

УДК 531.76:681.78

О. М. Крюков, В. Г. Мудрик

ОЦІНЮВАННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ МЕТАЛЬНОГО ЕЛЕМЕНТА В КАНАЛІ СТВОЛА

У статті проведений аналіз джерел виникнення похибок засобу вимірювання швидкості руху металюного елемента в каналі ствола. Встановлено зв'язок між характеристиками складових похибки і величинами, що на них впливають. Для кожного з джерел отримано вирази складових похибки засобу вимірювання. Запропонована узагальнена математична модель інструментальної похибки, наведено інтервальну оцінку меж її допустимих значень.

К л ю ч о в і с л о в а: відносна похибка, математична модель, стрілецька зброя, засіб вимірювання, швидкість руху.

Постановка проблеми та аналіз публікацій. Великого значення у проектуванні, модернізації та оцінюванні стану стрілецької зброї і боеприпасів мають дані про балістичні елементи пострілу: залежності зміни тиску $P(t)$ порохових газів та швидкості $V(t)$ металюного елемента (МЕ) в функції часу його руху в каналі ствола (КС) від початку першого періоду пострілу до моменту виходу з дульного отвору [1, 2].

Одним з перспективних шляхів отримання достовірної інформації про балістичні елементи пострілу є реалізація вимірювання миттєвих значень швидкості руху МЕ в КС під час пострілу [3].

В основу відомого засобу вимірювання миттєвих значень швидкості руху МЕ в КС (рис. 1) [4] покладено подвійну диференційну схему лазерної доплерівської анемометрії [5].

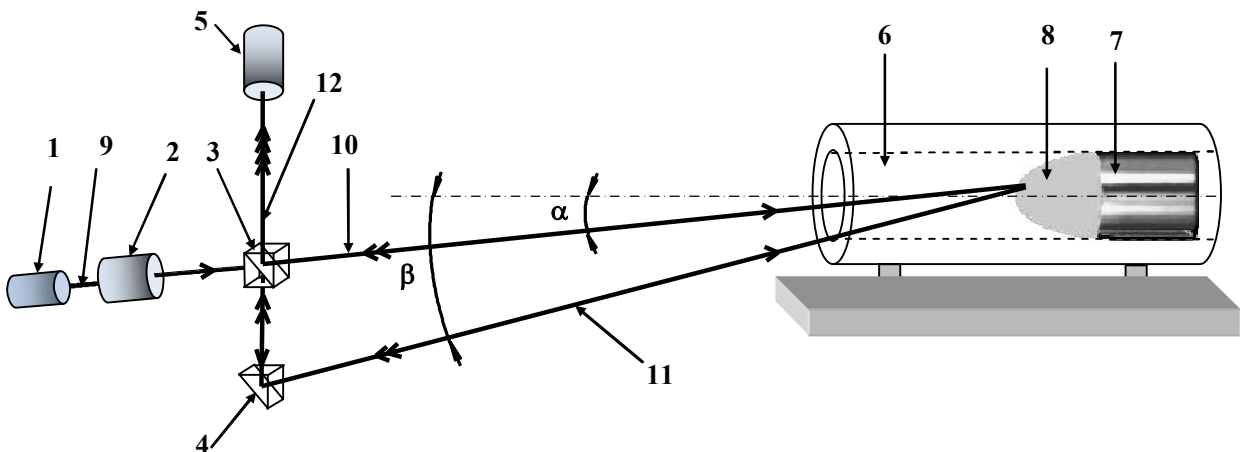


Рис. 1. Засіб вимірювання швидкості руху МЕ в КС:

- 1 – лазер; 2 – коліматор; 3 – світлоподільна прямокутна призма; 4 – відбивач; 5 – фотоприймач; 6 – КС;
7 – МЕ; 8 – світлоповертальна поверхня, що нанесена на МЕ; 9 – первинний лазерний промінь;
10, 11 – зондувальні промені; 12 – випромінювання, що є результатом інтерференції чотирьох відбитих від світлоповертального покриття променів

Метод вимірювання базується на виділенні та рестрації доплерівського зсуву частот (ДЗЧ) F між двома хвилями 10, 11 (рис. 1) 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.

Вихідним сигналом оптичної частини засобу вимірювання є ДЗЧ [5, 6]

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

де c – швидкість світла.

Сигнал на виході фотоприймача 5 у вигляді фотоструму перетворюється на напругу. Миттєве значення частоти цієї напруги несе інформацію про значення швидкості руху МЕ.

