УДК 623.482+62-408.64:531.715.2+53.082.531

О. М. Крюков

О. О. Мігура

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОПТИКО-МЕХАНІЧНОГО ДАТЧИКА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАНАЛІВ СТВОЛІВ ВОГНЕПАЛЬНОЇ ЗБРОЇ

Досліджено характеристики оптико-механічного датчика для вимірювального контролю геометричних характеристик каналів стволів вогнепальної зброї.

Розглянуто особливості побудови та базові геометричні параметри оптико-механічного датчика. Отримано вираз для зв'язку кута між оптичною віссю приймальної лінзи і світлочутливим детектором з іншими базовими геометричними параметрами оптико-механічного датчика.

Визначено функцію перетворення оптико-механічного датчика, яка встановлює зв'язок приросту координати світлової плями на поверхні світлочутливого детектора від приросту радіуса каналу ствола, а також отримано вираз для розв'язання оберненої задачі. Проведено дослідження лінійності функції перетворення оптико-механічного датчика та характеру змінювання його чутливості в межах діапазону вимірювань.

Ключові слова: *засіб вимірювання, оптико-механічний датчик, геометрична характеристика, канал ствола, тріангуляційний метод, функція перетворення, математична модель.*

Постановка проблеми. Досвід застосування нарізної та гладкоствольної зброї показує, що ефективність виконання вогневого завдання значною мірою залежить від технічного стану каналу ствола (КС) [1]. У процесі бойового застосування вогнепальної зброї ствол виступає як пошкоджуваний елемент [2, 3]. Протягом терміну експлуатації на поверхню каналу ствола будь-якого зразка зброї впливають різні фактори, внаслідок діяння яких він піддається механічному зносу, що може призвести до неможливості забезпечення заданої ефективності стрільби [1].

Відомі методи і засоби діагностування і контролю технічного стану каналів стволів є недостатньо ефективними (з позиції достовірності, оперативності, а іноді й економічності контролю), оскільки спираються на застарілі принципи (наприклад, інколи ґрунтуються навіть на окомірному способі) та передбачають застосування засобів вимірювань обмеженої точності. Недоліком деяких засобів вимірювання геометричних параметрів КС є наявність значного суб'єктивного аспекту, який залежить від кваліфікації оператора й умов виконання вимірювань. Крім того, навіть сучасні засоби вимірювального контролю параметрів КС характеризуються суттєвими обмеженнями щодо їхнього застосування у польових умовах або пристосованості для діагностування повної номенклатури зразків вогнепальної зброї Національної гвардії України (НГУ) [10, 11].

З огляду на обмежені можливості традиційних засобів контролю технічного стану КС перспективним видається створення оптико-механічного засобу вимірювання, побудованого на основі тріангуляційного методу визначення відстаней із застосуванням лазерного випромінювання для зондування досліджуваної поверхні. Загальний принцип вимірювання полягає у спрямуванні лазерного променю на досліджувану поверхню, формуванні на ній світлової плями та прийманні відбитого випромінювання, параметри якого несуть вимірювальну інформацію про відхилення точки поверхні від вихідного (номінального) положення. Однак, незважаючи на достатній ступінь вивченості тріангуляційного методу визначення відстаней, актуальним залишається комплекс завдань, спрямованих на побудову схем засобів діагностування, адаптованих до умов виконання вимірювань усередині КС вогнепальної зброї, та розроблення математичного опису відповідних перетворень вимірювальної інформації.

© О. М. Крюков, О. О. Мігура, 2023

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Опис конструкції та принцип роботи засобів вимірювання, в основу яких покладено оптико-механічний датчик переміщень, розглядаються у значній кількості публікацій. Наприклад, у працях [4, 5, 6] проведено аналіз сучасних методів діагностування технічного стану каналів стволів, запропоновано та обґрунтовано доцільність створення оптико-механічного засобу вимірювання геометричних характеристик поверхонь каналів стволів, сформульовано основні наукові завдання, пов'язані з практичною реалізацією такого засобу вимірювання. У публікації [7] досліджено принципи побудови оптико-механічних датчиків положення. У праці [8] викладено принцип дії та аналізу характеристик перетворювачів переміщень і відстаней на електричні величини. У навчальному посібнику [9] наведена класифікація методів сканування, описано тріангуляційні системи та методи.

