

О. М. Крюков, С. О. Тишко, О. А. Александров

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ В КАНАЛАХ СТВОЛІВ СТРІЛЕЦЬКОЇ ЗБРОЇ

Розроблено конструкцію та виготовлено діючий макет засобу вимірювання миттєвих значень тиску в каналах стволів стрілецької зброї. Запропоновано математичні моделі датчика тиску та його динамічної похибки. Практично підтверджено працездатність елементів конструкції засобу вимірювання, а також його безпечність при виконанні вимірювань.

К л ю ч о в і с л о в а: засіб вимірювання миттєвих значень тиску, балістичний пристрій, дослідна установка.

Постановка проблеми. Характеристики і тактико-технічні властивості будь-якого зразка зброї більшою мірою визначаються характером перебігу внутрішньобалістичних процесів і, зокрема, законом зміни тиску порохових газів у каналі ствола та їх дією на всі частини і елементи, що використовують енергію порохових газів. Таким чином, для вирішення задач проектування та модернізації зброї, обґрунтування конструкції стволів, частин та механізмів, оптимізації роботи двигунів автоматки, а також для дослідження порохів з метою визначення їх сили, швидкості і закону горіння потрібно мати точні відомості про закон зміни тиску в каналі ствола.

Аналіз публікацій. Сучасна практика висуває достатньо високі вимоги до точності визначення миттєвих значень тиску в каналі ствола. Так, межа припустимої відносної похибки визначення цієї фізичної величини будь-якими методами і засобами не повинна перевищувати 2...3 % у разі застосування вимірювальної інформації для розрахунку конструкції ствола і 2...4 % – для розрахунку частин та механізмів зброї, які використовують енергію порохових газів [1–3].

Відомий крешерний метод та відповідні засоби [4] мають суттєві обмеження, оскільки дозволяють фіксувати лише максимальне значення тиску в каналі ствола. Дослідити характер зміни тиску порохових газів на ділянці його зростання до максимального значення принципово неможливо. До того ж точність цього методу суттєво обмежена інерційними властивостями елементів конструкції крешерного пристрою, а тарування крешерних циліндрів відбувається в статичному режимі, тому динамічна похибка визначення максимального тиску є порівняно великою і може бути оцінена лише орієнтовно.

Сучасні засоби вимірювання тиску, в основу яких покладено п'єзоелектричний, тензометричний, частотний та оптичний методи, широко використовуються в промисловості [4]. У зазначених роботах розглядаються питання, пов'язані з розробленням та удосконаленням засобів вимірювання швидкозмінного тиску в середовищі з високою температурою та в умовах швидкого розширення газів. Наприклад, для дослідження процесів, що відбуваються у котлових об'єктах, двигунах внутрішнього згорання, двигунах, які застосовуються в авіакосмічній галузі тощо.

Однак умови вимірювання тиску в каналі ствола суттєво відрізняються від умов, які визначають сферу застосування відомих засобів вимірювання імпульсного тиску. Специфіка сприйняття, передавання та обробки вимірювальної інформації зумовлена як високою верхньою межею діапазону вимірювання (до 400 МПа) та малою тривалістю явища пострілу (до 0,003 с), так і екстремальними значеннями деяких величин (наприклад, високою температурою порохових газів, яка може сягати декількох тисяч °С). Тому створення спеціалізованого засобу вимірювання тиску в каналі ствола є складною науково-технічною задачею.

Мета статті – проведення аналізу характеристик засобу вимірювання імпульсного тиску, а також обґрунтування шляхів і визначення особливостей технічної реалізації процесів сприйняття та перетворення вимірювальної інформації.

Виклад основного матеріалу. Аналіз джерел інформації показує, що прийнятну точність вимірювання може забезпечити тензометричний метод, який водночас є достатньо простим у реалізації. Вона передбачає застосування датчика тиску, що перетворює деформацію тензометричного чутливого елемента в електричний сигнал, який реєструється у вигляді шуканої кривої змінювання тиску.