З метою практичної реалізації засобу вимірювання доцільно перетворювати аналоговий сигнал на цифровий з подальшим застосуванням алгоритму швидкого перетворення Фур'є, який дозволяє визначати спектральний склад вимірювального сигналу. Для виконання розрахунків, пов'язаних з алгоритмом швидкого перетворення Фур'є, до складу засобу вимірювання вводиться обчислювальний компонент.

Відомі засоби вимірювання швидкості руху (ЗВШР) МЕ в КС [7] за використаними технічними рішеннями суттєво відрізняються від запропонованого засобу вимірювання, оскільки передбачають використання електромагнітних хвиль в радіодіапазоні та врізання окремих елементів у КС, а також мають відмінності в умовах проведення вимірювань [8–10]. Саме тому в друкованих джерелах відсутній аналіз похибок ЗВШР МЕ в КС. Також на даний час лишається невирішеною проблема [11] кількісного оцінювання впливу характеристик такого засобу вимірювання на точність вимірювань.

Мета статті – розроблення математичних моделей складових похибки ЗВШР МЕ в КС, їх аналіз та кількісне оцінювання. Передбачається отримати узагальнену математичну модель похибки у вигляді виразу для її допустимих значень.

Виклад основного матеріалу. На основі аналізу схеми ЗВШР МЕ в КС (рис. 1), методу вимірювання та особливостей явища пострілу (швидкоплинність процесу, висока швидкість руху МЕ) визначимо основні джерела складових інструментальної похибки, а також проведемо дослідження впливу вказаних джерел на похибку засобу вимірювання.

Виникнення похибки ЗВШР МЕ в КС обумовлюється:

- відхиленням значень параметрів елементів оптичної схеми;
- недосконалістю алгоритму, який реалізовано в обчислювальному компоненті;
- наявністю обертового руху МЕ в КС.

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

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

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

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

які відрізняються від номінального значення F . При цьому:

$$f' = f + \Delta f, \quad (5)$$

$$\alpha' = \alpha + \Delta\alpha, \quad (6)$$

$$\beta' = \beta + \Delta\beta. \quad (7)$$

З урахуванням формул (5–7) вирази для абсолютних ΔF_f , ΔF_α , ΔF_β та відносних δF_f , δF_α , δF_β відхилень ДЗЧ можна подати у вигляді таких виразів:

$$\Delta F_f = \frac{2V}{c}(\cos\alpha - \cos\beta) \cdot \Delta f, \quad (8)$$

$$\delta F_f = \frac{\Delta f}{f}, \quad (9)$$

$$\Delta F_\alpha = F'_\alpha - F = \frac{2fV}{c}(\cos\alpha' - \cos\beta) - \frac{2fV}{c}(\cos\alpha - \cos\beta) = \frac{2fV}{c}(\cos(\alpha + \Delta\alpha) - \cos\alpha). \quad (10)$$

Використовуючи формулу для різниці косинусів, отримаємо

$$\Delta F_\alpha = \frac{2fV}{c} \left(-2 \sin \frac{\alpha + \Delta\alpha + \alpha}{2} \cdot \sin \frac{\alpha + \Delta\alpha - \alpha}{2} \right) = \frac{2fV}{c} \left(-2 \sin \frac{2\alpha + \Delta\alpha}{2} \cdot \sin \frac{\Delta\alpha}{2} \right). \quad (11)$$

Враховуючи, що відповідно до [12]

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = 1, \quad (12)$$

остаточний вираз для ΔF_α можна подати у вигляді

$$\Delta F_{\alpha} = -\frac{2fV}{c}(\sin\alpha) \cdot \Delta\alpha. \quad (13)$$

Аналогічно отримуємо вираз для ΔF_{β} :

$$\Delta F_{\beta} = \frac{2fV}{c}(\sin\beta) \cdot \Delta\beta. \quad (14)$$

Відносні відхилення подамо у такому вигляді:

$$\delta F_{\alpha} = \frac{\Delta F_{\alpha}}{F} = -\frac{\sin\alpha\Delta\alpha}{\cos\alpha - \cos\beta}, \quad (15)$$

$$\delta F_{\beta} = \frac{\Delta F_{\beta}}{F} = \frac{\sin\beta\Delta\beta}{\cos\alpha - \cos\beta}. \quad (16)$$

Виконаємо кількісну оцінку цих складових.