Інформація, що міститься у патентній документації [10, 11], стосується лише складу, особливостей компонування тріангуляційних датчиків та зв'язків між їхніми елементами. У джерелах інформації [12, 13, 14] розглядаються методи і засоби вимірювання геометричних характеристик внутрішніх поверхонь циліндричних отворів, у них також подані окремі відомості про програмне забезпечення для оброблення результатів вимірювань.

Проте у зазначених джерелах не висвітлюється інформація, яка стосується процесів перетворення вимірювальної інформації. Таким чином, незважаючи на наявність значної кількості публікацій за цим напрямом, у них бракує постановки та вирішення завдання, спрямованого на розроблення і дослідження математичних основ процесу отримання й оброблення вимірювальної інформації та побудову математичної моделі засобу вимірювання.

Метою статті є обґрунтування базових математичних співвідношень для оптико-механічного датчика, який базується на тріангуляційному методі визначення відстаней, та дослідження його математичної моделі, що відображає залежність вихідної величини датчика від вимірюваного геометричного параметра каналу ствола.

Виклад основного матеріалу. Принцип роботи оптико-механічного датчика (ОМД) для засобу вимірювання геометричних характеристик КС базується на тріангуляційному методі визначення відстані до контрольованої поверхні об'єкта, а саме – на розрахунку шуканої відстані через відношення трикутника із застосуванням відомих геометричних параметрів системи. Цей метод дозволяє вимірювати зміну відстані від опорної точки датчика до контрольованої поверхні.

Оптична схема ОМД умовно поділяється на дві частини: випромінювальну та приймальну (рис. 1).

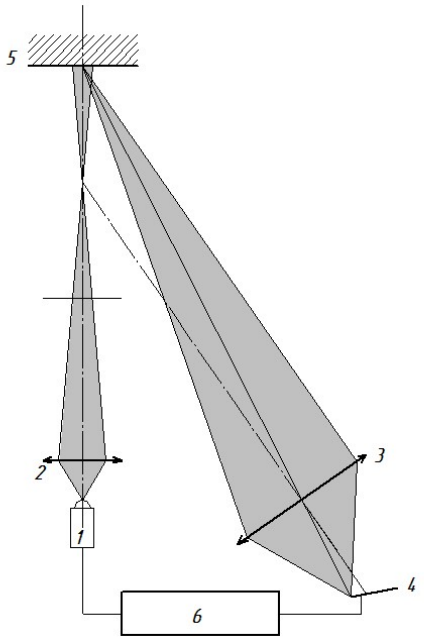

Рисунок 1 – Оптична схема ОМД

Випромінювальна містить такі основні елементи, як джерело лазерного випромінювання 1 та фокусувальна лінза 2, а приймальна частина – приймальну лінзу 3 та світлочутливий детектор 4, який являє собою лінійку світлочутливих елементів (чарунок), якими можуть виступати, наприклад, фотодіоди.

Оскільки товщина приймальної лінзи є малою відносно радіусів сферичних поверхонь, що її утворюють, вважатимемо її тонкою лінзою [15].

Під час роботи ОМД лазерне випромінювання дифузно відбивається від об'єкта вимірювання 5, певна його частка проходить крізь приймальну лінзу 3, фокусується та падає на відповідну чарунку світлочутливого детектора 4. Розташування елементів ОМД є узгодженим та фіксованим у просторі. У разі зміщення точки, від якої відбивається лазерне випромінювання на об'єкті вимірювання 5, світлова пляма на поверхні світлочутливого детектора 4 також відповідно переміщується. Оброблення сигналів з виходу світлочутливого детектора 4, які несуть інформацію про освітленість точок лінійки світлочутливих елементів та про відстань до

об'єкта вимірювання 5, покладається на мікропроцесорний контролер 6.