Конструкція датчика миттєвих значень імпульсного тиску має забезпечувати його надійне розміщення на стволі зброї, але при цьому датчик не повинен заважати руху кулі та розширенню порохових газів. Тензометричний чутливий елемент датчика тиску має перетворювати вимірювану величину в електричний сигнал, при цьому необхідно забезпечити захист чутливого елемента від впливу температури шляхом його ізолювання від газового середовища. Параметри елементів конструкції датчика повинні забезпечувати його малу інерційність та ефективне затухання власних коливань (ці властивості датчика мають відповідати темпу збільшення тиску в каналі ствола).

Розроблений датчик миттєвих значень тиску [5] (рис. 1) складається з корпусу 1 і порожнини 2, заповненої термоізолюючою рідиною 3, в якій розташовано блок із двох тензометричних чутливих елементів 4.

У корпусі 1 виконаний приймальний канал 5, через який вимірюваний тиск діє на мембрану 6, яка в середній частині має збільшену товщину. Мембрана 6 притискається до корпусу 1 зсередини порожнини 2 за допомогою затискної гайки 7 і забезпечує передавання тиску термоізолюючій рідині 3 та тензометричним чутливим елементам 4. Знімна кришка 8 датчика забезпечує герметичність порожнини 2, а також, за необхідності, відкриває доступ зсередини до затискної гайки 7 і мембрани 6 для заміни останньої на мембрану з більшою або меншою жорсткістю (якщо необхідно змінити верхню межу діапазону вимірювання). Застосування двох тензометричних чутливих елементів забезпечує подвійну чутливість датчика (порівняно із застосуванням одного чутливого елемента).

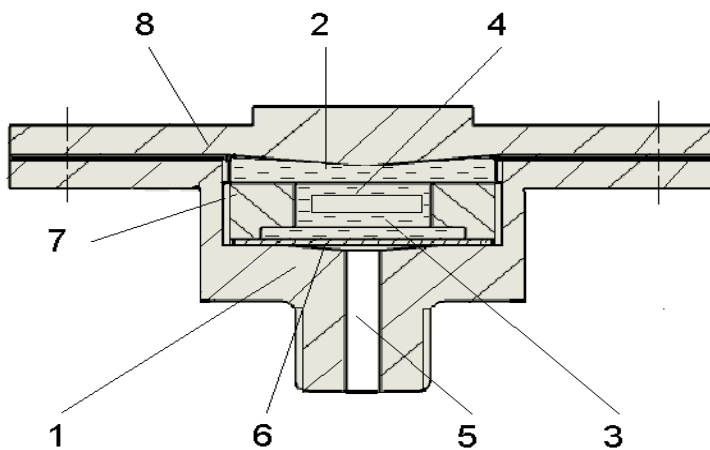


Рис. 1. Конструкція датчика миттєвих значень тиску

Швидкозмінний тиск p порохових газів через приймальний канал 5 діє на мембрану 6, яка пружно деформується в бік порожнини і створює відповідний тиск у термоізолюючій рідині 3. Цей тиск впливає на тензометричні чутливі елементи, змінюючи їх електричний опір.

На рис. 2 наведено загальний вигляд датчика тиску.

Розглянутий датчик миттєвих значень тиску застосовується у складі балістичного пристрою, який має забезпечувати можливість оперативної зміни довжини ствола та розміщення декількох датчиків тиску уздовж каналу ствола.

Розроблений балістичний пристрій (див. рис. 3) складається з опори 1, на якій встановлено ствол із знімних секцій 2–4, в яких виконано по два протилежні різьбові отвори, в кожному з яких можна встановити датчики тиску 5–7 або різьбові пробки 8–10, та затильника 11 з приєднаним до нього електрифікованим дистанційним ударно-спусковим механізмом 12 [6]. За необхідності в різьбових отворах замість датчиків тиску можна встановити допоміжні датчики температури.