Для визначення f застосовують високоточні засоби вимірювання довжини хвилі лазерного випромінювання, наприклад, прилад SHR [13]. Даний засіб вимірювання дозволяє визначати довжину хвилі як імпульсного, так і неперервного випромінювання із межею допустимої абсолютної похибки ± 3 пм. За таких умов складова δF_f не перевищуватиме 0,0006 % (незалежно від типу стрілецької зброї та швидкості руху МЕ).

Кути спрямування лазерних променів α та β визначаються за допомогою гоніометрів-спектрометрів [14]. Розповсюджені моделі гоніометрів ГС-5, ГС-2, ГС-1М, ГС-1Л, при цьому найбільш доцільним є використання моделі ГС-1Л, межа допустимої абсолютної похибки якого при вимірюванні кутів не перевищує 0,00028°. З аналізу схеми ЗВШР (рис. 1) і виразів (1, 15, 16) випливає, що максимальне значення складові δF_{α} та δF_{β} матимуть у разі використання зброї малого калібру з довгим КС та великою швидкістю руху МЕ (наприклад, АК-74 калібру 5,45 мм з довжиною КС 372 мм і дульною швидкістю МЕ 900 м/с). Використовуючи вихідні дані 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 вихідних даних $\alpha = 3,55^\circ$; $\beta = 4,89^\circ$; $f = 0,564$ ПГц, що притаманні зброї з більшим калібром, меншою довжиною КС та меншою дульною швидкістю (наприклад, ПМ калібру 9 мм, довжиною КС 93 мм, дульною швидкістю МЕ 300 м/с), 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 швидкого перетворення Фур'є. Для моделювання похибки обчислювального компонента ЗВШР запропоновано методику, що передбачає проведення чисельного експерименту на ПЕОМ. Така методика ґрунтується на синтезі сигналу із поліноміальною частотною модуляцією (ПЧМ) з доданими до нього завадами, реалізації швидкого перетворення Фур'є на ділянках ПЧМ сигналу, відшуканні частоти домінуючої гармоніки та її порівнянні з розрахунковими (еталонними) даними.

Частота сигналу із ПЧМ змінюється за законом полінома n -го степеня. Нормований ПЧМ – сигнал з нульовою початковою фазою можна представити у вигляді

$$y = \sin \left[\left(\sum_{i=0}^m a_i \cdot t^i \right) \cdot t \right]. \quad (17)$$

Такий сигнал синтезується з інтервалом дискретизації Δt для заданих тривалості часу T та кінцевої частоти F_k , які залежать від характеристик конкретного зразка зброї (тривалості пострілу та дульної швидкості). Загальна кількість N дискретних відліків дорівнює $T/\Delta t$ та вибирається з урахуванням значення F_k . Відомі коефіцієнти a_i поліному 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 завадами, нестабільністю напруги електроживлення, тепловим рухом заряджених часток у фотоприймачеві і провідниках, при проведенні обчислювального експерименту до ПЧМ сигналу (17) додатково вводиться флуктуаційний шум y_{ϕ} , а також стаціонарна полігармонічна завада

$$y_z = \sum_{j=1}^l K_j \sin(\omega_j t), \quad (18)$$

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

Отже, синтезований сигнал має вигляд

$$y_{заг} = y + y_z + y_{\phi} \quad (19)$$

Цей сигнал реєструється у формі двовимірної матриці (y_n, t_n) з прив'язуванням до відповідних миттєвих значень часу t_n .

Методика оброблення синтезованого сигналу полягає в такому:

- вибирається 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 вибраної множини L миттєвих значень сигналу виконується операція швидкого перетворення Фур'є та визначається осереднений на інтервалі часу t_a спектр ділянки сигналу;
- визначається частота $F_{n\text{ осн}}$ основної гармоніки, яка є домінуючою;
- визначається похибка обчислювального компонента у відносній формі

$$\delta F_{ок} = \frac{F_{n\text{ осн}} - F_n}{F_n} \quad (20)$$

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

Обертальний рух МЕ в КС спричинений наявністю нарізів у ньому. Зазвичай нарізи мають постійний нахил по всій довжині КС (нарізи постійної крутості). Однією з основних характеристик нарізів у КС є довжина їх ходу η [2], що дорівнює шляху МЕ, протягом якого останній здійснює один повний оберт навколо поздовжньої осі.