Одним із важливих завдань під час обґрунтування особливостей побудови ОМД є отримання співвідношень, які визначають зв'язок між базовими геометричними параметрами його оптичної схеми. Крім того, окремий інтерес становить і дослідження обмежень, які накладаються на параметри ОМД і зумовлюються специфічними умовами виконання вимірювань.

До основних вихідних геометричних параметрів оптичної схеми ОМД (рис. 2) відносять відстань r від центра приймальної лінзи 3 до точки перетину A головних оптичних осей фокусувальної 2 і приймальної 3 лінз (відрізок AO), відстань r' від центра приймальної лінзи 3 до світлочутливого детектора 4 (відрізок $A'O$), а також кут α між оптичними осями фокусувальної 2 і приймальної 3 лінз та кут β між оптичною віссю приймальної лінзи 3 і світлочутливим детектором 4.

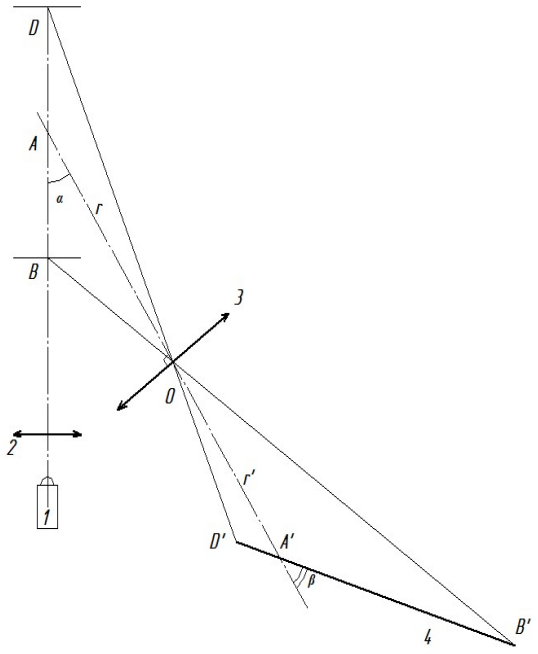

Рисунок 2 – Графічне відображення основних геометричних параметрів ОМД

Співвідношення між r і r' залежить від фокусної відстані f приймальної лінзи 3 і визначається основною формулою для тонкої лінзи [16]:

$$\frac{1}{r}+\frac{1}{r'}=\frac{1}{f}. \qquad (1)$$

Місце розташування у просторі та розміри проекції діапазону вимірювання $B'D'$ (і активної ділянки світлочутливого детектора) розраховуються за законами геометричної оптики. Основними геометричними параметрами, що визначають розташування світлочутливого детектора, є довжина його активної ділянки $B'D'$, відстань r' та кут β нахилу до головної оптичної осі приймальної лінзи.

Вираз для кута β визначатиметься на основі тригонометричних перетворень вихідних параметрів з урахуванням основної формули для тонкої лінзи (1). Встановимо зв'язок кута β з іншими геометричними параметрами ОМД (рис. 3).

