

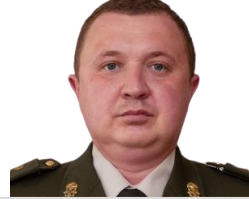
УДК 623.482+62-408.64:531.715.2+53.082.531



О. М. Крюков



О. О. Мігура



Р. С. Мельніков

НАУКОВО-МЕТОДИЧНІ І ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЛАЗЕРНОГО ТРІАНГУЛЯЦІЙНОГО ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАНАЛІВ СТВІЛІВ ВОГНЕПАЛЬНОЇ ЗБРОЇ

Стаття спрямована на обґрунтування науково-методичних і технічних основ проведення експериментальних досліджень лазерного триангуляційного засобу вимірювання геометричних характеристик каналів стволів вогнепальної зброї.

Обґрунтовано конструкцію та принцип дії експериментальної установки, надано опис та основні характеристики її елементів. Проілюстровано структурну схему експериментальної установки, визначено механічні, оптичні та інтерфейсні зв'язки між її елементами.

Розглянуто основні операції підготовки експериментальної установки до проведення досліджень. Викладено методику проведення експерименту, а також методику оброблення отриманих результатів шляхом перетворення масиву координат світлових плям на поверхні світлочутливого детектора в результати вимірювання радіуса макета ствола.

Надано рекомендації з візуалізації результатів експерименту у вигляді дво- та тривимірних графіків.

К л ю ч о в і с л о в а : експериментальна установка, лазерний триангуляційний засіб вимірювання, оптико-механічний датчик, геометрична характеристика, канал ствола, триангуляційний метод, методика експериментальних досліджень.

Постановка проблеми. Ефективність застосування вогнепальної зброї у виконанні бойових завдань безпосередньо залежить від якості періодичного контролю її технічного стану в ході експлуатації. Окрему зацікавленість фахівців викликають проблеми контролю технічного стану каналів стволів (КС) вогнепальної зброї, оскільки ствол піддається зношуванню, і у такий спосіб є пошкоджуваним елементом [1 – 5].

З огляду на обмежені можливості традиційних засобів контролю технічного стану КС перспективним видається створення оптико-механічного засобу вимірювання (ЗВ), побудованого на основі триангуляційного методу визначення відстаней із застосуванням лазерного випромінювання для зондування досліджуваної поверхні. Принцип дії такого ЗВ полягає у спрямуванні лазерного променя на поверхню КС, формуванні на ній світлової плями та прийманні відбитого випромінювання, параметри якого містять вимірювальну інформацію про значення радіуса КС у досліджуваній точці. Детально метод технічного діагностування КС вогнепальної зброї на основі лазерної триангуляції та будову відповідного оптико-механічного засобу вимірювання розглянуто у статтях [6, 7].

Незважаючи на достатній ступень вивченості триангуляційного методу визначення відстаней, актуальним залишається комплекс завдань, спрямованих на практичне створення технічних рішень, які здатні функціонувати в умовах виконання вимірювань, характерних для розташування елементів ЗВ всередині КС для широкої номенклатури зразків вогнепальної зброї. Потреба у проведенні експериментальних досліджень зумовлюється і тим фактом, що результати досліджень характеристик оптико-механічних ЗВ (наприклад, викладені у статті [7]) були отримані теоретичним шляхом із застосуванням деяких спрощень і припущень, тому вони потребують додаткової перевірки.

Нарешті, окремий інтерес викликають питання апробації запропонованого у статті [6] методу технічного діагностування КС, а також алгоритмів оброблення вимірювальної інформації.

Втім, на цей час потреба у практичній апробації комплексу технічних рішень зі створення ЗВ, побудованого на основі триангуляційного методу визначення відстаней, стикається з обмеженнями відомих теоретичних і прикладних основ експериментальних досліджень подібних пристроїв. Отже, на етапі переходу від теоретичних досліджень оптико-механічного ЗВ до розроблення практичних рекомендацій з його реалізації виникає проблема постановки і проведення експериментальних досліджень методу технічного діагностування КС вогнепальної зброї та ЗВ, побудованого на основі лазерного триангуляційного методу визначення відстаней.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Опис конструкції та принцип роботи засобів вимірювання, в основу яких покладено лазерний триангуляційний метод визначення відстаней (переміщень), наведені у значній кількості публікацій. Зокрема у статті [8] запропоновано та обґрунтовано доцільність створення оптико-механічного ЗВ геометричних характеристик поверхонь каналів стволів, сформульовано основні наукові завдання, пов'язані з практичною реалізацією такого засобу вимірювання. У статті [9] розглянуто принципи побудови лазерного триангуляційного датчика (ЛТД). У працях [10, 11] висвітлено принцип дії та наведено аналіз характеристик перетворювачів переміщень і відстаней у електричні величини. У джерелах [12, 13, 14] наведена класифікація методів сканування, описані триангуляційні системи та методи вимірювань.

У працях [15–18] розглянуто приклади дослідних установок із використанням лазерних вимірювальних датчиків, зокрема і триангуляційних, але наведена інформація є виключно довідковою, без розкриття характеристик установок та відповідних методик проведення експериментальних досліджень.