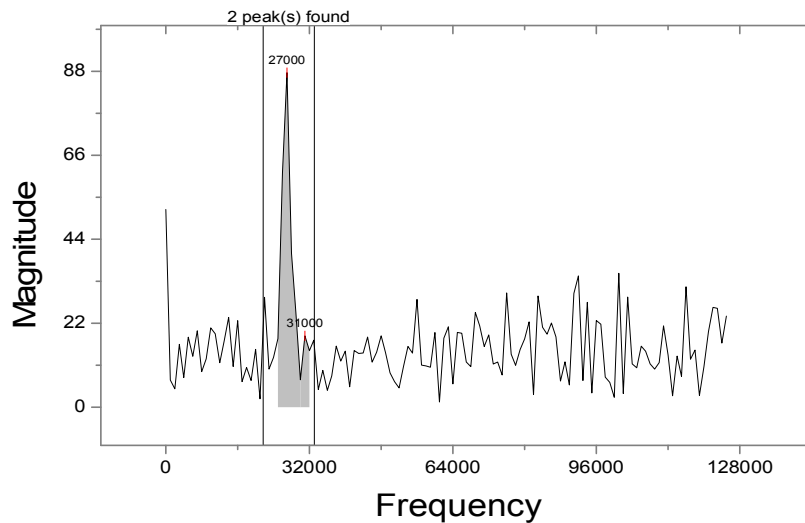


Рис. 2. Результати спектрального аналізу фрагмента сигналу з використанням програми OriginPro

Розглянемо характер впливу обертального руху МЕ в КС на значення ДЗЧ F . В загальному випадку точка зондування МЕ лазерними променями не лежить у площині зондування, а може зсуватися в поперечному напрямку на певну відстань r від площини зондування.

Представимо в поперечному перерізі КС (див. 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.

Враховуючи, що $V_{об} = \omega_{об} \cdot r$, визначимо вираз для V' відповідно до рис. 3:

$$V' = \sqrt{(\omega_{об} \cdot r)^2 + V^2} \quad (21)$$

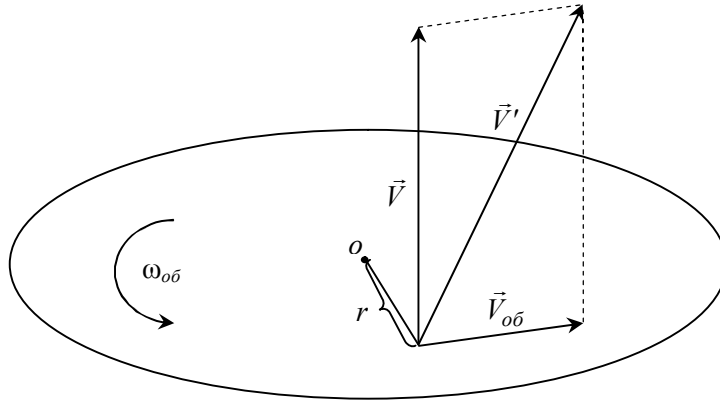


Рис. 3. Розташування векторів \vec{V} , $\vec{V}_{об}$, \vec{V}' у просторі

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

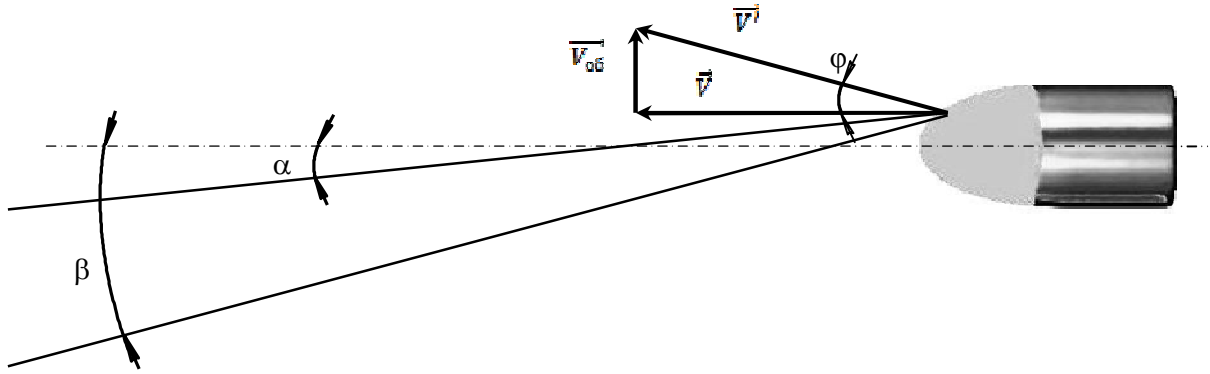


Рис. 4. Кути α , β та φ у площині зондування

Виходячи із того, що МЕ при проходженні відстані, яка дорівнює довжині ходу нарізів η , обертається на кут 2π , встановимо зв'язок між кутом повороту МЕ та пройденим шляхом:

$$\varphi = \frac{2\pi l}{\eta} \quad (22)$$

Продиференціюємо вираз (22) за часом:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{dl}{dt} \cdot \frac{2\pi}{\eta} \quad (23)$$