Рис. 2. Загальний вигляд датчика тиску

Секційна будова ствола дозволяє оперативно змінювати його довжину шляхом додавання або видалення необхідної кількості знімних секцій і моделювати процеси пострілу для різних зразків стрілецької зброї. Розміщення двох протилежних різьбових отворів у знімних секціях дозволяє

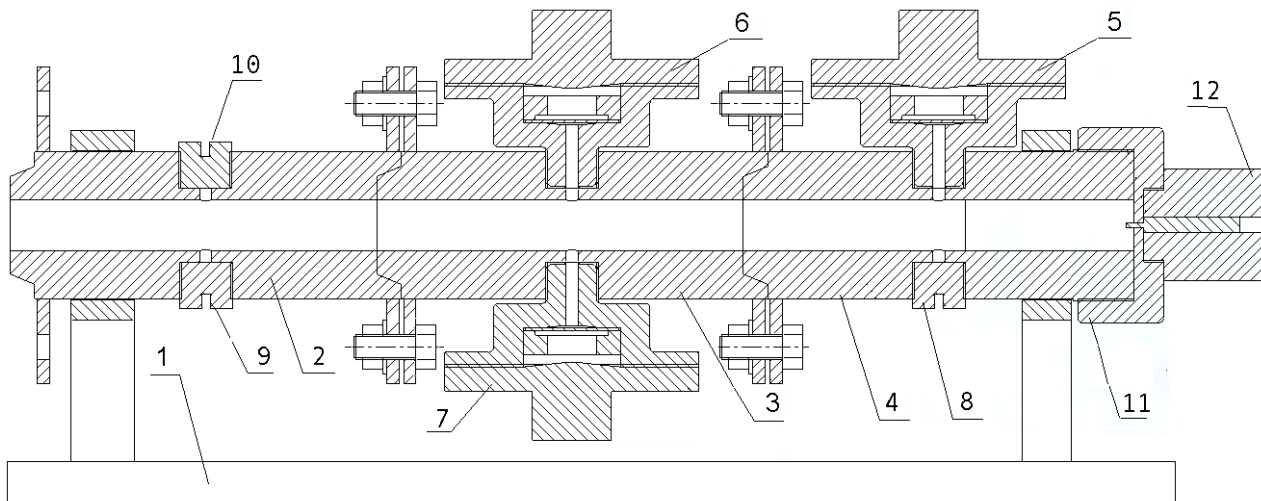


Рис. 3. Конструкція балістичного пристрою

встановлювати датчики тиску одночасно в декількох перерізах каналу ствола, що забезпечує можливість дослідження процесу зміни тиску порохових газів уздовж каналу ствола. Крім того, у разі встановлення двох датчиків тиску в протилежних різьбових отворах однієї знімної секції, можливо звіряти отримані за їх допомогою криві тиску, градувати один з датчиків за вимірювальним сигналом від іншого, досліджувати метрологічні характеристики датчиків тощо.

Перед пострілом шляхом складання необхідної кількості знімних секцій 2–4 моделюється потрібна довжина каналу ствола, а в різьбові отвори в заданих місцях встановлюється потрібна кількість датчиків тиску. Незадіяні різьбові отвори заглушуються різьбовими пробками 8–10. Після цього виконують постріл, під час якого за допомогою датчиків відтворюються вимірювальні сигнали, що несуть інформацію про тиск у певному перерізі каналу ствола. За необхідності оперативно змінити розташування датчиків тиску, їх переставляють в інші різьбові отвори знімних секцій.

На рис. 4 наведено загальний вигляд балістичного пристрою.