Інформація, що зазвичай викладається в патентній документації, наприклад, [19, 20], стосується лише складу, особливостей компонування триангуляційних датчиків та зв'язків між їх елементами.

У джерелах [21, 22] розглядаються методи і засоби вимірювання геометричних характеристик внутрішніх поверхонь циліндричних отворів, у них також подані окремі відомості про програмне забезпечення для оброблення результатів вимірювань.

Однак, незважаючи на наявність публікацій за даним напрямом, у жодній з відомих праць не розглядається постановка та розв'язання завдання технічного і науково-методичного забезпечення експериментальних досліджень лазерного триангуляційного ЗВ геометричних характеристик каналів стволів.

Метою статті є обґрунтування принципів побудови і конструкції експериментальної установки, а також розроблення методики дослідження лазерного триангуляційного засобу вимірювання геометричних характеристик каналів стволів вогнепальної зброї.

Виклад основного матеріалу. В основу конструкції та принципу дії експериментальної установки (ЕУ) покладено метод технічного діагностування каналів стволів вогнепальної зброї на основі визначення їх геометричних характеристик за допомогою оптико-механічного (лазерного триангуляційного) датчика. Суть зазначеного методу полягає у зондуванні поверхні КС за допомогою ЛТД, який реалізує послідовне позовжнє та кругове переміщення зондувального променя всередині КС. Більш детально даний метод і засіб вимірювання на його основі розглянуто у статтях [6 – 9]. Для розрахунків базових геометричних характеристик ЕУ застосовано математичні співвідношення, наведені в цих працях, зокрема вирази, які встановлюють зв'язок між відстанню a від центра приймальної лінзи до точки перетину головних оптичних осей фокусувальної і приймальної лінз, кутом α між оптичними осями фокусувальної і приймальної лінз та фокусною відстанню f приймальної лінзи ЛТД.

Експериментальна установка для дослідження лазерного триангуляційного засобу вимірювання геометричних характеристик КС (рис. 1) складається з дослідного ЛТД 1, платформи 2, на якій закріплені тримач 3 та опорна обертова площадка 4, макета ствола (МС) 5, блока електроживлення 6 та обчислювального компоненту ЗВ (ПЕОМ із встановленим спеціалізованим програмним забезпеченням) 7. Для центрування МС, визначення базової відстані, а також для контролю результатів вимірювання застосовується індикатор годинникового типу 8 на стійці та штангенциркуль з цифровим відліком 9.

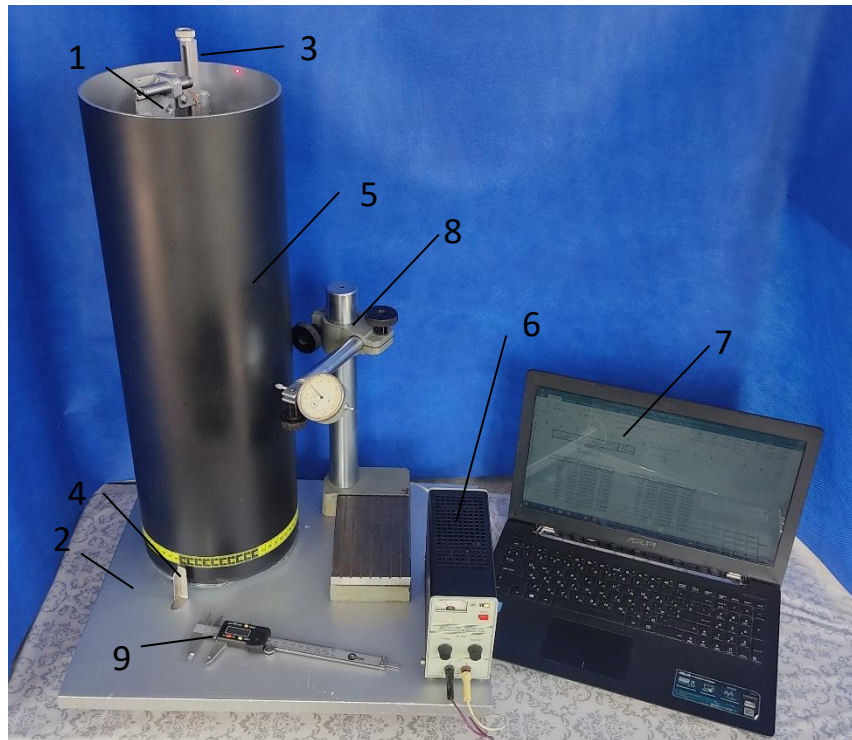


Рисунок 1 – Загальний вигляд експериментальної установки

Під базовою відстанню r_B розуміється відстань, яка відповідає номінальному значенню радіуса МС і є початком відліку його поточного значення при вимірюваннях. На практиці r_B визначають шляхом вимірювання відстані від осі обертання опорної площадки до внутрішньої поверхні МС.

Експериментальна установка відтворює процес вимірювання параметрів КС та реалізує принципи роботи лазерного тріангуляційного ЗВ, зокрема поздовжнє переміщення та обертання ЛТД всередині ствола.

