

В роботі проведений аналіз джерел виникнення похибок засобу вимірювання швидкості руху металюного елемента в каналі ствола. Встановлено зв'язок між характеристиками складових похибки і впливними величинами. Для кожного з джерел отримано вираз відносної похибки вимірювання. Запропонована узагальнена математична модель інструментальної похибки, наведено інтервальну оцінку меж її допустимих значень

Ключові слова: засіб вимірювання, металюний елемент, стрілецька зброя, математична модель, відносна похибка

В работе проведен анализ источников возникновения погрешностей средства измерения скорости движения метаемого элемента в канале ствола. Установлена связь между характеристиками компонентов погрешности и величинами, которые на неё влияют. Для каждого из источников получено выражение относительной погрешности измерения. Предложена обобщенная математическая модель инструментальной погрешности, приведена интервальная оценка границ её допустимых значений

Ключевые слова: средство измерения, метаемый элемент, стрелковое оружие, математическая модель, относительная погрешность

УДК 531.76:681.78
DOI: 10.15587/1729-4061.2015.38064

АНАЛІЗ ПОХИБОК ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ МЕТАЛЬНОГО ЕЛЕМЕНТУ В КАНАЛІ СТВОЛА СТРІЛЕЦЬКОЇ ЗБРОЇ

О. М. Крюков

Доктор технічних наук, професор,*

О. Ю. Шабалін

Кандидат військових наук, заступник начальника НАНГУ з озброєння та техніки, начальник технічної частини**

В. Г. Мудрик

Ад'юнкт ад'юнктури

E-mai:mudrik.vad@gmail.com

*Кафедра озброєння та спеціальної техніки**

**Національна академія Національної гвардії України пл. Повстання, 3, м. Харків, Україна, 61001

1. Вступ

Велике значення при проектуванні, модернізації та оцінці стану стрілецької зброї і боеприпасів відіграють 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].

2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

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

Метод вимірювання базується на виділенні та реєстрації 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 світлоповертаюче покриття 8 на основі мікросклоульок. Вихідним сигналом оптичної частини засобу вимірювання є ДЗЧ [5, 6]

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

де c – швидкість світла.

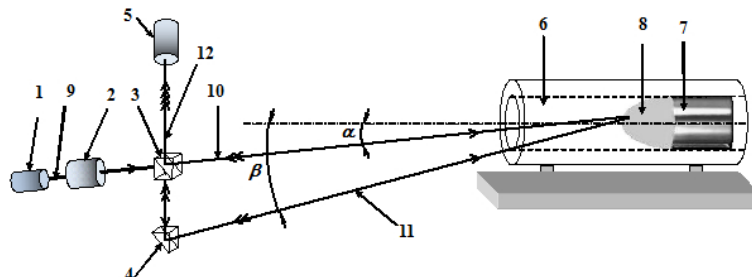


Рис. 1. Засіб вимірювання швидкості руху металюного елемента в каналі ствола: 1 – лазер; 2 – коліматор; 3 – світлоподільна прямокутна призма; 4 – відбивач; 5 – фотоприймач; 6 – канал ствола; 7 – металюний елемент; 8 – світлоповертаюча поверхня, що нанесена на металюний елемент; 9 – первинний лазерний промінь; 10, 11 – зондувальні промені; 12 – випромінювання, що є результатом інтерференції чотирьох відбитих від світлоповертаючого покриття променів

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

При практичній реалізації засобу вимірювання доцільно перетворювати аналоговий сигнал на цифровий з подальшим застосуванням алгоритму швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), який дозволяє визначати спектральний склад вимірювального сигналу. Для виконання розрахунків, пов'язаних з алгоритмом ШПФ, 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 ЗВ, оскільки передбачають використання електромагнітних хвиль в радіодіапазоні, врізання окремих елементів в КС, а також мають відмінності в умовах проведення вимірювань [8–10].

Тому у літературних джерелах відсутній аналіз похибок ЗВШР МЕ в КС, та на даний час залишається невирішеною проблема [11] кількісної оцінки впливу характеристик такого ЗВ на точність вимірювань.