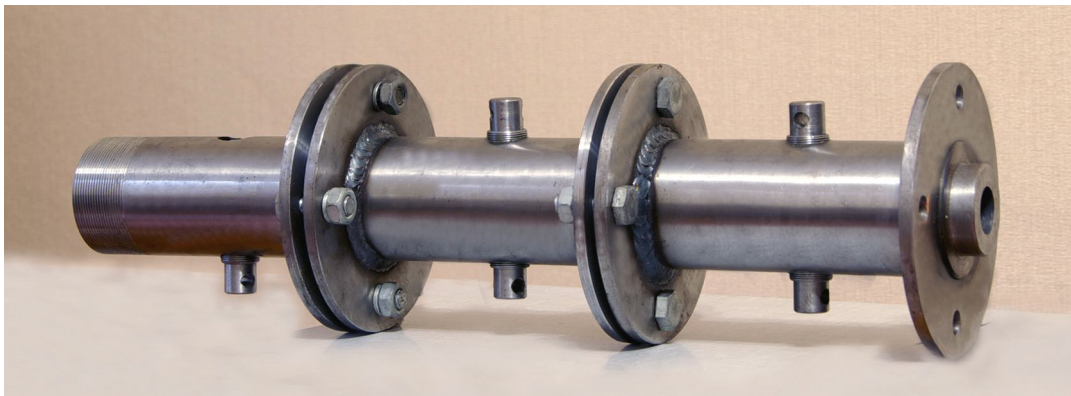


Рис. 4. Загальний вигляд балістичного пристрою

Для перетворення зміни опору тензометричних чутливих елементів у напругу в дослідній установці (ДУ) застосовано мостовий вимірювальний перетворювач, який живиться стабілізованим постійним струмом 100...120 В. Тензометричні чутливі елементи датчика тиску підключають до його протилежних плечей, а для балансування мосту перед вимірюванням в одне з плечей, що залишилися, включають підстроювальний резистор. Сигнал вимірюваної інформації U , пропорційний зміні опору чутливого елемента, знімається з вимірювальної діагоналі мосту та надходить до засобів вимірювальної техніки, які здійснюють реєстрацію (візуалізацію) вимірюваної інформації або визначення параметрів форми кривої тиску.

Для реєстрації кривої тиску в ДУ застосовується цифровий запам'ятовуючий осцилограф (можливо також застосовувати з цією метою узгоджувальний пристрій, системний аналого-цифровий перетворювач та ЕОМ з відповідним програмним забезпеченням).

До складу допоміжного обладнання ДУ входять джерело живлення мостового вимірювального перетворювача, джерело живлення електрифікованого дистанційного ударно-спускового механізму та пристрої комутації.

На рис. 5 наведено загальний вигляд ДУ з встановленим на балістичному пристрої датчиком тиску, мостовим вимірювальним перетворювачем, цифровим запам'ятовуючим осцилографом та допоміжним обладнанням.

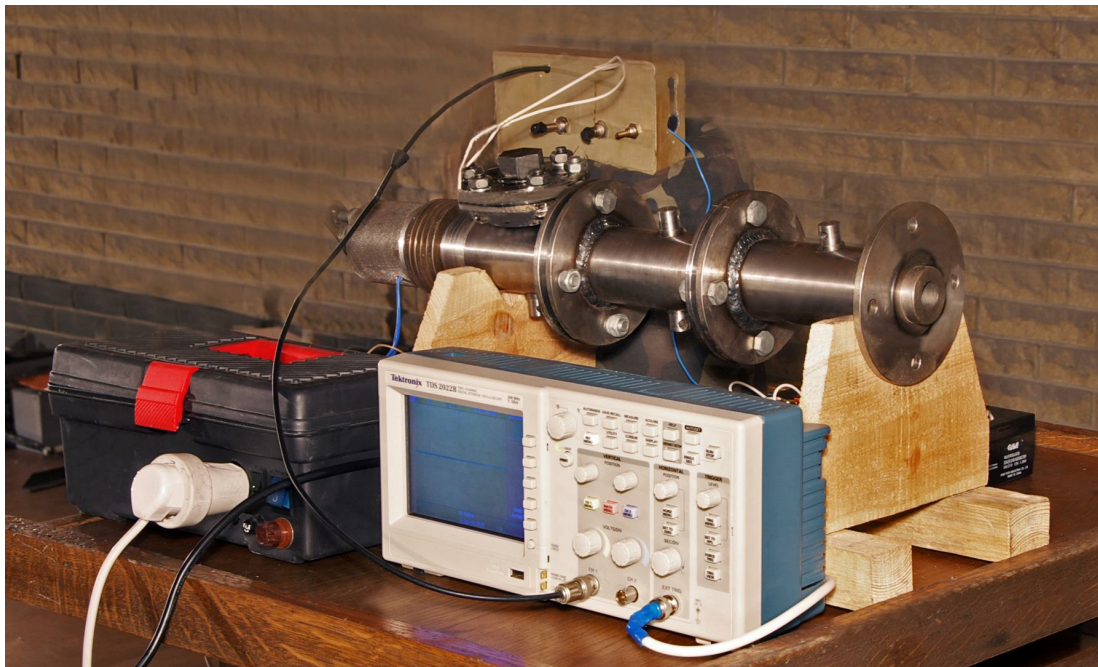


Рис. 5. Загальний вигляд дослідної установки

Статична характеристика датчика тиску визначається за виразом [7]:

$$U = k p .$$

Передаточний коефіцієнт k залежить від геометричних параметрів елементів датчика, стискуваності термоізолюючої рідини, модуля пружності та коефіцієнта Пуассона матеріалу мембрани, тензометричного коефіцієнта матеріалу чутливого елемента.