Основні елементи ЛТД відображені на рис. 2. До них належать:

- джерело лазерного випромінювання 1;
- фокусувальний об'єктив 2, положення якого відносно джерела випромінювання визначається налаштуванням зондувального променя відповідно до визначеного діапазону вимірювання;
- приймальний об'єктив 3, який формує проєкцію зображення зондувальної плями 4 на поверхні світлочутливого детектора;
- світлочутливий детектор 5 та контролер-перетворювач, які утворюють один модуль, що приєднується до ПЕОМ інтерфейсом USB 2.0; як світлочутливий детектор використовується CMOS-матриця, що забезпечує роздільну здатність за входом близько 0,001 мм у діапазоні вимірювання від 0 мм до 2 мм.

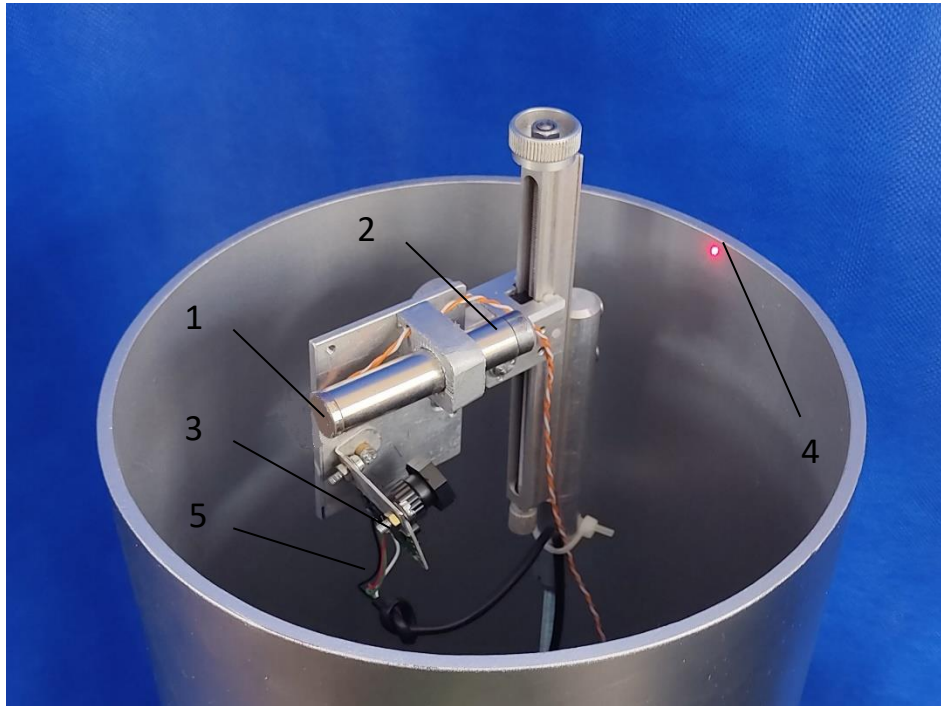


Рисунок 2 – Основні елементи дослідного ЛТД

Для вертикального переміщення ЛТД використовується тримач 1 (рис. 3) з гвинтовим механізмом вертикального переміщення. Для регулювання положення ЛТД у горизонтальній площині (суміщення осі зондувального променя з діаметральним перерізом МС у площині вимірювання) використовується каретка тримача 2 з гвинтовим механізмом горизонтального переміщення, на якій закріплені елементи оптичної схеми ЛТД.

Вузол обертання 3 призначений для безлюфтового обертання МС навколо своєї осі під час проведення вимірювань. Він містить прецизійний опорний підшипник, внутрішня обойма якого нерухомо зафіксована на платформі, а на зовнішній обоймі закріплена опорна обертова площадка 4, на яку встановлюється МС.

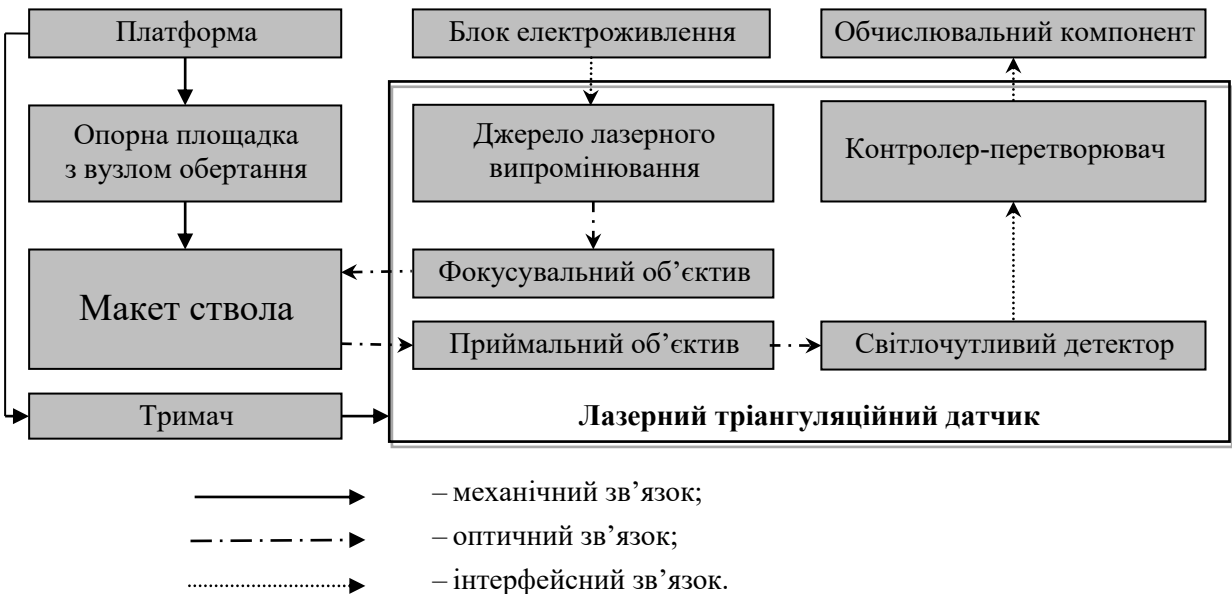
Елементи фіксації 5 у кількості трьох штук являють собою кронштейни з регульовальними гвинтами. Елементи фіксації встановлені на однаковій відстані один від одного по колу на опорній площадці у вершинах рівностороннього трикутника. Вони призначені для фіксації та центрування МС шляхом обертання регульовальних гвинтів. Фіксація МС здійснюється з його внутрішньої частини.