3. Мета і задачі роботи

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

Для досягнення мети поставлено та вирішено наступні задачі:

- визначено джерела похибок засобу вимірювання;
- встановлено зв'язок між характеристиками складових похибок і впливними величинами;
- проведений аналіз джерел похибок;
- проведені кількісні оцінки джерел похибок;
- розроблено математичну модель похибки засобу вимірювання.

4. Методика теоретичного та експериментального дослідження похибок засобу вимірювання швидкості руху металюного елемента в каналі ствола

В роботі були визначені основні параметри елементів оптичної схеми ЗВШР МЕ в КС, відхилення яких від їх номінальних значень призводять до появи складових похибок. Для кожного з цих параметрів отримано вираз для відповідної складової відносної похибки вимірювання. Запропоновано методику моделювання похибки обчислювального компоненту ЗВШР на основі чисельного 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 домінуючої гармоніки та її порівнянні з розрахунковими (еталонними) даними. Вираз для похибки ЗВ, зумовленої обертальним рухом МЕ, отримано на основі аналізу розташування в просторі складових векторів ШР точки поверхні, у якій відбувається зондування

МЕ лазерними променями. Об'єднання складових інструментальної похибки виконане з урахуванням кореляційних зв'язків між ними.

5. Результати дослідження похибок засобу вимірювання швидкості руху металюного елемента в каналі ствола

Проводячи аналіз схеми ЗВШР МЕ в КС (рис. 1), методу вимірювання, особливостей явища пострілу (короткочасність процесу, малі габаритні розміри КС, наявність обертання МЕ в КС та ін.), визначимо основні джерела складових його інструментальної похибки, а також проведемо дослідження впливу вказаних джерел на похибку засобу вимірювання.

Виникнення інструментальної похибки ЗВШР МЕ в КС обумовлюється:

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

За технологічних або експлуатаційних відхилень параметри елементів оптичної схеми можуть набувати приростів Δf , $\Delta \alpha$, $\Delta \beta$, кожний з яких змінить 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 (2)–(7) вирази для абсолютних ΔF_f , ΔF_α , ΔF_β та відносних δF_f , δF_α , δF_β відхилення ДЗЧ можна подати у вигляді

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

$$\delta F_f = \frac{F - F_f'}{F}, \quad (9)$$

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

Використовуючи формулу для різниці косинусів, отримаємо

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

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 й вираз для ΔF_β

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

Відносні відхилення подамо у вигляді

$$\delta F_\alpha = \left(\frac{F - F'_\alpha}{F} \right), \quad (15)$$

$$\delta F_\beta = \frac{F - F'_\beta}{F}. \quad (16)$$

Проведемо кількісну оцінку цих складових.

Для визначення довжини хвилі лазерного випромінювання застосовують високоточний вимірювач довжини хвилі лазерного випромінювання SHR [13]. Даний ЗВ 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 металюного елемента).

Куті спрямування лазерних променів α та β визначаються за допомогою гоніометрів-спектрометрів (ГС) [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), виразу (1) і виразів (15,16) слідує, що максимальне значення похибок пов'язане з використанням зброї із малим калібром та довгим стволом, а також високою швидкістю руху металюного елемента (наприклад, АК-74 калібру 5,45 мм, із довжиною каналу ствола 372 мм та дульною швидкістю руху МЕ 900 м/с). Так, при вихідних значеннях для 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, що притаманні зброї з більшим калібром та меншою довжиною каналу ствола, а також меншою дульною швидкістю, наприклад, 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. Метод визначення цієї похибки полягає у встановленні різниці між значенням ДЗЧ, яке отримане за результатами ШПФ, і заданим (еталонним) його значенням.

Частота сигналу із ПЧМ змінюється за законом поліному n-го ступеню. Нормований сигнал із ПЧМ можна представити у вигляді

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

Сигнал із ПЧМ 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 обирається 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 в фотоприймачеві і провідниках, при проведенні обчислювального експерименту до ПЧМ сигналу (17) додатково вводиться флуктуаційний шум u_ϕ , а також стаціонарна полігармонічна завада u_3

$$y_3 = \sum_{j=1}^l K_j \sin(\omega_j t), \quad (18)$$

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

Отже, синтезований сигнал має вигляд

$$y_{\text{зар}} = y + y_3 + y_\phi. \quad (19)$$

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

Методика обробки синтезованого сигналу полягає в такому:

- обирається точка n на вісі 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 $F_{n \text{ осн}}$ основної гармоніки, яка є домінуючою;
- визначається похибка обчислювального компонента у відносній формі.