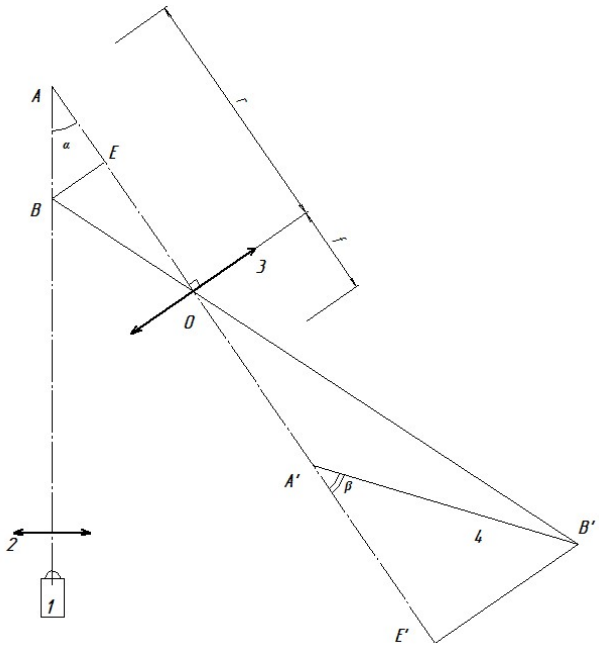

Рисунок 3 – Оптична схема ОМД для визначення кута β

Оптичний центр приймальної лінзи розташований у точці O, а її головна оптична вісь перетинає головну оптичну вісь фокусувальної лінзи в точці A під кутом α.

Розглянемо трикутники AOB та $A'OB'$, які були утворені головною оптичною віссю AA' і відрізками AB (напівдіапазон вимірювання) та $A'B'$ (проєкція AB). До зазначених трикутників входять вертикальні кути AOB та $A'OB'$. Проведемо добудови в цих трикутниках, зокрема опустити перпендикуляри з вершин B та B' на головну оптичну вісь приймальної лінзи, які перетнуться з нею у точках E та E'

відповідно. З трикутника $A'B'E'$ одержимо вираз для визначення кута β:

$$\mathrm{tg}\beta = \frac{B'E'}{A'E'}. \quad (2)$$

Ураховуючи той факт, що трикутники BOE та $B'OE'$ є подібними (за першою ознакою подібності трикутників), отримаємо вираз для визначення $B'E'$:

$$B'E' = \frac{OE' \cdot BE}{OE}. \quad (3)$$

Використовуючи формулу тонкої лінзи (1), можна дістати вираз для OE':

$$OE' = \frac{OE \cdot f}{OE - f} = \frac{(AO - AB \cdot \cos\alpha) \cdot f}{(AO - AB \cdot \cos\alpha) - f} \quad (4)$$

при

$$OE = AO - AB \cdot \cos\alpha. \quad (5)$$

Підставивши вирази (4) та (5) у формулу (3), записують

$$B'E' = \frac{AB \cdot f \cdot \sin\alpha}{AO - AB \cdot \cos\alpha - f}, \quad (6)$$

а використовуючи формулу тонкої лінзи (1), отримаємо

$$A'O = \frac{AO \cdot f}{AO - f}, \quad (7)$$

$$A'E' = OE' - A'O. \quad (8)$$

Підставивши вирази (4)–(8) у формулу (2) та вважаючи $AO = r$, після перетворень одержимо

$$\mathrm{tg}\beta = \mathrm{tg}\alpha \cdot \left(\frac{r}{f} - 1\right). \quad (9)$$

Таким чином, вираз для визначення кута β набирає вигляду

$$\beta = \mathrm{arctg}\left(\mathrm{tg}\alpha \cdot \left(\frac{r}{f} - 1\right)\right). \quad (10)$$

Варто зауважити, що кут β є одним із базових геометричних параметрів оптичної схеми ОМД. Він визначає кутове положення світлочутливого детектора відносно головної оптичної осі приймальної лінзи та впливає на функцію перетворення ОМД.

Як зазначено вище, під час застосування ОМД реалізується відносне вимірювання відстані, при цьому вхідною (вимірюваною) величиною є приріст Δx радіуса КС відносно його номінального значення, а вихідною – відповідний приріст Δz координати світлової плями на поверхні світлочутливого детектора відносно її первинного положення. Для отримання математичної моделі ОМД доповнимо його оптичну схему додатковими побудовами і позначеннями (рис. 4).