Як об'єкт вимірювання використовується комплект макетів ствола. Вони являють собою металеві труби довжиною 300-500 мм з внутрішніми діаметрами 150-250 мм, товщина їх стінок 5 мм. Якість оброблення поверхні даних зразків забезпечує її шорсткість, наближену до шорсткості КС реальних зразків зброї [23]. Крім того, на поверхні одного із зразків МС фрезеруванням виконані заглиблення, що імітують нарізи та дефекти (прямий наріз та раковину).

Для визначення кутового положення МС використовується маркер 6 (рис. 3).

Для живлення джерела лазерного випромінювання використовується стабілізований блок електроживлення ИПС-1, який забезпечує підтримання напруги живлення у межах, встановлених відповідною технічною документацією. Контроль вихідної напруги здійснюється за вольтметром, вбудованим у корпус блока електроживлення.

Як обчислювальний компонент використовується ПЕОМ ASUS X553S із встановленим спеціалізованим програмним забезпеченням, за допомогою якого здійснюється визначення координат центра світлової плями на поверхні світлочутливого детектора. Для аналізу результатів вимірювань застосовується пакет програм OriginLab Corporation.



На основі викладених вище принципів та положень створено елементи експериментальної установки, виконано її монтаж, а також перевірено працездатність та безпечність.

Методика проведення експериментальних досліджень має висвітлювати такі етапи, як-от: підготовка ЕУ до проведення вимірювань, виконання вимірювань та оброблення експериментальних даних [24].

Підготовка ЕУ до проведення вимірювань передбачає проведення регулювання елементів ЛТД (зокрема центрування МС відносно осі обертання опорної обертової площадки, визначення базової відстані r_B , переміщення МС та ЛТД у початкове положення), а також підключення його до блока електроживлення. Для регулювання положення елементів ЛТД застосовуються спеціалізовані шаблони відповідно до розрахункових значень геометричних параметрів оптичної схеми.

Крім того, здійснюється регулювання фокусувального об'єктива для розташування точки фокусування у центрі визначеного діапазону вимірювання, та приймального об'єктива так, щоб проєкція зондувальної плями, яка відбивається від внутрішньої поверхні МС, була сфокусована на поверхні світлочутливого детектора.

Проведення експерименту відбувається у такий спосіб.

Лазерний тріангуляційний датчик встановлюється у вихідний (нульовий) переріз МС (номер кроку за поздовжньою координатою $n = 0$), кутове положення МС відповідає нульовій позначці відносно маркера (номер кроку за полярним кутом $m = 0$). На внутрішню поверхню МС спрямовано зондувальний промінь, який формує на ній зондувальну пляму. В робочому вікні спеціалізованого програмного забезпечення відображаються поточне зображення світлової плями на поверхні світлочутливого детектора, а також координати її центра в декартовій системі координат, початок якої зв'язаний з серединою короткої сторони світлочутливого детектора, а осі паралельні до його сторін (рис. 5).