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

За запропонованою методикою для найбільш характерних (для реальних зразків стрілецької зброї) наборів вихідних даних було проведено моделювання похибки обчислювального компонента ЗВ ШР в математичному пакеті OriginPro. Наприклад, синтезувалися та оброблялися сигнали з тривалістю 0,003 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 інтервальне значення відносної похибки $\delta F_{ок}$ становить $\pm 0,13...0,4\%$.

Обертальний рух металюного елемента в каналі ствола спричинений наявністю нарізів в каналі ствола. Зазвичай, нарізи мають постійний нахил по всій довжині нарізної частини каналу ствола (нарізи постійної крутизни). Однією з основних характеристик нарізів в каналі ствола є довжина їх ходу η [2], яка дорівнює шляху МЕ, протягом якого останній здійснює один повний оберт навколо поздовжньої осі.

Розглянемо характер впливу обертального руху МЕ в каналі ствола на значення ДЗЧ F.

В загальному випадку точка зондування МЕ лазерними променями не лежить в площині зондування, а може зсуватися в поперечному напрямку на певну відстань r від центру обертання МЕ.

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

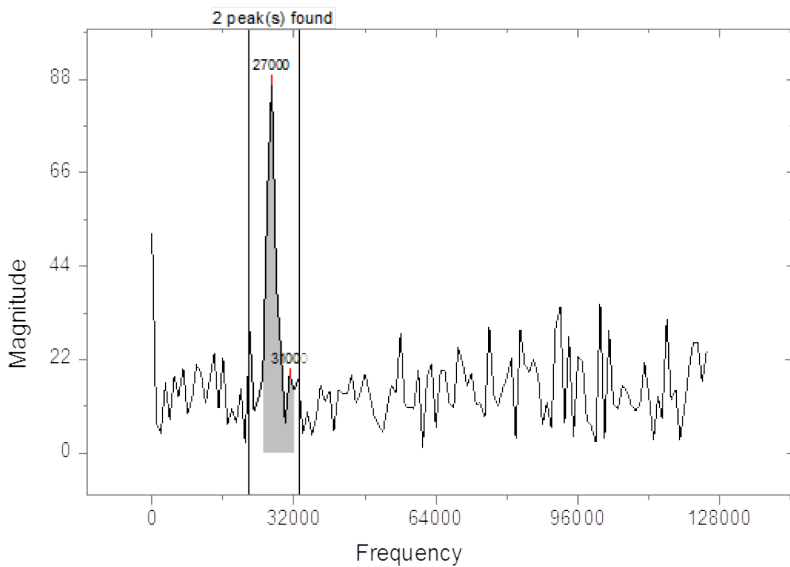


Рис. 2. Спектральний аналіз сигналу з використанням програми OriginPro

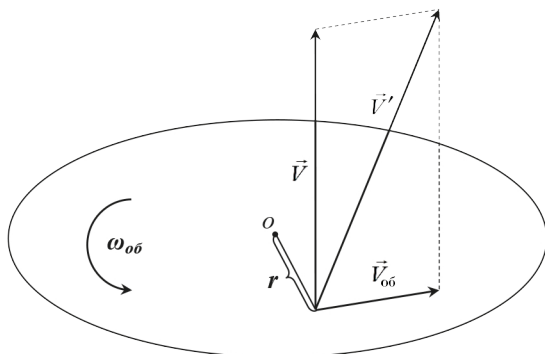


Рис. 3. Розташування векторів \vec{V} , $\vec{V}_{об}$, \vec{V}' в просторі

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

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

Оскільки вектор \vec{V}' відхиляється від вектору \vec{V} , але обидва вони залишаються в площині зондування, значення кутів спрямування лазерних променів на металюний елемент зміняться на кут ϕ (рис. 4), спотворені кути зондування α' та β' становитимуть $\alpha' = \alpha + \phi$, $\beta' = \beta + \phi$.