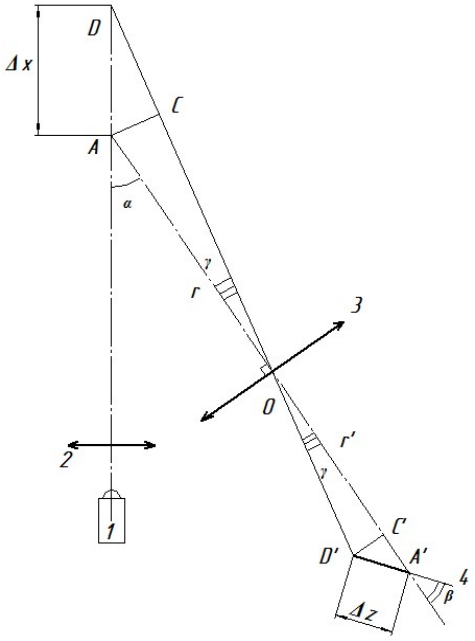

Рисунок 4 – Відображення вхідної та вихідної величин на оптичній схемі ОМД

Промінь від джерела лазерного випромінювання 1 фокусується лінзою 2 у точці A, яка є серединою діапазону вимірювання.

Далі визначимо функцію перетворення ОМД, яка встановлює зв'язок приросту Δz координати світлової плями на поверхні світлочутливого детектора від приросту Δx радіуса КС. Для цього розглянемо випадок приросту Δx радіуса КС, який дорівнює половині діапазону вимірювання, що обмежується відрізком AD. Проєкція цього відрізка на поверхню світлочутливого детектора являє собою відрізок $A'D'$, довжина якого становить Δz.

Розглянувши трикутник AOD, з нього виведемо вираз для визначення кута γ:

$$AC = AO \cdot \sin\gamma, \; AC = \Delta x \cdot \sin(\alpha - \gamma). \quad (11)$$

З виразів (11) складають рівняння

$$AO \cdot \sin\gamma = \Delta x \cdot \sin(\alpha - \gamma), \quad (12)$$

з якого дістанемо вираз для визначення кута γ:

$$\mathrm{tg}\gamma = \frac{\Delta x \cdot \sin\alpha}{AO - \Delta x \cdot \cos\alpha}. \qquad (13)$$

Розглянувши трикутник $A'OD'$, з нього також отримаємо вирази, що містять значення кута γ:

$$D'C = \mathrm{tg}\gamma \cdot (r' - A'C),\ DC = \Delta z \cdot \sin\beta, \qquad (14)$$

де

$$A'C = \Delta z \cdot \cos\beta. \qquad (15)$$

З виразів (14) знайдемо рівняння

$$\Delta z \cdot \sin\beta = \mathrm{tg}\gamma \cdot (r' - \Delta z \cdot \cos\beta), \qquad (16)$$

з якого після підстановки формули (13) одержимо функцію перетворення ОМД:

$$\Delta z = \frac{\Delta x \cdot r' \cdot \sin\alpha}{r \cdot \sin\beta + \Delta x \cdot \sin(\alpha + \beta)}. \qquad (17)$$

З урахуванням виразів (1) та (10) зобразимо функцію перетворення в остаточному вигляді:

$$\Delta z = \frac{\Delta x \cdot \sin\alpha \cdot \left(\frac{r \cdot f}{r - f}\right)}{r \cdot \sin\left(\mathrm{arctg}\left(\mathrm{tg}\alpha \cdot \left(\frac{r}{f} - 1\right)\right)\right) + \Delta x \cdot \sin\left(\alpha + \mathrm{arctg}\left(\mathrm{tg}\alpha \cdot \left(\frac{r}{f} - 1\right)\right)\right)} \qquad (18)$$

Проведемо дослідження функції перетворення на прикладі ОМД, що адаптований для вимірювань геометричних характеристик КС 30-мм автоматичної гармати ЗТМ-1 (при цьому найбільш характерним сполученням параметрів буде r = 14 мм, f = 5 мм, α = 30°). Графік функції перетворення для прикладу, що розглядається, наведено на рис. 5.

