

УДК 623.51

О. М. Крюков, О. А. Александров

ОЦІНЮВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ ПОХИБКИ ДАТЧИКА МИТТЄВИХ ЗНАЧЕНЬ ТИСКУ В КАНАЛАХ СТВОЛІВ СТРІЛЕЦЬКОЇ ЗБРОЇ

Запропоновано математичну модель динамічної похибки датчика для вимірювання імпульсного тиску в каналах стволів стрілецької зброї. Встановлено взаємозв'язки між динамічною похибкою, параметрами датчика тиску та параметрами його вхідного сигналу. Визначено шляхи застосовування отриманої математичної моделі.

Постановка проблеми. Удосконалення процесів виготовлення, випробування та визначення технічного стану стрілецької зброї нерозривно пов'язане з подальшим підвищенням точності даних про параметри процесу пострілу. Найбільш зручним та надійним шляхом отримання достовірних відомостей про ці параметри в експериментальній балістиці є вимірювання тиску порохових газів безпосередньо під час здійснення пострілу. За дослідними кривими тиску проводиться балістичний аналіз порохів, визначаються такі балістичні характеристики, як сила пороху, коволом, повний імпульс тиску порохових газів і коефіцієнт швидкості горіння пороху. На основі отриманих кривих тиску у функції часу встановлюється закон горіння пороху, дається якісна та кількісна оцінка впливу різних факторів на процес пострілу. Результати вимірювання тиску в каналі ствола дозволяють визначати вплив окремих умов заряджання на характер дії порохових газів у дульних гальмах, газовідвідних пристроях та інших механізмах, що використовують енергію порохових газів. Також вищезазначені результати дають можливість встановити ступінь наближення ряду теоретичних рішень балістики до даних, що одержані експериментальним шляхом. На цей час вирішення таких задач потребує визначення миттєвих значень тиску в каналах стволів з межею допустимої відносної похибки 1...3 %.

Зростання точності вимірювання тиску можна досягти за рахунок відповідного покращення технічних характеристик засобу вимірювання тиску, зокрема, його найважливішого елемента – датчика миттєвих значень тиску. Сучасний датчик має характеризуватися високою верхньою межею діапазону вимірювання (до 250 МПа), бути малоінерційним (перетворювати без спотворень швидкоплинний вхідний сигнал тривалістю до 0,001 с) і функціонувати в умовах високої температури порохових газів, що сягає декількох тисяч °С. Такі вимоги є вельми жорсткими, тому, незважаючи на наявність широкого спектру серійних датчиків для вимірювання імпульсного тиску, більшість з них у зазначених умовах проведення вимірювань не задовольняє вимогам до межі допустимої похибки. Це зумовлено, головним чином, занадто великою інерційністю елементів конструкції датчиків, які проектує виробники, насамперед, для роботи в умовах надвеликих тисків і температур.

Для визначення принципової можливості та меж застосування певного датчика для вимірювання тиску в каналах стволів стрілецької зброї необхідно оцінити його динамічну похибку. Вирішення цієї проблеми можливе на основі розроблення методичного апарату, що ґрунтується на моделюванні зміни тиску в каналі ствола під час пострілу та урахуванні ступеня спотворення кривої тиску датчиком, який представляється у вигляді динамічної ланки з відомою передаточною функцією.

Аналіз публікацій. З відомих аналітичних методів [1 – 3], за допомогою яких можна знайти закон зміни тиску з часом, найбільш повно враховано більшість значимих параметрів при найменшій кількості допущень у методі проф. Н. Ф. Дроздова. У разі використання математичного апарату, покладеного в основу цього методу, можна уникнути етапу побудови та використання спеціальних таблиць і отримати математичну модель вхідного сигналу в аналітичному вигляді.

Зв'язок спектральних характеристик вхідного сигналу динамічної системи з параметрами її передаточної функції та спектральними характеристиками вхідного сигналу розглянуто в роботах [4 – 6]. Але в цих джерелах відсутні рекомендації з синтезу виразу інтегральної динамічної похибки у випадку стохастичних впливів, що не дає змоги кількісно оцінити точнісні характеристики конкретного датчика та порівняти їх з вимогами до межі його допустимої похибки.

Метою статті є побудова математичної моделі динамічної похибки датчика для вимірювання імпульсного тиску в каналах стволів стрілецької зброї.