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

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

Продиференціюємо вираз (22) за часом

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

Оскільки $\frac{d\phi}{dt}$ є кутовою швидкістю ω ,

а $\frac{dl}{dt}$ – лінійною швидкістю руху металюного елемента V, отримаємо

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

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

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

Відносну похибку вимірювання ДЗЧ $\delta F_{об}$ 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

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

після скорочень отримаємо

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

Враховуючи вирази (21) та (24), значення кутів α' та β' , а також скориставшись тригонометричними формулами приведення, отримаємо вираз для $\delta F_{об}$

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

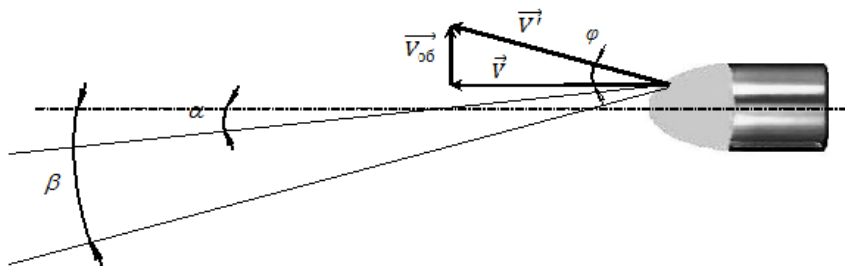


Рис. 4. Кути α , β та φ в площині зондування

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 при $\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \sqrt[3]{1 + \Delta x} = 1 + \frac{\Delta x}{2}$ [12], після відповідних перетворень отримаємо

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

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

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

Із виразу (31) можна побачити, що відносна похибка вимірювання ДЗЧ $\delta F_{\text{об}}$, що викликана обертальним рухом металнього елемента, залежить тільки від довжини ходу нарізів η та значення r (відстані від центру МЕ до місця його контакту з лазерним променем).

Проведемо кількісну оцінку похибки $\delta F_{\text{об}}$ для вихідних даних, що відповідають відомим зразкам стрілецької зброї. Так, для 9 мм ПМ $\eta=280$ мм, 5,45 мм АК-74 $\eta=200$ мм, 7,62 мм СВД $\eta=240$ мм. Відповідно, для 9 мм ПМ $\delta F_{\text{об}} \leq 0,4\%$ (при $r=4$ мм), для 5,45 мм АК-74 $\delta F_{\text{об}} \leq 0,24\%$ (при $r=2,2$ мм), для 7,62 мм СВД $\delta F_{\text{об}} \leq 0,37\%$ (при $r=3,3$ мм). Відзначимо, що r залежить як від характеристик зразка зброї, так і від відхилення точки зондування поверхні МЕ від його поздовжньої вісі (таке відхилення зумовлене похибкою юстирування оптичної схеми за допомогою гоніометру). Для усіх можливих наборів вихідних даних граничне значення похибки $\delta F_{\text{об}}$ знаходиться в інтервалі 0,24...0,4 %.

Вираз для підсумкової інструментальної похибки отримаємо з урахуванням кореляційного зв'язку між складовими δF_f , δF_α , δF_β , $\delta F_{\text{ок}}$, $\delta F_{\text{об}}$, який має місце внаслідок застосування одного засобу вимірювання для обох кутів α і β :

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

Кількісне оцінювання за виразом (32) дозволяє стверджувати, що межа допустимої відносної похибки ЗВШР знаходиться в межах $\pm 0,22...0,73\%$.

6. 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 впливними величинами, отримані математичні моделі складових похибки засобу вимірювання. Проведені кількісні оцінки складових похибки, показано, що гранична похибка засобу вимірювання може бути забезпечена на рівні $\pm 0,22...0,73\%$.

Результати роботи можуть бути використані під час досліджень, спрямованих на 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.