Однак для вирішення задач, пов'язаних із синтезом та оцінюванням технічних характеристик засобу вимірювання тиску, необхідно мати узагальнену математичну модель датчика у вигляді передаточної функції, яка б встановлювала зв'язок між характеристиками датчика та його фізичними параметрами.

Згідно з відомими принципами побудови вимірювальних приладів прямого перетворення датчик тиску можна подати у вигляді послідовного з'єднання декількох елементарних перетворювачів, властивості яких визначаються їх передаточними функціями $W_i(s)$ (рис. 6).

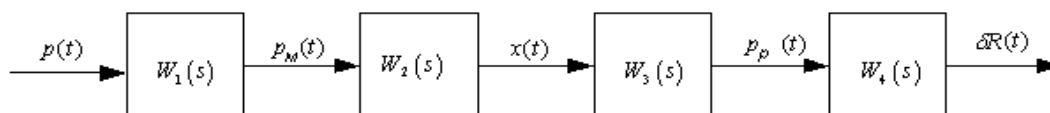


Рис. 6. Структурна схема датчика тиску

Перший елементарний перетворювач $W_1(s)$ – газова субстанція, що заповнює приймальний канал, вона обмежена каналом ствола з одного боку і мембраною, з іншого. Вхідною величиною перетворювача є вимірюваний тиск порохових газів $p(t)$. Вихідною величиною $p_M(t)$ є тиск шару газу, що безпосередньо контактує з мембраною.

Другий елементарний перетворювач $W_2(s)$ – мембрана датчика тиску. Вихідним сигналом є переміщення центральної точки мембрани $x(t)$, зумовлене тиском шару газу, що безпосередньо контактує з мембраною.

Третій елементарний перетворювач $W_3(s)$ – термоізолююча рідина, що заповнює внутрішній об'єм датчика. Вихідним сигналом є тиск $p_p(t)$ рідини на тензорезистор.

Четвертий елементарний перетворювач $W_4(s)$ – тензометричний чутливий елемент. Вихідним сигналом є відносна зміна електричного опору $\delta R(t)$, зумовлена обтисканням тензорезистора рідиною.

Використовуючи опис елементарних перетворювачів диференціальними рівняннями та застосовуючи методи теорії автоматичного управління (перетворення за Лапласом) [8], отримаємо передаточну функцію датчика:

$$W(s) = e^{-\tau_3 s} \frac{1}{T_n s + 1} \cdot \frac{k_m}{T_m^2 s^2 + 2\xi_m T_m s + 1} \cdot \frac{k_p}{T_p^2 s^2 + 2\xi_p T_p s + 1} K, \quad (1)$$

де τ_3 – час запізнення поширення тиску в першому елементарному перетворювачі, який залежить від геометричних розмірів та модуля пружності матеріалу приймального каналу, а також характеристик газової субстанції, що його заповнює [7]; k_m , T_m , ξ_m – коефіцієнт передачі, стала часу та параметр затухання мембрани, які визначаються її геометричними розмірами, масою, жорсткістю, модулем пружності, коефіцієнтом внутрішнього тертя та коефіцієнтом Пуассона матеріалу мембрани; k_p , T_p , ξ_p – коефіцієнт передачі, стала часу та параметр затухання рідини, що залежать від її стискуваності, кінематичної в'язкості, густини, а також геометричних розмірів порожнини; K – тензометричний коефіцієнт матеріалу чутливого елемента [7].

Наявність передаточної функції датчика з відомими параметрами дає можливість оцінити його динамічну похибку, якщо частотні властивості вхідного сигналу датчика приблизно відомі.

Розв'язати цю задачу можливо на основі моделювання закону зміни тиску в каналі ствола під час пострілу з урахуванням ступеня спотворення кривої тиску датчиком.