Однак практична реалізація алгоритму оброблення вимірювальної інформації потребуватиме обчислення значення вхідної величини Δx на основі вимірювальної інформації про вихідну величину Δz на основі виразу, що є оберненим до формули (17). Після виконання алгебраїчних перетворень отримаємо вираз для функції, що є оберненою до формули (17):

$$\Delta x = \frac{\Delta z \cdot r \cdot \sin\beta}{r' \cdot \sin\alpha - \Delta z \cdot \sin(\alpha + \beta)}, \qquad (19)$$

а з урахуванням виразів (1) та (10) остаточно запишемо

$$\Delta x = \frac{\Delta z \cdot r \cdot \sin\left(\mathrm{arctg}\left(\mathrm{tg}\alpha \cdot \left(\frac{r}{f} - 1\right)\right)\right) \cdot}{\left(\frac{r \cdot f}{r - f}\right) \cdot \sin\alpha - \Delta z \cdot \sin\left(\alpha + \mathrm{arctg}\left(\mathrm{tg}\alpha \cdot \left(\frac{r}{f} - 1\right)\right)\right)} \qquad (20)$$

Графік функції (20) для параметрів ОМД, що адаптований для вимірювань геометричних характеристик КС 30-мм автоматичної гармати ЗТМ-1, наведено на рис. 6.

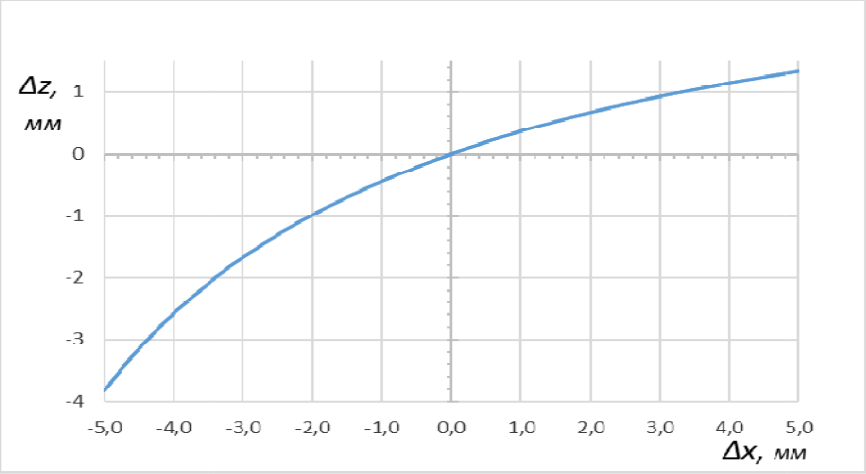

Рисунок 5 – Графік функції перетворення ОМД, що адаптований до параметрів 30-мм гармати ЗТМ-1

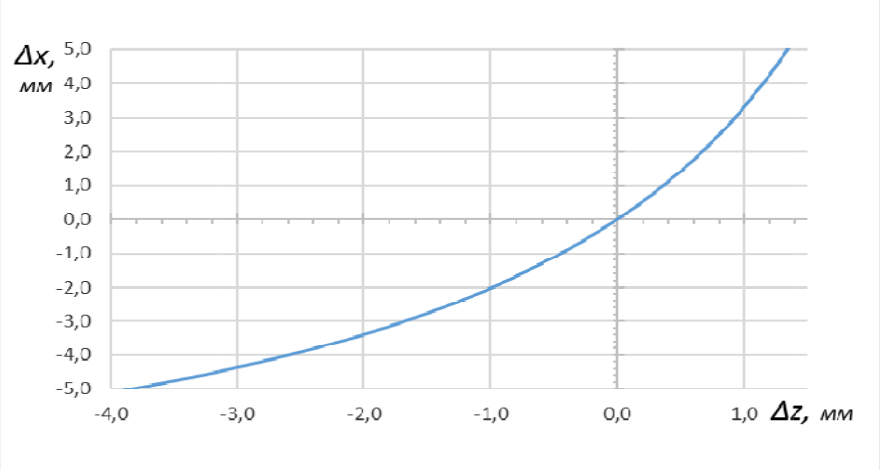

Рисунок 6 – Графік функції Δx(Δz)

Аналіз цих графіків свідчить про те, що вирази (18) і (20) є застосовними до всього діапазону вимірювання, оскільки функція перетворення є безперервною, а її значення для від'ємної частини діапазону вимірювання відповідають третьому квадранту прямокутної системи координат.