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

$$\omega_{об} = \frac{2\pi V}{\eta} \quad (24)$$

Значення ДЗЧ F' , що піддається змінюванню за рахунок обертального руху МЕ, матиме вигляд

$$F'_{об} = \frac{2f}{c} V' (\cos \alpha'' - \cos \beta'') \quad (25)$$

Відносну похибку вимірювання ДЗЧ подамо у вигляді

$$\delta F_{об} = \frac{F'_{об} - F}{F} \quad (26)$$

Використовуючи вирази (1) та (25), подамо значення $\delta F_{об}$ у вигляді

$$\delta F_{\alpha\beta} = \frac{\frac{2f}{c}V'(\cos\alpha'' - \cos\beta'') - \frac{2f}{c}V(\cos\alpha - \cos\beta)}{\frac{2f}{c}V(\cos\alpha - \cos\beta)}. \quad (27)$$

Після скорочень отримаємо

$$\delta F_{\alpha\beta} = \frac{V'(\cos\alpha'' - \cos\beta'')}{V(\cos\alpha - \cos\beta)} - 1. \quad (28)$$

Враховуючи вирази (21) та (24), а також вирази для α'' та β'' , скористаємося тригонометричними формулами зведення і отримаємо вираз для $\delta F_{\alpha\beta}$:

$$\delta F_{\alpha\beta} = \frac{\sqrt{\left[\left(\frac{2\pi V}{\eta} \cdot r\right)^2 + V^2\right]} \cdot (\cos\alpha \cdot \cos\varphi - \sin\alpha \cdot \sin\varphi - \cos\beta \cdot \cos\varphi + \sin\beta \cdot \sin\varphi)}{V \cdot (\cos\alpha - \cos\beta)} - 1. \quad (29)$$

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, враховуючи, що $\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \sqrt[2]{1 + \Delta x} = 1 + \frac{\Delta x}{2}$ [12], після відповідних перетворень отримаємо:

$$\delta F_{\alpha\beta} = \left[2\left(\frac{\pi}{\eta} \cdot r\right)^2 + 1 \right] \cdot \cos\varphi - 1. \quad (30)$$

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

$$\delta F_{\alpha\beta} = 2\left(\frac{\pi}{\eta} \cdot r\right)^2. \quad (31)$$

Із виразу (31) можна побачити, що відносна похибка вимірювання ДЗЧ $\delta F_{\alpha\beta}$, спричинена обертальним рухом МЕ, залежить тільки від довжини ходу нарізів η та значення r (відстані від точки потрапляння лазерного променя на поверхню МЕ до площини зондування).

Проведемо кількісне оцінювання похибки $\delta F_{\alpha\beta}$ для вихідних даних, які відповідають відомим зразкам стрілецької зброї, враховуючи, що значення r визначається візуально окомірним способом та дорівнює одному міліметру. Так, для 9-мм ПМ при $\eta = 280$ мм відносна похибка вимірювання ДЗЧ $\delta F_{\alpha\beta} \leq 0,013$ %, а для 5,45-мм АК-74 при $\eta = 200$ мм $\delta F_{\alpha\beta} \leq 0,025$ %. Таким чином, для всіх можливих наборів вихідних даних граничне значення похибки $\delta F_{\alpha\beta}$ знаходиться в інтервалі 0,025... 0,049 %.

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 обох кутів α і β :

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta F_f^2 + (\delta F_{\alpha} + \delta F_{\beta})^2 + \delta F_{ок}^2 + \delta F_{\alpha\beta}^2}. \quad (32)$$

Кількісне оцінювання за виразом (32) дозволяє стверджувати, що межа допустимої відносної похибки ЗВШР складає $\pm 0,14 \dots 0,5$ %.

За отриманими розрахунковими даними можна дійти висновку, що точність визначення кутів спрямування лазерних променів α та β на МЕ суттєво впливає на значення допустимої відносної похибки ЗВШР МЕ в КС. З метою зменшення похибки ЗВШР МЕ в КС доцільно використовувати більш точні засоби вимірювання кутів спрямування лазерних променів.