Модель вхідного сигналу датчика тиску може бути побудована на основі розв'язування рівнянь, що зв'язують тиск $p(x)$ у каналі ствола, час t з моменту початку руху кулі до моменту досягнення нею координати x упродовж каналу ствола та швидкості $v(x)$ кулі:

$$\begin{cases} p(x) = \frac{\eta \cdot f \cdot \psi(x) - \frac{B \cdot \theta}{2} x^2}{s \cdot (l_\phi + x)}, \\ v(x) = v_{np} \sqrt{1 - \left(\frac{x + l_k}{x + l_n}\right)^\theta \cdot \left(1 - \frac{v_m^2}{v_{3g}^2}\right)}, \\ t = \frac{2x}{v(x)} + \int_0^x \frac{dy}{v(y)} \end{cases} \quad (2)$$

де η – маса пороху; f – сила пороху; s – площа поперечного перерізу каналу ствола; $\psi(x)$ – відносний об'єм пороху, що згорів; B – параметр Дроздова [1], θ – газова стала, l_ϕ – зведена довжина вільного об'єму камори; v_{3g} , v_m – зведена та максимальна швидкості кулі; l_n – довжина патронника; l_k – довжина каналу ствола.

Розв'язок системи (2) у вигляді залежності тиску в каналі ствола від часу з моменту початку руху кулі може бути отриманий як аналітичним шляхом, так і чисельно. Аналітичний шлях не дозволяє швидко проводити розрахунки, необхідні при визначенні кривих тиску для різних параметрів заряджання та геометричних розмірів каналів стволів зброї, тому перевагу слід надати чисельному розв'язуванню задачі. Оскільки розв'язок системи (2) в подальшому підлягатиме інтегруванню, доцільно його подати у вигляді поліному [9]:

$$p(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_1 \cdot t^2 + \dots + a_{n-1} \cdot t^{n-1}, \quad (3)$$

де n – кількість розв'язків системи (2); $a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}$ – коефіцієнти, значення яких залежать від параметрів заряджання та геометричних параметрів каналу ствола.

У загальному випадку спектральну щільність $S_{ex}(\omega)$ вхідного сигналу датчика можна визначити за виразом

$$S_{ex}(\omega) = 2 \int_0^{\infty} p(t) e^{-i\omega t} dt. \quad (4)$$

Датчик тиску, відомі параметри якого визначають його передаточну функцію $W(s)$ і амплітудно-фазову частотну характеристику $W(j\omega)$ [10; 11], є динамічною ланкою, яка внаслідок інерційності спотворює вхідний сигнал $p(t)$, що й призводить до появи відповідної динамічної похибки. Тому спектральна щільність $S_{вих}(\omega)$ сигналу $\delta R(t)$ на виході датчика відрізнятиметься від спектральної щільності $S_{ex}(\omega)$ вхідного сигналу.

Враховуючи, що відносна комплексна динамічна похибка $\delta(j\omega)$ датчика визначається виразом

$$\delta(j\omega) = \frac{W(j\omega)}{W(0)} - 1, \quad (5)$$

можна обчислити спектральну щільність динамічної похибки датчика

$$S_{дин}(\omega) = \left(\frac{W(j\omega)}{W(0)} - 1 \right)^2 S_{ex}(\omega). \quad (6)$$

Оскільки $W(0) = k_m k_g K$, вираз для середньоквадратичного значення динамічної похибки представимо у вигляді

$$\sigma_{дин} = \sqrt{2 \int_0^{\infty} \left(\left(\frac{W(j\omega)}{k_m k_g K} - 1 \right)^2 S_{ex}(\omega) \right) d\omega}. \quad (7)$$

Можна також ввести до розгляду та оцінювати кількісно відносне значення динамічної похибки, яке визначатиметься за формулою

$$\delta_{дин} = \frac{\sigma_{дин}}{\sigma_{ex}} = \left(\left(\int_0^{\infty} \left(\left(\frac{W(j\omega)}{k_m k_g K} - 1 \right)^2 S_{ex}(\omega) \right) d\omega \right) \left(\int_0^{\infty} S_{ex}(\omega) d\omega \right)^{-1} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (8)$$

Цей вираз встановлює однозначний зв'язок між параметрами заряджання, характеристиками зразка стрілецької зброї, параметрами передаточної функції датчика тиску та його динамічною похибкою за конкретних умов проведення вимірювань. Кількісна оцінка свідчить, що для характерних поєднань параметрів заряджання і фізичних параметрів датчика тиску значення $\delta_{дин}$ знаходиться в діапазоні 2,0...2,5 %.