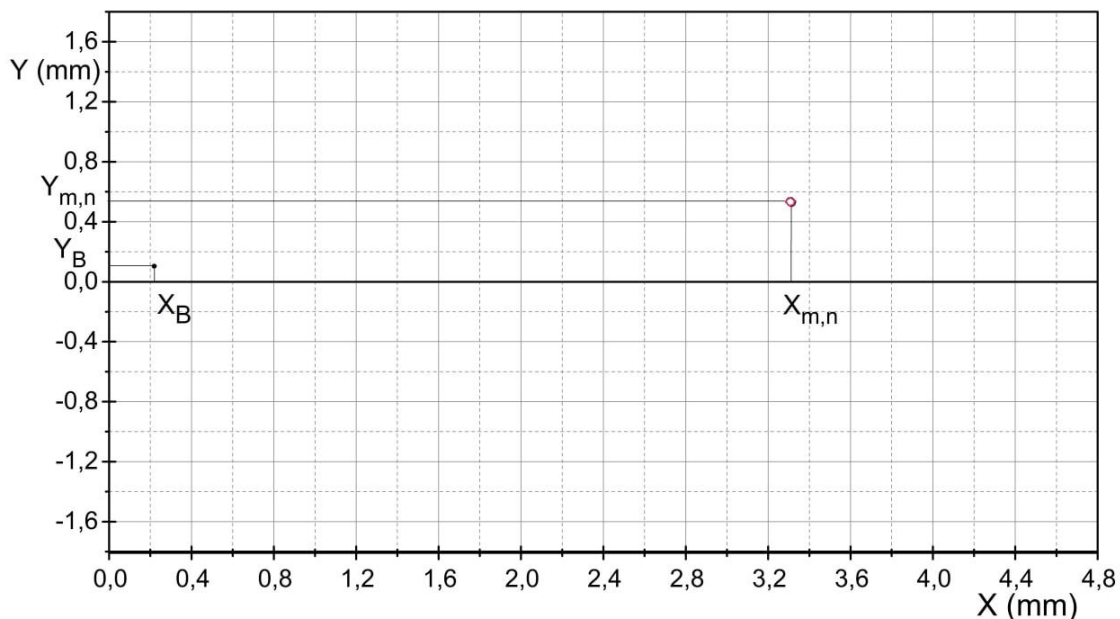


Рисунок 5 – Орієнтація системи координат відносно поверхні світлочутливого детектора

Макет ствола з визначеним інтервалом варіювання полярного кута φ отримує покроковий приріст кутової орієнтації, у кожному з положень $m\varphi$ відбувається фіксація координат $(X_{m0}, Y_{m,0})$ середини зондувальної плями на поверхні світлочутливого детектора.

Після того, як МС виконає повний оберт ($m\varphi = 2\pi$), здійснюється переміщення ЛТД на визначений крок (відстань) h уздовж осі МС (наприклад, для наступного перерізу, в якому

виконуються вимірювання, $n = 1$). Процес обертання МС та фіксації координат (X_{m1}, Y_{m1}) середини зондувальної плями на поверхні світлочутливого детектора повторюється.

Переміщення ЛТД уздовж осі МС відбувається доти, поки не буде обстежено визначену ділянку внутрішньої поверхні МС довжиною L (рис. 6). У результаті зазначених дій у пам'яті спеціалізованої програми накопичується масив координат (X_{mn}, Y_{mn}) точок на поверхні світлочутливого детектора, які відповідають центру світлової плями.

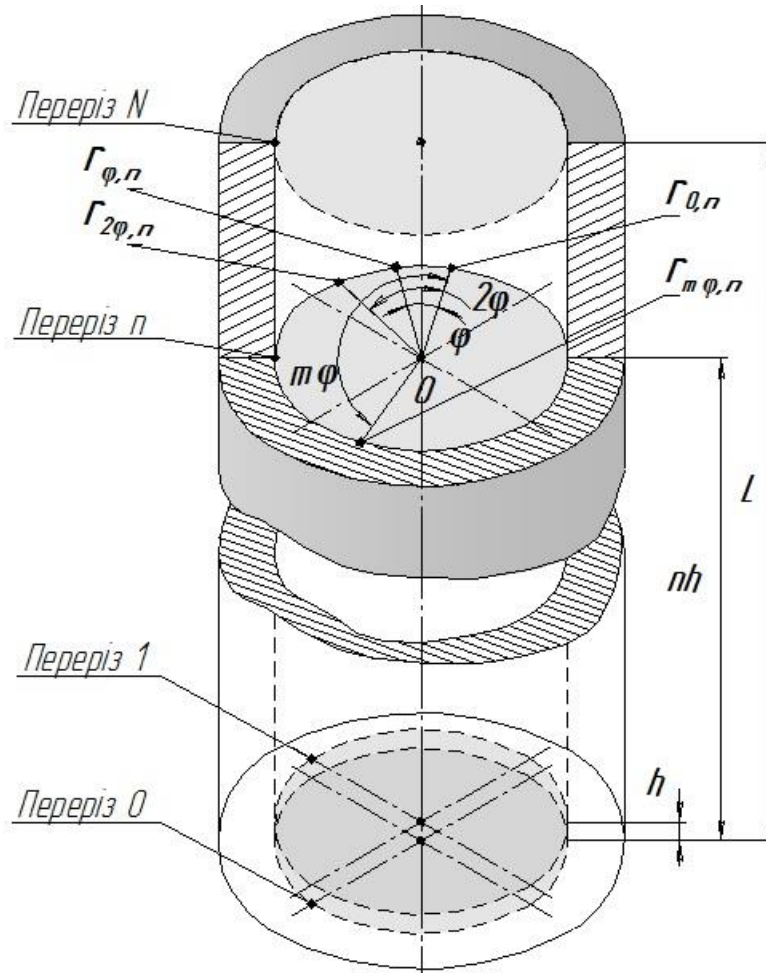


Рисунок 6 – Розташування перерізів при вимірюваннях

Отже, кожній із зондованих точок поверхні МС з координатами $(m\phi, nh)$ у циліндричній системі відповідає точка на поверхні світлочутливого детектора з координатами (X_{mn}, Y_{mn}) у декартовій. При цьому номер останнього перерізу МС становитиме L/h , а загальна кількість цих перерізів N визначатиметься виразом $N = L/h + 1$. Крім того, кількість M точок, в яких виконуються вимірювання у кожному з перерізів, визначається виразом $M = 2\pi/\phi$, а полярний кут останньої з точок у даному перерізі становить $2\pi - \phi$.