Крім того, оскільки функція перетворення є нелінійною, чутливість засобу вимірювання зменшується від початку діапазону вимірювання до його кінця. Зокрема, у разі розташування діапазону вимірювання симетрично відносно точки фокусування зондувального променя найбільша чутливість досягається саме на його початку. З одного боку, це вимагатиме додаткових алгоритмічних заходів з лінеаризації під час реалізації виразу (20) для обчислення параметрів КС. З іншого боку, найбільша чутливість на початку діапазону вимірювання позитивно впливатиме на достовірність контролю технічного стану зброї, оскільки саме ця частина діапазону вимірювань відповідає початковій стадії зношування КС, за якої його радіус лише незначною мірою перевищує номінальне значення.

Отже, отримані вирази для функції перетворення (18) та оберненої до неї функції (20) є математичною моделлю ОМД для вимірювання геометричних характеристик КС вогнепальної зброї. Ці співвідношення можуть бути використані як під час побудови математичних моделей похибок засобу вимірювання, так і під час розроблення рекомендацій щодо алгоритму оброблення вимірювальної інформації.

Висновки

Проведено аналіз оптичної схеми оптико-механічного датчика для вимірювання геометричних характеристик каналу ствола вогнепальної зброї, обґрунтовано доцільність подання його математичної моделі у вигляді функції перетворення.

Обґрунтовано вираз для задавання одного з базових геометричних параметрів ОМД – кута між оптичною віссю приймальної лінзи і світлочутливим детектором. Цей вираз визначає взаємне розташування певних елементів ОМД у просторі і має бути врахований як обмеження під час практичної реалізації датчика.

Одержано математичну модель ОМД для вимірювання геометричних характеристик КС вогнепальної зброї, яку подано у вигляді його функції перетворення, що відображає залежність приросту координати світлової плями на поверхні світлочутливого детектора від приросту радіуса каналу ствола, а також вираз, обернений до функції перетворення. Проведено аналіз таких залежностей та показано, що чутливість засобу вимірювання на основі ОМД є змінною і зменшується від початку діапазону вимірювання до його кінця. Цей фактор позитивно позначиться на достовірності контролю технічного стану зброї, але має бути врахований під час алгоритмізації обчислення параметрів КС.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на оцінювання складових похибки датчика та експериментальну перевірку адекватності отриманої математичної моделі.

Перелік джерел посилання

1. Шерешевский М. С., Гонтарев А. Н., Минаев Ю. В. Эффективность стрельбы из автоматического оружия. Москва : ЦНИИ информации, 1979. 310 с.

2. Артиллерия: веб сайт. URL: http://www.nnre/tehnicheskie_nauki/artilerija /indeks.php (дата обращения: 02.01.2023).

3. Modeling of the process of the shot based on the numerical solution of the equations of internal ballistics / O. Kriukov et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.155357.

4. Крюков О. М., Мельников Р. С., Музичук В. А. Метод діагностування технічного стану каналів стволів та боєприпасів на основі ідентифікації характеристик балістичних елементів пострілу. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків : НА НГУ, 2018. Вип. 2 (32). С. 5–11.

5. Крюков О. М. Принцип побудови засобу вимірювання геометричних характеристик поверхонь каналів стволів. *Системи обробки інформації*. 2016. № 6 (143). С. 69–71.

6. Крюков О. М. Перспективний метод вимірювального контролю геометричних характеристик поверхонь каналів стволів вогнепальної зброї. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків : НА НГУ, 2016. Вип. 2 (27). С. 5–8.