Висновки

Виникнення інструментальної похибки ЗВШР МЕ в КС обумовлюється відхиленням значень параметрів елементів оптичної схеми, недосконалістю алгоритму, який реалізовано в обчислювальному компоненті, а також наявністю обертального руху МЕ в КС.

Встановлено зв'язок між характеристиками складових похибки і величинами, що на них впливають, отримані математичні моделі складових похибки засобу вимірювання. Виконане

кількісне оцінювання складових похибки, показано, що гранична похибка засобу вимірювання може бути забезпечена на рівні $\pm 0,14 \dots 0,5$ %.

Отримані результати можуть бути використані під час досліджень з уточнення даних про балістичні елементи пострілу.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на обґрунтування перспективних шляхів зменшення похибки ЗВШР МЕ в КС, зокрема, за рахунок використання високоточних методів і засобів контролю кутів падіння лазерних променів та удосконалених алгоритмів цифрового оброблення сигналів.

Список використаних джерел

1. Серебряков, М. Е. Внутренняя баллистика [Текст] / М. Е. Серебряков – М. : Оборонгиз, 1949. – 469 с.
2. Голомбовский, А. К. Теория и расчет автоматического оружия [Текст] / А. К. Голомбовский. – Пенза : ПВАИУ, 1973. – 492 с.
3. Крюков, О. М. Перспективи експериментального визначення балістичних елементів пострілу [Текст] / О. М. Крюков, В. Г. Мудрик // Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України. – Х. : Акад. ВВ. МВС. України, 2013. – Вип. 1 (21). – С. 21–24.
4. Лазерний доплерівський вимірювач швидкості руху метального елемента в каналі ствола [Текст] : пат.: 88172 Україна : МПК G 01 S 17/02 (2006.01) / Крюков О. М., Доля Г. М., Мудрик В. Г.; заявл. 10.06.13; опубл. 11.03.14; Бюл. № 5. – 8 с.
5. Крюков, А. М. Дифференциальная лазерная доплеровская анемометрия объектов со световозвращающей поверхностью [Текст] / А. М. Крюков, Г. Н. Доля, В. Г. Мудрик // Прикладная радиоэлектроника. – 2013. – Т. 12. – № 3. – С. 436–441.
6. Лазерний доплерівський засіб вимірювання швидкості руху метального елемента в каналі ствола: будова та оброблення вимірювальної інформації [Текст] / О. М. Крюков, Г. М. Доля, В. Г. Мудрик та ін. // Метрологія та прилади. – 2014. – Вип. 1 (45). – С. 151–154.
7. Михайлов, К. В. Экспериментальная баллистика. Приборы и методы баллистических измерений [Текст] / К. В. Михайлов. – София : ВТС, 1976. – 388 с.
8. Microwave measuring of projectile speed [Текст] : пат. 2691761 США: МКИ G 01 S 13/58. / Smith J. N., Oak R., Tenn. – № 6088; claimed. 03.02.1948; published 12.10.1954, НКИ 342/105; 73/167. – 6 р.
9. Microwave – type projectile communication apparatus for guns [Текст] : пат. 4457206 США: МКИ G 01 S 13/58; F 42 C 17/04. / Toullos P. P., Hartman K. – № 06/269,489; claimed 02.06.1981; published 03.07.1984, НКИ 89/14.5. – 37 р.
10. : Method and device for the determination of parameters of motion [Текст] : пат. 0415906 Германия: МКИ G 01 S 13/58; G 01 P 3/66. / Reinhard, B., Bernhard Z. – № 19900809; claimed 09.08.1990; published 10.02.1993, НКИ G 01 S 13/58 F; G 01 P 3/66 B. – 8 р.
11. Крюков, О. М. Проблеми вимірювального контролю параметрів внутрішньобалістичних процесів [Текст] / О. М. Крюков, О. А. Александров // Збірник наукових праць ХУПС ім. І. Кожедуба. – Х. : ХУПС ім. І. Кожедуба, 2009. – Вип. 1(19). – С. 150–152.
12. Выгодский, М. Я. Справочник по высшей математике [Текст] / М. Я. Выгодский. – М. : АСТ: Астрель, 2006. – 991 с.
13. Высокоточный широкодиапазонный измеритель длины волны [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://solarlaser.com/ru/products/high-resolution-wavelength-meters/high-resolution-wide-range-wavelength-meter-model-shr-/>. – Назва з екрана.
14. Гониометр-спектрометр [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.rostest.ru/Goniometer%20spectrometer%20GS-2.php>. – Назва з екрана.

Стаття надійшла до редакції 14.04.2015 р.