

Метрологія та вимірювальна техніка

УДК 623.51

О.А. Александров

Академія внутрішніх військ МВС України, Харків

МОДЕЛЮВАННЯ ВХІДНОГО СИГНАЛУ ТА ДИНАМІЧНОЇ ПОХИБКИ ДАТЧИКА ІМПУЛЬСНОГО ТИСКУ В КАНАЛАХ СТВОЛІВ СТРІЛЕЦЬКОЇ ЗБРОЇ

Запропоновано спосіб зменшення впливу температурної похибки на результати вимірювання тиску. Наведено математичну модель динамічної похибки датчика для вимірювання імпульсного тиску в каналах стволів стрілецької зброї. Встановлено взаємозв'язки між динамічною похибкою, параметрами датчику тиску та параметрами його вхідного сигналу. Визначено шляхи застосування отриманої математичної моделі.

Ключові слова: стрілецька зброя, внутрішньобалістичні процеси, порохові гази, датчик тиску, динамічна похибка, математична модель.

Постановка проблеми

Удосконалення процесів виготовлення, випробування, 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, коволюм, 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 для вирішення цих задач потрібно визначення миттєвих значень тиску в каналі ствола з межею допустимої відносної похибки, що становить 1 ... 3 %.

Зростання точності вимірювання тиску може досягатися за рахунок відповідного покращення технічних характеристик засобів вимірювання тиску і, зокрема, їх найважливішої складової – датчиків 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 при високій температурі 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 в зазначених умовах проведення вимірювань не задовольняє вимогам до динамічної похибки. Це зумовлено, головним чином, занадто великою інерційністю елементів конструкції датчиків, які розраховуються виробниками насамперед для роботи в умовах надвеликих тисків і температур.

Для визначення принципової можливості або меж застосування певного датчика з відомими параметрами для вимірювання тиску в каналі ствола стрілецької зброї необхідно оцінити його динамічну похибку. Вирішення цієї проблеми можливе на основі розробки 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 композиції елементарних динамічних ланок з відомими передаточними функціями.

Аналіз публікацій

Найбільш 3 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 в методі професора Дроздова Н.Ф. При використанні математичного апарату, покладеного в основу вказаного методу, можна уникнути етапу побудови та використання спеціальних таблиць та отримати математичну модель вхідного сигналу в аналітичному вигляді.

Зв'язок спектральних характеристик вихідного сигналу динамічної системи з параметрами її пере-

даточної функції та спектральними характеристиками вхідного сигналу розглядається в роботах [4 – 6]. Але в цих джерелах не даються рекомендації з синтезу виразу для інтегральної динамічної похибки при стохастичних впливах. Це не дає змоги кількісно оцінити точнісні характеристики конкретного датчика та порівняти їх з вимогами до межі допустимої похибки вимірювання тиску.

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

Викладення 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 згорання не змінюється ані під час горіння пороху, ані після згорання його при адіабатному розширенні газів.

3. Швидкість горіння пороху пропорційна тиску.

4. Другорядні роботи порохових газів, наприклад, такі, що викликають рух частин та механізмів зброї, нагрівання ствола й інше, враховані у відповідних коефіцієнтах Дроздова Н.Ф.

5. Рух снаряду починається тоді, коли в коморі в результаті згорання частини заряду розвинувся тиск форсування, достатній для вривання пояска в нарізи на повну глибину. Поступовість вривання й зростання опору пояска не враховується.

Робота вривання пояска окремо не враховується так само, як і збільшення швидкості снаряду при поступовому вриванні пояска.

Розтягом стінок ствола при пострілі, проривом порохових газів через зазори між ведучим пояском та каналом, а також опором повітря в каналі ствола нехтують.

Охолодження газів у результаті теплопередачі стінок ствола безпосередньо під час руху кулі в каналі ствола не враховується.

Рух кулі розглядається до моменту проходження її дна через дульний зріз.