7. Виглеб Г. Датчики. Москва : Мир, 1989. 196 с.

8. Полищук Е. С. Измерительные преобразователи. Киев : Вища школа, 1990. 480 с.

9. Гужов В. И. Методы измерения 3D-профиля объектов : учеб. пособие. Новосибирск : НГТУ, 2015. 82 с.

10. Способ измерения износа канала ствола и устройство для его осуществления (варианты) : пат. 2368885 РФ, МПК G 01 N 3/56, G 01 B13/12, F 41 A 31/02. заявл. 05.07.2007; опубл. 27.09.2009, Бюл. № 27. 9 с.

11. Лазерный триангуляционный датчик для измерения отверстий малого диаметра : пат. PCT/RU2016/000163. заявл. 11.05.2016; опубл. 28.09.2017. Номер МПК WO 2017/164761 A1. 27 с.

12. Средства измерительной техники, оптические датчики : веб сайт. URL: http://surl.li/forpx (дата обращения: 02.01.2023).

13. Засоби вимірюваної техніки, оптичні датчики : веб сайт. URL: http://surl.li/fvhoi (дата звернення: 02.01.2023).

14. Засоби вимірюваної техніки, оптичні датчики : веб сайт. URL: http://surl.li/forqy (дата звернення: 02.01.2023).

15. Болсун И. Б., Рапанович Е. Н. Словарь физических и астрономических терминов. Минск : Народная асвета, 1986. 223 с.

16. Кухлинг Х. Справочник по физике. Москва : Мир, 1982. 520 с.

Стаття надійшла до редакції 25.01.2023 р.

UDC 623.482+62-408.64:531.715.2+53.082.531

O. Kriukov, O. Migura

MATHEMATICAL MODEL OF THE OPTICAL-MECHANICAL SENSOR FOR MEASURING OF GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF FIREARMS BORES

The work is devoted to the study of the characteristics of the optical-mechanical sensor for the measurement control of geometric characteristics of firearms bores.

The results of the analysis of publications devoted to the structure and application of measuring devices based on the triangulation method of distances determining are given. The limited possibility of applying of the results obtained in known works in the creation of an optical-mechanical sensor for diagnosing of firearms bores was noted.

Features of construction and basic geometric parameters of the optical-mechanical sensor are considered. A description of the measurement method is given, which provides for the calculation of the desired distance using the known parameters of the optical scheme of the optical-mechanical sensor and the linear and angular parameters of the triangles consisting of the elements of the optical scheme of the sensor.

An expression for the dependence of the angle between the optical axis of the receiving lens and the light-sensitive detector from other basic geometric parameters of the optical-mechanical sensor was obtained using the basic formula for a thin lens. The expression determines the angular position of the light-sensitive

detector in relation to the main optical axis of the receiving lens and should be taken into account as a limitation in the practical implementation of the sensor.

The conversion function of the optical-mechanical sensor is determined, which establishes the dependence between the increment of the coordinate of the light spot on the surface of the light-sensitive detector of the sensor and the increment of the radius of the bore. An expression for solving the inverse problem – calculating the value of the input value based on measurement information about the output value – was obtained. Graphs of these functions for typical combinations of optical-mechanical sensor parameters are given. A study of the linearity of the conversion function of the optical-mechanical sensor and the nature of its sensitivity change within the range of measurement was conducted.

Keywords: *measuring device, optical-mechanical sensor, geometric characteristics, bore, triangulation method, conversion function, mathematical model.*

Крюков Олександр Михайлович – заслужений працівник освіти України, доктор технічних наук, професор, професор кафедри оперативного та логістичного забезпечення Національної академії Національної гвардії України
https://orcid.org/0000-0003-4194-6081

Мігура Олексій Олександрович – ад'юнкт Національної академії Національної гвардії України
https://orcid.org/0000-0003-0327-9839