. The experimental ballistics. Devices and methods of ballistic measurements. Sophiya: VTS), 1976. — 388 с/р.
7. Patent 2691761 США, МКИ G 01 S 13/58. Microwave measuring of projectile speed [Text] / Smith J.N., Oak R., Tenn. — № 6088; claimed. 03.02.1948; published 12.10.1954, НКІ 342/105; 73/167. — 6 р.
8. Patent 4457206 США, МКИ G 01 S 13/58; F 42 C 17/04. Microwave — type projectile communication apparatus for guns [Text] / Toullos P.P., Hartman K. — № 06/269,489; claimed 02.06.1981; published 03.07.1984, НКІ 89/14.5. — 37 р.
9. Patent 0415906 Германия, МКИ G 01 S 13/58; G 01 P 3/66. Method and device for the determination of parameters of motion [Text] / Reinhard, B., Bernhard Z. — № 19900809; claimed 09.08.1990; published 10.02.1993, НКІ G 01 S 13/58 F; G 01 P 3/66 B. — 8 р.
10. Высокоточный широкодиапазонный измеритель длины волны [Электронный ресурс] / Режим доступа: (Vusokotochnuy shurokodiapazonuy izmeritel dinu volnu (High precision wide-range measuring instrument of the wavelength). Available at: <http://solarlaser.com/ru/products/high-resolution-wavelength-meters/high-resolution-wide-range-wavelength-meter-model-shr/> (accessed 2013)) <http://solarlaser.com/ru/products/high-resolution-wavelength-meters/high-resolution-wide-range-wavelength-meter-model-shr/>
11. Все про гониометр: [Электрон. ресурс]. — Режим доступа: (Vse pro goniometr (Everything about the goniometer). Available at: <http://www.goniometer.ru> (accessed 2013)) <http://www.goniometer.ru>
12. Лазерний доплеровський засіб вимірювання швидкості руху металюного елемента в каналі ствола: будова та опрацювання вимірювальної інформації [Текст] / О.М. Крюков, Г.М. Доля, В.Г. Мудрик, О.А. Надь, О.А. Коваль // Метрологія та прилади (Kriukov O.M., Dolya G.N., Mudrik V.G., Nadj O.A., Koval O.A. Laser Doppler measurement tool of the velocity of the throwing element in the barrel: the construction and processing of measuring information. HNU of RE: scienc. Journal. Kharkiv: Metrologiya ta pruladu), 2014. — Вип. — 1 (45). — С/Р. 151—154. ■

Отримано / received: 28.10.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. О.В. Полярсом (Україна).
Prof. O.V. Poliarus, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.