Значимими для математичної моделі вхідного сигналу датчика є такі параметри:

Конструктивні особливості ствола зброї: об'єм камори W_0 , площа перетину каналу ствола (включно з нарізами) s , довжина шляху снаряду по каналу l_d ; конструктивні особливості кулі: маса кулі q , тиск форсування p_0 ; маса заряду пороху η ; сила пороху f ; координата ділянки ствола x ; частина заряду ψ , що згорає до початку руху кулі; параметр Дроздова B ; газова стала θ .

Залежність тиску від пройденого кулею шляху x , отриману Дроздовим Н.Ф., можна представити у вигляді:

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

де $l_\psi(x)$ - залежність кількості пороху, що залишилась при проходженні кулею шляху x у каналі ствола.

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

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

де $v_{\text{пр}}$, v_k - відповідно приведена та максимальна швидкість кулі; l_x - довжина казенної частини ствола.

Для знаходження часу від початку руху кулі скористаймося виразом

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

Залежність тиску на певній ділянці каналу ствола від часу, що пройшов з початку руху кулі до моменту досягнення кулею цієї ділянки, можливо отримати, поєднавши (1) - (3) у систему рівнянь:

Приклади рішень системи рівнянь для певних видів стрілецької зброї, що стоять на озброєнні підрозділів внутрішніх військ, представлені на рис. 1.

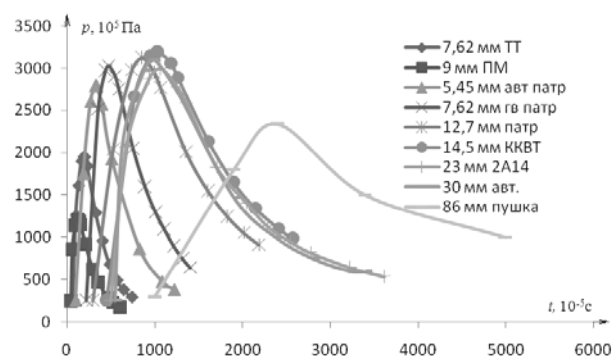


Рис. 1. Рішення системи рівнянь (1) – (3) для деяких видів стрілецької зброї

Оскільки подальше використання результатів математичного моделювання вхідного сигналу передбачає застосування ЕОМ, а з аналітичним рішенням системи (1) – (3) складно проводити операції інтегрування, доцільно виконати інтерполяцію залежності тиску від часу [7] у вигляді поліному:

$$p(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + \dots + a_{n-1} \cdot t^{n-1}, \quad (4)$$

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) , що відповідає тривалості процесу пострілу, може розглядатися як сигнал, що представляє собою неперіодичне коливання. Знайдемо його спектральну щільність $S(\omega)$. Виділивши довільний проміжок часу T , що містить інтервал (t_1, t_2) , представимо $p(t)$ як суму спектральних складових [5]:

$$p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{in\omega_1 t} \quad 0 < t < T, \quad (5)$$

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

Враховуючи, що $c_n = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} p(t) e^{-in\omega_1 t} dt$, можна

подати (5) у вигляді

$$p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\int_{t_1}^{t_2} p(x) e^{-in\omega_1 x} dx \right] e^{in\omega_1 t} \frac{\omega_1}{2\pi}. \quad (6)$$

За межами відрізка $(0, T)$ ряд (6) 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 повинне бути нескінченно великим. Спрямовуючи T у нескінченність, отримуємо нескінченно малі амплітуди гармонічних складових, сума яких зображує вихідну неперіодичну функцію $p(t)$, задану в інтервалі $t_1 < t < t_2$. Кількість гармонічних складових, що входять до (6), буде при цьому нескінченно великою, а відстань між спектральними лініями нескінченно малою, тобто спектр стає суцільним. Тому можна в виразі (6) замінити ω_1 на $d\omega_1$, $n\omega_1$ – на ω , а операцію складання замінити операцією інтегрування.