Спосіб подання такого масиву координат відображено в табл. 1, при цьому для наочності до таблиці додано стовпчики 4 та 5, що містять координати відповідних точок поверхні МС у циліндричній системі.

Таблиця 1 – Подання масиву експериментальних даних

№ запиту	Значення координат			
	декартова система		циліндрична система	
	X	Y	полярний кут	поздовжня вісь
1	2	3	4	5
Нульовий переріз, $n = 0$				
1	$X_{0,0}$	$Y_{0,0}$	0	0
2	$X_{1,0}$	$Y_{1,0}$	φ	0
3	$X_{2,0}$	$Y_{2,0}$	2φ	0
...	...	...	...	...
M	$X_{M-1,0}$	$Y_{M-1,0}$	$2\pi - \varphi$	0
Перший переріз, $n = 1$				
$M+1$	$X_{0,1}$	$Y_{0,1}$	0	h
$M+2$	$X_{1,1}$	$Y_{1,1}$	φ	h
$M+3$	$X_{2,1}$	$Y_{2,1}$	2φ	h
...	...	...	...	...
$2M$	$X_{M-1,1}$	$Y_{M-1,1}$	$2\pi - \varphi$	h
Другий переріз, $n = 2$				
$2M+1$	$X_{0,2}$	$Y_{0,2}$	0	$2h$
$2M+2$	$X_{1,2}$	$Y_{1,2}$	φ	$2h$
$2M+3$	$X_{2,2}$	$Y_{2,2}$	2φ	$2h$
...	...	...	...	...
$3M$	$X_{M-1,2}$	$Y_{M-1,2}$	$2\pi - \varphi$	$2h$
Останній переріз, $n = N$				
$M(N-1)+1$	$X_{0,N}$	$Y_{0,N}$	0	L
$M(N-1)+2$	$X_{1,N}$	$Y_{1,N}$	φ	L
$M(N-1)+3$	$X_{2,N}$	$Y_{2,N}$	2φ	L
...	...	...	...	...
MN	$X_{M-1,N}$	$Y_{M-1,N}$	$2\pi - \varphi$	L

На наступному етапі експериментальних досліджень здійснюється оброблення отриманих результатів шляхом конвертації даних, наведених у стовпчиках 2, 3 табл. 1, у результати вимірювання радіуса МС. Спочатку відбувається перетворення координат $(X_{m,n}, Y_{m,n})$ середини світлової плями в значення q – переміщення світлової плями на поверхні світлочутливого детектора від її вихідного положення. Потім за результатами такого перетворення визначається приріст радіуса МС Δr відносно його вихідного (номінального) значення.

Для оброблення результатів експерименту здійснюється імпорт даного масиву координат (табл. 1) до пакета програм OriginLab Corporation.

Методика оброблення експериментальних даних складається з таких етапів:

– визначення вихідного положення світлової плями на поверхні світлочутливого детектора; положення задається декартовими координатами (X_B, Y_B) точки поверхні світлочутливого детектора, якій відповідає проєкція точки поверхні МС, що знаходиться на базовій відстані r_B від його осі;

– перетворення координат $(X_{m,n}, Y_{m,n})$ у відповідне їм переміщення $q_{m,n}$ світлової плями на поверхні світлочутливого детектора

$$q_{m,n}^2 = (X_{m,n} - X_B)^2 + (Y_{m,n} - Y_B)^2; \quad (1)$$

– перетворення переміщення $q_{m,n}$ світлової плями на поверхні світлочутливого детектора у приріст радіуса МС $\Delta r_{m,n}$

$$\Delta r_{m,n} = \frac{q_{m,n} \cdot \left(\frac{a}{f} - 1 \right)}{\cos \alpha \cdot \left(\sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha + \left(\frac{f}{a-f} \right)^2} - \frac{q_{m,n}}{f} \right)}; \quad (2)$$

– обчислення радіуса МС у точці з координатами $(m\varphi, nh)$

$$r_{m,n} = r_B + \Delta r_{m,n}; \quad (3)$$

– подання вимірювальної інформації у вигляді, наведеному в таблиці 2.

Таблиця 2 – Вигляд масиву результатів вимірювання радіуса МС

$m\varphi$	nh				
	0	h	$2h$	...	L
0	$r_{0,0}$	$r_{0,1}$	$r_{0,2}$	...	$r_{0,N}$
φ	$r_{1,0}$	$r_{1,1}$	$r_{1,2}$	...	$r_{1,N}$
2φ	$r_{2,0}$	$r_{2,1}$	$r_{2,2}$	...	$r_{2,N}$
...	...	...	...	...	...
$2\pi - \varphi$	$r_{M-1,0}$	$r_{M-1,1}$	$r_{M-1,2}$	...	$r_{M-1,N}$

Крім визначення масиву значень радіуса МС (табл. 2), під час оброблення експериментальних даних здійснюється розрахунок параметрів заглиблень, що імітують нарізи та дефекти (прямий наріз, раковину).