Виклад основного матеріалу. Модель вхідного сигналу датчика будується з урахуванням таких основних допущень [1].

1. При горінні пороху розширення газів підпорядковано геометричному закону.

2. Склад продуктів згоряння не змінюється під час та після згоряння пороху.
 3. Швидкість горіння пороху пропорційна тиску.
 4. Другорядна робота порохових газів (наприклад така, що спричинює рух частин та механізмів зброї, нагрівання стволу й ін.) врахована у відповідних коефіцієнтах проф. Н. Ф. Дроздова.
 5. Рух снаряду починається тоді, коли в коморі у результаті згоряння частини заряду розвинувся тиск форсування, достатній для врізання пояска в нарізи на повну глибину. Поступовість врізання й зростання опору пояска не враховуються.
 6. Робота врізання пояска окремо не враховується так само, як і збільшення швидкості снаряда при поступовому врізанні пояска.
 7. Розтягом стінок ствола при пострілі, проривом порохових газів через зазори між ведучим пояском та каналом, а також опором повітря в каналі ствола нехтують.
 8. Охолодження газів у результаті теплопередачі стінок ствола безпосередньо під час руху кулі в каналі ствола не враховується.
 9. Рух кулі розглядається до моменту проходження її дна через дульний зріз.
- Значимими для математичної моделі вхідного сигналу датчика є такі параметри.
1. Конструктивні особливості ствола зброї: об'єм камери W_0 , площа перетину каналу ствола (включно з нарізами) s , довжина шляху снаряда по каналу l_d .
 2. Конструктивні особливості кулі: маса q , тиск форсування p_0 .
 3. Маса заряду пороху η .
 4. Сила пороху f .
 5. Частина заряду ψ , що згоряє до початку руху кулі.
 6. Параметр Дроздова B .
 7. Газова стала θ .

Залежність тиску від пройденого кулею шляху x можна представити у вигляді [3]

$$p(x) = \frac{\eta \cdot f \cdot \psi - \frac{B \cdot \theta}{2} x^2}{s \cdot l_\psi(x)}, \quad (1)$$

де $l_\psi(x)$ – залежність кількості пороху, що залишилась після проходження кулею шляху x у каналі ствола.

Залежність швидкості кулі в каналі ствола від шляху кулі x можна знайти з виразу [3]

$$v(x) = v_{np} \sqrt{1 - \left(\frac{x + l_k}{x + l_x} \right) \cdot \left(1 - \frac{v_k^2}{v_{np}^2} \right)}, \quad (2)$$

де v_{np} , v_k – відповідно зведена та максимальна швидкості кулі; l_x – довжина казенної частини ствола.

Для знаходження часу від початку руху кулі скористаємося виразом

$$t = \frac{2l_x}{v} + \int_0^x \frac{dl}{v}. \quad (3)$$

Залежність тиску в каналі ствола від часу, що пройшов з моменту початку руху кулі до моменту досягнення нею координати x упродовж каналу ствола, можливо отримати, поєднавши вирази (1)...(3) у систему рівнянь:

$$\begin{cases} p(x) = \frac{\eta \cdot f \cdot \psi - \frac{B \cdot \theta}{2} x^2}{s \cdot l_\psi(x)}, \\ v(x) = v_{np} \sqrt{1 - \left(\frac{x + l_k}{x + l_x} \right) \cdot \left(1 - \frac{v_k^2}{v_{np}^2} \right)}, \\ t = \frac{2l_x}{v} + \int_0^x \frac{dl}{v}. \end{cases} \quad (4)$$

Приклади рішень системи рівнянь (4) для деяких видів стрілецької зброї, що є на озброєнні

підрозділів внутрішніх військ, представлені на рис. 1.