Таким чином, приходимо до подвійного інтегралу Фур'є:

$$p(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} \left[\int_{t_1}^{t_2} p(x) e^{-i\omega x} dx \right] d\omega. \quad (7)$$

Внутрішній інтеграл

$$S(\omega) = \int_{t_1}^{t_2} p(t) e^{-i\omega t} dt \quad (7)$$

з виразу (7) 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

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} p(t) e^{-i\omega t} dt = 2 \int_0^{\infty} p(t) e^{-i\omega t} dt. \quad (9)$$

Зв'язок між середньквадратичним значенням (СКЗ) сигналу на вході датчика тиску та його спектральною щільністю можна представити в вигляді

$$\sigma_{\text{вх}} = \sqrt{2 \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega}. \quad (10)$$

Датчик тиску, параметри якого визначають його передаточну функцію $W(j\omega)$ [8] і вважаються відомими, є динамічною системою, яка за рахунок 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

$$S_{\text{вих}}(\omega) = |W(j\omega)|^2 S(\omega). \quad (11)$$

Тоді вираз для СКЗ вихідного сигналу датчика прийме вигляд

$$\sigma_{\text{вих}} = \sqrt{2 \int_0^{\infty} |W(j\omega)|^2 S(\omega) d\omega}. \quad (12)$$

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

$$\delta = \frac{|\sigma_{\text{вих}} - \sigma_{\text{вх}}|}{\sigma_{\text{вх}}}. \quad (13)$$

Підставивши вирази (10) та (12) до (13), отримаємо остаточно

$$\delta = \frac{\left| \sqrt{2 \int_0^{\infty} |W(j\omega)|^2 S(\omega) d\omega} - \sqrt{2 \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega} \right|}{\sqrt{2 \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega}}. \quad (14)$$

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.

Висновки

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

Отримана математична модель може бути застосована для вирішення прямої задачі – оцінки динамічної похибки вимірювання миттєвих значень тиску порохових газів під час пострілу.

Крім того, модель може бути покладена в основу розв'язання зворотної задачі – обґрунтування раціональних параметрів датчика тиску, який характеризується обмеженою на заданому рівні динамічною похибкою.

Список літератури

1. Голомбовский А.К. 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.: ИНФРА-М, 2004. – 224 с.
6. Воронова А.А. Теория автоматического управления / А.А. Воронова и др. - М.: Высшая шк., 1986. – 367 с.
7. Тынкевич М.А. Численные методы анализа: учебное 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 // Збірник тез доповідей НПК “Наукове забезпечення службово-бойової діяльності внутрішніх військ МВС України” Академії ВВ МВС України. – 2010. – С. 27 – 29.

Надійшла до редколегії 21.12.2012

Рецензент: д-р військ. наук, проф. Г.А. Дробаха, Академія внутрішніх військ МВС України, Харків.

ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ДАВЛЕНИЯ В КАНАЛАХ СТВОЛОВ СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ

А.А. Александров

Предложен способ уменьшения влияния температурной погрешности на результаты измерения давления. Приведена математическая модель динамической погрешности датчика для измерения импульсного давления в каналах стволов стрелкового оружия. Установлены взаимосвязи между динамической погрешностью, параметрами датчика давления и параметрами его входного сигнала. Определены пути применения полученной математической модели.

Ключевые слова: стрелковое оружие, внутренне баллистические процессы, пороховые газы, датчик давления, динамическая погрешность, математическая модель.

THE ESTIMATION OF DYNAMIC MEASUREMENT ERROR OF PULSE PRESSURE IN THE BARREL OF SMALL ARMS

A.A. Alexanderov

A method for reducing the influence of temperature on the accuracy of pressure measurement results has been proposed. A mathematical model for dynamic error sensor for the measurement of pulse pressure in the bore of small arms has been shown. The relationship between the dynamic error and parameters of the pressure sensor and the parameters of its input signal have been established. The ways of applying the resulting mathematical model have been identified.

Keywords: shooter weapon, inwardly ballistic processes, gunpowder gases, pressductor, dynamic error, mathematical model.