Література

1. Серебряков, М. Е. Внутренняя баллистика [Текст] / М. Е. Серебряков – М.: Оборониздат ГИОП, 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. Перспективы экспериментального значения баллистических элементов пострілу [Текст] / О. М. Крюков, В. Г. Мудрик // Збірник наук. праць Акад. ВВ МВС України. – 2013. – Вип. 1. – С. 21–24
4. Патент: 88172 Україна, МПК G 01 S 17/02 (2006.01) Лазерний доплерівський вимірювач швидкості руху металнього елемента в каналі ствола [Текст] / Крюков О. М., Доля Г. М., Мудрик В. Г. – Заявл. 10.06.2013; Опубл 11.03.2014; – 8 с.
5. Крюков, А. М. Дифференциальная лазерная доплеровская анемометрия объектов со световозвращающей поверхностью [Текст] / А. М. Крюков, Г. Н. Доля, В. Г. Мудрик // ХНУРЭ : науч.-техн. журнал. X. : Прикладная радиоэлектроника, – 2013. – Т. 12, № 3. – С. 436–441.
6. Крюков, О. М. Лазерний доплерівський засіб вимірювання швидкості руху металнього елемента в каналі ствола: будова та оброблення вимірювальної інформації [Текст] / О. М. Крюков, Г. М. Доля, В. Г. Мудрик, О. А. Надь, О. А. Коваль // ХНУРЕ: наук. -виробн. журнал. X.: 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. 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, НКИ 342/105; 73/167. – 6 p.
9. Patent 4457206 США, МКИ G 01 S 13/58; F 42 C 17/04. Microwave – type projectile communication apparatus for guns [Text] / Touslios P. P., Hartman K. – № 06/269,489; claimed 02.06.1981; published 03.07.1984, НКИ 89/14.5. – 37 p.
10. 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, НКИ G 01 S 13/58 F; G 01 P 3/66 B. – 8 p.
11. Крюков, О. М. Проблеми вимірювального контролю параметрів внутрішньобалістичних процесів [Текст] / О. М. Крюков, О. А. Александров // Честь і закон. – 2009. – № 2. – С. 79–89
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/>
14. Гониометр-спектрометр [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.rostest.ru/Goniometer%20spectrometer%20GS-2.php>

Проаналізовано причини відмов циліндрових втулок бурових помп. Розроблено метод вібраційно-відцентрового зміцнення для забезпечення надійності деталей типу «втулка». Адаптовано вібромашину об'ємного оброблення для поверхневого вібраційно-відцентрового зміцнення, приведено принципову схему установки та технологічне оснащення для його реалізації. Опрацьовано та проаналізовано профілограми віброзміцнених поверхонь. Намічено шляхи подальших досліджень

Ключові слова: технологія, надійність, безвідмовність, циліндрова втулка, поверхневий шар, вібраційно-відцентрове зміцнення

Проанализированы причины отказов цилиндрических втулок буровых насосов. Разработан метод вибрационно-центробежного упрочнения для обеспечения надежности деталей типа "втулка". Адаптирована вибромашина объемной обработки для поверхностного вибрационно-центробежного упрочнения, приведена принципиальная схема установки и технологическая оснастка для его реализации. Обработаны и проанализированы профилограммы виброупрочненных поверхностей. Намечены пути дальнейших исследований

Ключевые слова: технология, надежность, безотказность, цилиндрическая втулка, поверхностный слой, вибрационно-центробежное упрочнение

УДК 621.9.048.6

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.36336

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ВІБРАЦІЙНО- ВІДЦЕНТРОВОГО ЗМІЦНЕННЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗВІДМОВНОСТІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Я. М. Кусий

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: jarkym@ukr.net

А. М. Кук

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: andrij.kuk@gmail.com

*Кафедра технології машинобудування
Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

1. Вступ

Науково-технічний прогрес сприяв інтенсивному зростанню складності машин і систем [1], що спричинило ускладнення технологій виготовлення виробів та складання вузлів.

Пріоритетним завданням при проектуванні раціональних технологічних процесів виготовлення деталей машин є взаємодія (узгодження) їх якісних і кількісних показників. При реалізації сучасних технологій намагаються, як правило, забезпечити високий рівень технічних вимог, високу продуктивність процесу та максимально можливе завантаження технологічного обладнання.

Однак нерідко ігноруються характеристики надійності, які проявляються під час експлуатації виробів (рис. 1), хоча саме безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність і збережливість, як основні показники надійності, забезпечують бажаний ресурс роботи деталей машин [2, 3]. Критерій надійності – один з основних критеріїв при створенні складних технічних систем [4], причому рівень надійності в значній мірі визначає розвиток техніки по основних напрямках: автоматизації виробництва, інтенсифікації робочих процесів, економії матеріалів і енергії [5, 6]. Від надійності залежать безпека, економічність, ресурсозбережливність, конкурентоздатність [7, 8].