Таким чином, запропонована математична модель (8) динамічної похибки датчика для вимірювання миттєвих значень тиску в каналах стволів стрілецької зброї може бути застосована як для розв'язування прямої задачі – оцінювання динамічної похибки вимірювання миттєвих значень тиску порохових газів під час пострілу, так і для розв'язування оберненої задачі – обґрунтування

раціональних параметрів датчика тиску, який характеризується обмеженою на заданому рівні динамічною похибкою.

Висновки

Запропоновано конструкцію і виготовлено діючий макет дослідної установки для вимірювання миттєвих значень тиску в каналах стволів стрілецької зброї. Розроблено узагальнену математичну модель датчика тиску у вигляді передаточної функції, встановлено зв'язки між параметрами такої математичної моделі та фізичними параметрами датчика тиску.

Запропоновано математичну модель динамічної похибки датчика тиску, визначено зв'язки між динамічною похибкою, параметрами датчика тиску та параметрами вхідного сигналу.

Виконано серію пробних вимірювань тиску в каналі ствола дослідної установки, підтверджено працездатність елементів конструкції дослідної установки та її безпечність під час виконання вимірювань.

Подальші дослідження будуть спрямовані на вирішення таких задач:

- побудова математичних моделей, аналізування характеру прояву і оцінювання складників додаткової похибки засобу вимірювання тиску, оцінювання результуючої інструментальної похибки, а також розроблення способів забезпечення потрібної точності вимірювань;
- розроблення теоретичних і прикладних основ метрологічного забезпечення датчика миттєвих значень тиску.

Список використаних джерел

1. Теория и расчёт автоматического оружия [Текст] / А. К. Голомбовский и др. – Пенза : ПВАИУ, 1973. – 493 с.
2. Экспериментальна баллістика. Прибори и методи баллістических измерений [Текст] / К. В. Михайлов и др. – София : ВТС, 1976. – 388 с.
3. Крюков, О. М. Шляхи підвищення точності моделювання внутрішньобалістичних процесів [Текст] / О. М. Крюков, О. А. Александров // Системи озброєння та військова техніка. – 2009. – № 2 (22). – С. 79-89.
4. Полищук, Е. С. Измерительные преобразователи [Текст] / Е. С. Полищук. – К. : Вища школа, 1990. – 480 с.
5. Пат. 53153 Україна, МПК G 01 L 23/00. Датчик миттєвих значень тиску / Крюков О. М., Біленко О. І., Александров О. А.; заявники та власники прав Крюков О. М., Біленко О. І., Александров О. А.; заявл. 01.04.10; опубл. 27.09.10, Бюл. № 18.
6. Пат. 58095 Україна, МПК F 41 A 31/00. Пристрій для балістичних випробовувань стрілецької зброї та боеприпасів / Крюков О. М., Біленко О. І., Александров О. А.; заявники та власники прав Крюков О. М., Біленко О. І., Александров О. А.; заявл. 01.11.10; опубл. 25.03.11, Бюл. № 6.
7. Крюков, О. М. Математична модель датчика для вимірювання миттєвих значень тиску в каналах стволів стрілецької зброї [Текст] / О. М. Крюков, О. А. Александров // Системи озброєння та військова техніка. – 2010. – № 4 (24). – С. 83 – 89.
8. Попов Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления [Текст]: учеб. пособие для вузов. / Е. П. Попов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1989. – 304 с.
9. Тынкевич, М. А. Численные методы анализа [Текст] : учеб. пособие / М. А. Тынкевич. – Кемерово, 2002. – 184 с.
10. Бабин, А. А. Автоматизация производственных процессов [Текст] / А. И. Бабин, С. П. Санников. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2002. – 144 с.
11. Никитин, А. А. Управление техническими системами [Текст] / А. А. Никитин. – Красноярск : СФУ, 2007. – 145 с.

Стаття надійшла до редакції 20.11.2011 р.