Параметри МС (значення радіуса у заданих точках, характеристики нарізів і дефектних ділянок), визначені із застосуванням дослідного ЛТД, порівнюються зі значеннями цих величин, визначеними за допомогою засобів вимірювання геометричних величин (індикатор годинникового типу, штангенциркуль з цифровим відліком), що входять до складу експериментальної установки.

З метою забезпечення всебічного аналізу отриманих із застосуванням дослідного ЛТД даних також здійснюється їх візуалізація у такому вигляді:

- залежності радіуса МС від полярного кута в певному його перерізі (профіль перерізу МС у полярній системі координат);
- залежності радіуса МС від координати за поздовжньою віссю для певного полярного кута (поздовжній профіль МС у заданому осьовому перерізі);
- тривимірні зображення досліджуваних ділянок поверхні МС (у циліндричній системі координат) або їх розгорток (об’ємні моделі нарізів, зношених ділянок, роздуття, раковин тощо).

Наведена методика в подальшому буде використана на етапі практичного застосування експериментальної установки у дослідженні лазерного триангуляційного засобу вимірювання геометричних характеристик каналів стволів вогнепальної зброї.

Висновки

Запропоновано конструкцію та принцип дії експериментальної установки для дослідження лазерного триангуляційного засобу вимірювання геометричних характеристик каналів стволів вогнепальної зброї. У розрахунках базових геометричних характеристик експериментальної установки застосовано функцію перетворення лазерного триангуляційного датчика.

Обґрунтовано склад експериментальної установки, який забезпечує відтворення процесу вимірювання параметрів каналу ствола та реалізує принципи роботи лазерного триангуляційного засобу вимірювання. До складу експериментальної установки включено світлочутливий детектор на основі CMOS-матриці, який забезпечує роздільну здатність за входом близько 0,001 мм. Як об'єкт вимірювання використано комплект макетів стволів, у якому забезпечено якість оброблення їх поверхні на рівні шорсткості каналів стволів реальних зразків зброї.

Запропоновано методику оброблення експериментальних даних, яка передбачає перетворення координат середини світлової плями на поверхні світлочутливого детектора у відповідне радіальне переміщення зондувальної плями на поверхні макета ствола. На етапі оброблення експериментальних даних також передбачено порівняння параметрів макета ствола, визначених із застосуванням дослідного лазерного триангуляційного датчика, зі значеннями цих величин, визначеними за допомогою еталонних засобів вимірювання геометричних величин.

Обґрунтовано спосіб візуалізації результатів експерименту у вигляді профілів перерізу макета ствола в полярній системі координат, поздовжніх профілів макета ствола в заданому осьовому перерізі, а також тривимірних зображень досліджуваних ділянок поверхні макета ствола в циліндричній системі координат.

Подальші дослідження будуть спрямовані на виконання експериментальних досліджень за викладеною методикою. На основі аналізу їх результатів можуть бути сформульовані висновки про адекватність математичної моделі засобу вимірювання, отриманої теоретичним шляхом; про працездатність методу технічного діагностування каналів стволів вогнепальної зброї в умовах, наближених до реальних умов виконання вимірювань; про практичну застосовність запропонованих алгоритмічних основ оброблення вимірювальної інформації.

Перелік джерел посилання

1. Крюков О. М., Мігура О. О. Дослідження залежності ефективності виконання вогневого завдання від технічного стану каналу ствола вогнепальної зброї. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків, 2024. Вип. 1 (43). С. 68–77.
2. Цибуляк Б. З. Деграція параметрів стволів артилерійського озброєння в процесі експлуатації. *Військово-технічний збірник*. Львів, 2016. Вип. 14. С. 121–126.
3. Хайков В. Л. Развитие методов инструментального контроля и визуализации состояния каналов стволов артиллерийских орудий. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2013. № 3/7 (63). С. 52–56.
4. Крюков О. М., Мудрик В. Г. Перспективи експериментального визначення балістичних елементів пострілу. *Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України*. Харків, 2013. Вип. 1 (21). С. 21–24.
5. Крюков О. М., Александров О. А. Шляхи підвищення точності моделювання внутрішньобалістичних процесів. *Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України*. Харків, 2009. Вип. 1 (13). С. 11–14.
6. Крюков О. М., Мігура О. О. Метод технічного діагностування каналів стволів вогнепальної зброї на основі визначення їх геометричних характеристик. *Честь і закон*. 2023. № 3 (86). С. 101–109.
7. Крюков О. М., Мігура О. О. Математична модель оптико-механічного датчика для вимірювання геометричних характеристик каналів стволів вогнепальної зброї. *Честь і закон*. 2023. № 1 (84). С. 78–85.
8. Крюков О. М. Перспективний метод вимірювального контролю геометричних характеристик поверхонь каналів стволів вогнепальної зброї. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків, 2016. Вип. 1(26). С. 5–8.