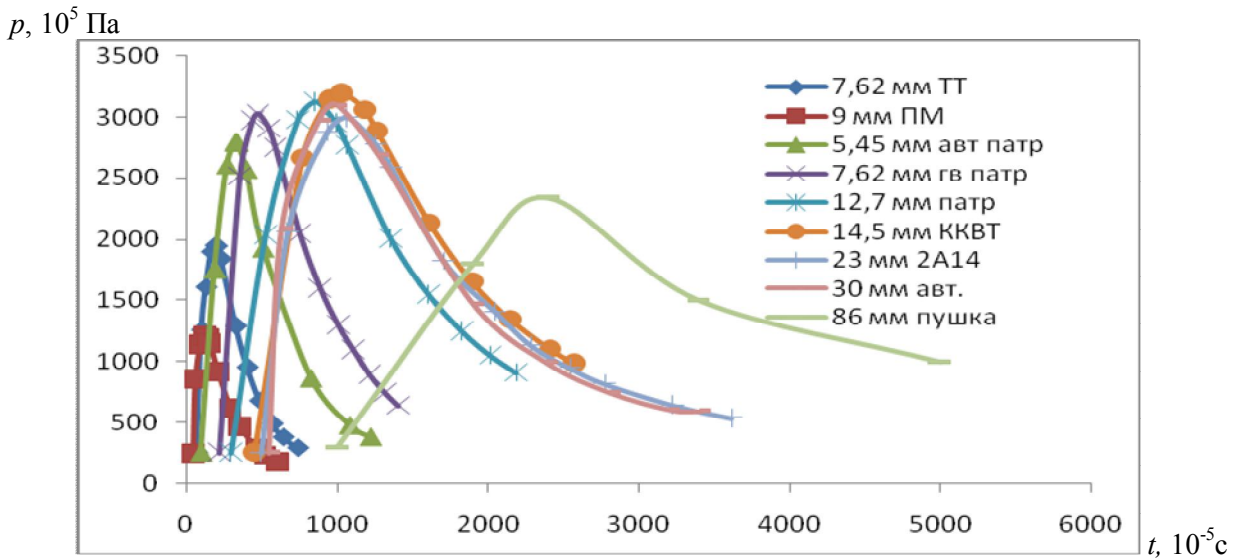


Рис. 1. Рішення системи рівнянь (4) для деяких видів стрілецької зброї

Оскільки подальше використання результатів математичного моделювання вхідного сигналу передбачає застосування ЕОМ, а з аналітичним рішенням системи (4) складно проводити операції інтегрування, доцільно виконати інтерполяцію залежності тиску від часу у вигляді полінома [7]:

$$p(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + \dots + a_{n-1} \cdot t^{n-1}, \quad (5)$$

де n – кількість рішень системи (4), на основі яких проводиться інтерполяція; $a_0, a_1, a_2 \dots a_{n-1}$ – коефіцієнти, значення яких залежать від параметрів заряджання та конструктивних особливостей каналу ствола.

Отриманий поліном $p(t)$ на інтервалі часу (t_1, t_2) , який відповідає тривалості процесу пострілу, можна розглядати як сигнал неперіодичного колювання. Знайдемо його спектральну щільність $S(\omega)$. Виділивши довільний проміжок часу T , що містить інтервал (t_1, t_2) , представимо $p(t)$ як суму спектральних складників [5]:

$$p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{in\omega t} \quad 0 < t < T, \quad (6)$$

де $\omega = 2\pi / T$ – кругова частота.

Враховуючи, що $c_n = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} p(t) e^{-in\omega t} dt$, можна подати (6) у вигляді

$$p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\int_{t_1}^{t_2} p(x) e^{-in\omega_1 x} dx \right] e^{in\omega_1 t} \frac{\omega_1}{2\pi}. \quad (7)$$

За межами відрізка $(0, T)$ ряд (7) визначає функцію $p(t) = p(t \pm kT)$, де k – ціле число, тобто періодичну функцію, отриману повторенням $p(t)$ вправо та вліво з періодом T . Для того, щоб зовні відрізка $(0, T)$ функція дорівнювала нулю, значення T повинно бути нескінченно великим. Спрямовуючи T у нескінченність, отримуємо нескінченно малі амплітуди гармонічних складників, сума яких зображує вихідну неперіодичну функцію $p(t)$, задану в інтервалі $t_1 < t < t_2$. Кількість гармонічних складників, що входять до (7), у такому разі нескінченно велика, а відстань між спектральними лініями нескінченно мала, тобто спектр стає суцільним. Тому можна у виразі (7) замінити ω_1 на $d\omega_1$, $n\omega_1$ на ω , а операцію складання замінити операцією інтегрування.

Таким чином, отримуємо подвійний інтеграл Фур'є:

$$p(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} \left[\int_{t_1}^{t_2} p(x) e^{-i\omega x} dx \right] d\omega . \quad (8)$$

Внутрішній інтеграл

$$S(\omega) = \int_{t_1}^{t_2} p(t) e^{-i\omega t} dt \quad (9)$$

з виразу (8) є функцією ω і являє собою спектральну щільність сигналу $p(t)$.

У загальному випадку, коли межі t_1 та t_2 не з'ясовані [5], спектральна щільність подається у вигляді

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} p(t) e^{-i\omega t} dt = 2 \int_0^{\infty} p(t) e^{-i\omega t} dt . \quad (10)$$

Зв'язок між середньоквадратичним значенням (СКЗ) та спектральною щільністю сигналу на вході датчика тиску можна представити у вигляді

$$\sigma_{in} = \sqrt{2 \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega} . \quad (11)$$

Датчик тиску, параметри якого визначають його амплітудно-фазову частотну характеристику $W(j\omega)$ [8] і вважаються відомими, є динамічною ланкою, яка внаслідок інерційності спотворює вхідний сигнал $p(t)$, що й призводить до появи відповідної динамічної похибки. Тому спектральна щільність сигналу на виході датчика відрізнятиметься від спектральної щільності вхідного сигналу. Для знаходження спектральної щільності вихідного сигналу датчика скористуємося виразом

$$S_{out}(\omega) = |W(j\omega)|^2 S(\omega) . \quad (12)$$

Тоді вираз для СКЗ вихідного сигналу датчика матиме вигляд

$$\sigma_{out} = \sqrt{2 \int_0^{\infty} |W(j\omega)|^2 S(\omega) d\omega} . \quad (13)$$

Визначатимемо відносну динамічну похибку δ датчика як відношення абсолютного значення різниці СКЗ його вихідного та вхідного сигналів до СКЗ вхідного сигналу:

$$\delta = \frac{|\sigma_{out} - \sigma_{in}|}{\sigma_{in}} . \quad (14)$$

Підставивши вирази (11) та (13) у (14), отримаємо остаточно

$$\delta = \frac{\left| \sqrt{2 \int_0^{\infty} |W(j\omega)|^2 S(\omega) d\omega} - \sqrt{2 \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega} \right|}{\sqrt{2 \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega}} . \quad (15)$$

Формула (15) 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.

Висновки

Запропоновано математичну модель динамічної похибки датчика для вимірювання миттєвих значень тиску в каналах стволів стрілецької зброї. Встановлено взаємозв'язки між динамічною похибкою, параметрами датчика тиску та параметрами його вхідного сигналу.

Отримана математична модель може бути застосована для вирішення прямої задачі – оцінювання динамічної похибки вимірювання миттєвих значень тиску порохових газів під час пострілу. Крім того, модель може бути основою розв'язання оберненої задачі – обґрунтування раціональних

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

Список використаних джерел

1. Теория и расчёт автоматического оружия / А. К. Голомбовский и др. – Пенза : ПВАИУ, 1973. – 493 с.
2. Кириллов В. М. Основы устройства и проектирования стрелкового оружия / В. М. Кириллов. – Пенза : ПВАИУ, 1963. – 342 с.
3. Серебряков М. Е. Внутренняя баллистика / М. Е. Серебряков. – М. : Оборониздат ГИОП, 1949. – 673 с.
4. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы / И. С. Гоноровский. – М. : 1977. – 608 с.
5. Гальперин М. В. Автоматическое управление / М. В. Гальперин. – М. : Издательский дом ИНФРА-М, 2004. – 224 с.
6. Теория автоматического управления: учеб. для вузов / А. А. Воронова и др. – М. : Высш. шк., 1986. – 367 с.
7. Тынкевич М. А. Численные методы анализа: учеб. пособие / М. А. Тынкевич. – Кемерово, 2002. – 184 с.
8. Крюков О. М. Математичне моделювання датчика миттєвих значень тиску для дослідження внутрішньобалістичних процесів / О. М. Крюков, О. А. Александров // Наукове забезпечення службово-бойової діяльності внутрішніх військ МВС України: зб. тез доп. наук.-практ. конф. – Х. : Акад. ВВ МВС України, 2010. – С. 27–29.

Стаття надійшла до редакції 03.11.2010 р.