9. Крюков О. М. Принцип побудови засобу вимірювання геометричних характеристик каналів стволів. *Системи обробки інформації*. Харків, 2016. Вип. 6 (143). С. 69–71.
10. Кучеренко О. К. Розрахунок і конструювання оптичних приладів. Ч. 1. Принципи конструювання і точність оптичних приладів.. Київ : КПП ім. І. Сікорського, 2018. 157 с.
11. Бобицький Я. В. Лазерні технології. Ч. 1. Львів : Львівська політехніка, 2015. 320 с.
12. Сікора Любомир. Лазерні та інформаційні технології контролю динамічних зміщень просторових структур об'єктів за дії активних техногенних і природних чинників ризику аварій. *Науковий вісник НЛТУ України*. Львів, 2019. Т. 29 № 6. С. 128–135.
13. Крюков О. М., Мельніков 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, 2018. Вип. 2. С. 5–11.
14. Сікора Любомир. Лазерні інформаційно-вимірювальні системи для управління технічними процесами. Теорія сигналів і систем. Львів : Каменяр, 1998. 453 с.
15. Johannes Schlarp, Ernst Csencsics, Georg Schitter. Design and evaluation of an integrated scanning laser triangulation sensor. *Mechatronics*. Vol. 72, December 2020, 102453. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2020.102453>.
16. Improved laser-based triangulation sensor with enhanced range and resolution through adaptive optics-based active beam control / Syed Azer Reza et al. *Applied Optics* Vol. 56. Issue 21. Pp. 5996 – 6006 (2017) DOI:<https://doi.org/10.1364/AO.56.005996>.
17. Z. Ji et al. Design of optical triangulation devices *Opt Laser Technol Mechatronics*. Vol. 72, December 2020, 102453. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2020.102453>.
18. Доля Г. Н., Крюков А. М., Мудрик В. Г. Дифференциальная лазерная доплеровская анемометрия объектов со световозвращающей поверхностью. *Прикладная радиоэлектроника*. 2013. Т. 12. № 3 С. 436–441.
19. Diffractive type triangular laser reading head and method of error detection thereof : пат. TW200533886 (A), МПК G01B11/26; G01M11/00, заявл. 12.04.2004; опубл. 16.10.2005 . Бюл. TW20040110160.
20. Method for detecting emergy wheel surface topography using laser scan triangular method : пат. CN1587903 (A), МПК G01B11/30; (IPC1-7): G01B11/30, заявл. 19.08.2004; опубл. 02.03.2005 . Бюл. CN20041053843.
21. Безконтактний засіб технічного контролю циліндричних отворів. URL:https://riftek.com/ru/products/laser_systems_for_inner_diameter_measurement. (дата звернення: 08.11.2024).
22. Безконтактний засіб технічного контролю циліндричних отворів. URL:https://www.d-test.eu/catalog/izmeritel_nye_sistemy/. (дата звернення: 08.11.2024).
23. Черніченко Ю. М. Основи будови та проектування стволів стрілецької зброї : навч. посіб. Харків : АБВ МВСУ, 2007. 83 с.
24. Крюков О. М. Флорін О. П. Основи метрологічного забезпечення : навч. посіб. Харків : ХНАДУ. 2010. 208 с.

Стаття надійшла до редакції 17.01.2025 р.

UDC 623.482+62-408.64:531.715.2+53.082.531

O. Kriukov, O. Mihura, R. Melnikov

SCIENTIFIC, METHODOLOGICAL AND TECHNICAL BASES OF EXPERIMENTAL STUDIES OF LASER TRIANGULATION MEANS FOR MEASURING THE GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF FIREARMS BORE

The work is devoted to the development of scientific and methodological foundations for experimental studies of a laser triangulation measuring device for measuring the geometric characteristics of firearms bore.

The results of the analysis of publications devoted to the study of known measuring instruments based on the principle of laser triangulation are considered. Limitations in the application of known research results

for the creation of an experimental setup for the study of a laser triangulation means of measuring the geometric characteristics of firearms bore are noted.

The essence of the method of technical diagnostics of firearms barrel channels, which is the basis of the studied measuring instrument, is outlined. The construction features, basic geometric parameters, and conversion function of the laser triangulation sensor of the measuring instrument are presented. The design and principle of operation of the experimental setup are substantiated, and the description and main characteristics of its elements are given. The structural diagram of the experimental setup is illustrated, and the mechanical, optical, and interface connections between its elements are determined.

The basic operations of preparing the experimental setup for research are considered.

The methodology of the experiment is described in detail, which provides for a stepwise increase in the angular and axial coordinates of the sensing point on the surface of the barrel model in a certain range of movements while fixing the coordinates of the middle of the sensing spot. A formalized method of presenting such an array of coordinates in the form of a table is proposed.

The method of processing the obtained results by converting the data of the tabulated array of coordinates into the results of measuring the radius of the barrel layout, which is based on the inverse expression of the transformation function of the laser triangulation sensor, is considered.

Recommendations are given for visualizing the results of determining the radius of the barrel layout in the form of two- and three-dimensional graphs.

K e y w o r d s : measuring device, optical-mechanical sensor, geometric characteristics, bore, triangulation method, conversion function, mathematical model.

Крюков Олександр Михайлович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри управління логістикою Національної академії Національної гвардії України.
<https://orcid.org/0000-0003-4194-6081>

Мігура Олексій Олександрович – доктор філософії з озброєння та військової техніки, старший викладач кафедри вогневої підготовки Національної академії Національної гвардії України.
<https://orcid.org/0000-0003-0327-9839>

Мельніков Роман Сергійович – доктор філософії з державної безпеки, начальник науково-організаційного відділу Національної академії Національної гвардії України.
<https://orcid.org/0000-0003-3517-2040>