

УДК 623.51

О. М. Крюков, О. А. Александров, В. В. Антонєць

## ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ЦИФРОВОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ВНУТРІШНЬОБАЛІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У СТРІЛЕЦЬКІЙ ЗБРОЇ

Визначено проблему підвищення точності вимірювання миттєвих значень імпульсного тиску. Для відновлення вхідного сигналу датчика імпульсного тиску запропоновано застосовувати цифрову корекцію на основі обернення білінійного  $z$ -перетворення передавальної функції датчика тиску. Отримано вирази для визначення миттєвих значень відновлюваного сигналу під час реалізації алгоритму корекції на ЕОМ.

*К л ю ч о в і с л о в а:* датчик імпульсного тиску, передавальна функція, цифровий фільтр, коректор.

**Постановка проблеми.** Інформація про імпульсний тиск, яку отримують під час експериментальних випробувань нових та існуючих зразків стрілецької зброї і боєприпасів, використовується у моделюванні внутрішньобалістичних процесів, для визначення технічного стану, уточнення рішень на ремонт або припинення експлуатації озброєння та боєприпасів, вона також може бути покладена в основу модернізації існуючих чи створення нових зразків зброї.

Можливість розв'язування цих важливих задач значною мірою залежить від подальшого підвищення точності вимірювання імпульсного тиску в каналах стволів стрілецької зброї. Зазначимо, оскільки темпи зміни тиску у середовищі порівняно великі (наприклад, тривалість імпульсу тиску не перевищує 0,003 с [1]), головна роль у спотворенні результатів вимірювань належить саме динамічній похибці датчика, який є інерційною динамічною ланкою [2].

Конструкції сучасних (наприклад, тензометричних) датчиків [3], які застосовують у засобах вимірювання імпульсного тиску, майже вичерпали свій потенціал зменшення динамічної похибки, оскільки розробники повинні враховувати достатньо високі вимоги до міцності конструкції, зумовлені великою верхньою межею діапазону вимірювання (до 320 МПа), що неминує збільшує інерційність рухомих частин датчиків.

Для зменшення (компенсації) динамічної похибки необхідне відновлення миттєвих значень тиску на вході датчика з урахуванням характеру зміни тиску в часі та особливостей перетворення вимірювального сигналу кожним з елементів датчика імпульсного тиску [3]. Одним із перспективних шляхів виконання цього завдання є реалізація алгоритму оберненого перетворення (відновлення) вихідного сигналу датчика тиску на основі застосування методів цифрового оброблення сигналів з використанням ЕОМ.

**Аналіз публікацій.** Дослідження способів оброблення вимірювальної інформації за відомих параметрів перетворювачів, з яких складаються засоби вимірювання, наведені у працях [4–6]. У цих дослідженнях викладено методи отримання інформації про вхідний сигнал за допомогою коректорів вихідного сигналу як різновиду цифрових фільтрів, отриманих на основі аналізу параметрів відомих передавальних функцій перетворювачів.

Однак у згаданих роботах корекція сигналу проводилася лише з урахуванням параметрів окремих первинних перетворювачів [6], тому застосування цих способів не дозволяє отримати бажаного обмеження динамічної похибки. Недостатньо висвітлені також питання розроблення способів та алгоритмів реалізації цифрових коректорів за допомогою ЕОМ [4; 5].

**Метою статті** є обґрунтування структури і моделювання цифрового коректора, а також алгоритмізація його функціонування для відновлення вхідного сигналу датчика імпульсного тиску.

**Виклад основного матеріалу.** Як показано у роботі [3], датчик імпульсного тиску можна подати у вигляді послідовно з'єднаних елементарних перетворювачів (рис. 1).

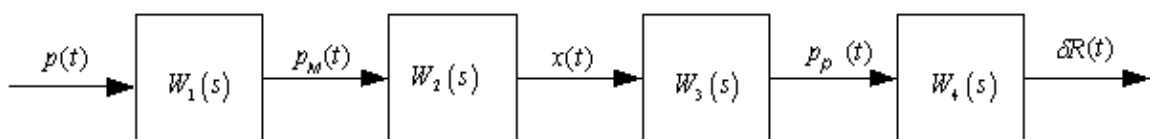


Рис. 1. Структурна схема датчика тиску

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 є  $p_m(t)$  – 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 (зокрема, перетворення Лапласа), можна отримати передавальну функцію датчика [1]:

$$W(s) = \frac{1}{T_H s + 1} \cdot \frac{k_M}{T_M^2 s^2 + 2\xi_2 T_M s + 1} \cdot \frac{k_P}{T_P^2 s^2 + 2\xi_3 T_P s + 1} K, \quad (1)$$

де  $k_M, T_M, \xi_2$  – передавальний коефіцієнт, стала часу та параметр затухання мембрани, які визначаються її геометричними розмірами, масою, жорсткістю, модулем пружності, коефіцієнтом внутрішнього тертя та коефіцієнтом Пуассона матеріалу мембрани;  $k_P, T_P, \xi_3$  – передавальний коефіцієнт, стала часу та параметр затухання рідини, що залежать від її стискуваності, кінематичної в'язкості і густини, а також від геометричних розмірів порожнини;  $K$  – тензометричний коефіцієнт матеріалу чутливого елемента [1].

Вихідний сигнал датчика піддається дискретизації та квантуванню за допомогою аналого-цифрового перетворювача. В подальшому масив миттєвих значень тиску може бути оброблений з використанням певного алгоритму на ЕОМ.

Математичний апарат цифрової корекції динамічної похибки датчика тиску оснований на методах цифрової фільтрації вимірювального сигналу [4; 5]. Коректор представляє собою віртуальний фільтр, передавальна функція  $W^*(z)$  якого отримана на основі обернення і білінійного  $z$ -перетворення [6] передавальної функції датчика тиску  $W(s)$ :

$$W^*(z) = \frac{1}{W(s)} \Big|_{s=2(1-z^{-1})}^{(1+z^{-1})^{-1}/t_d}, \quad (2)$$

де  $t_d$  – період дискретизації вхідного сигналу цифрового коректора.

Застосуємо білінійне  $z$ -перетворення до передавальної функції  $W(s)$  відповідно до (2) та позначимо  $k = \frac{1}{k_M k_P K}$ ;  $\varphi_1 = T_H \cdot \frac{2}{t_d}$ ;  $\varphi_2 = T_M \cdot \frac{2}{t_d}$ ;  $\varphi_3 = T_P \cdot \frac{2}{t_d}$ .

Після перетворень одержимо:

$$W^*(z) = k (1 + \varphi_1) \left(1 + 2\xi_2 \varphi_2 + \varphi_2^2\right) \left(1 + 2\xi_3 \varphi_3 + \varphi_3^2\right) \times \\ \times \frac{\left(1 + \left(\frac{1 - \varphi_1}{1 + \varphi_1}\right) z^{-1}\right)}{1 + z^{-1}} \times \frac{\left(1 + \left(\frac{1 - 2\varphi_2^2}{1 + 2\xi_2 \varphi_2 + \varphi_2^2}\right) z^{-1} + \left(\frac{\varphi_2^2 - 2\xi_2 \varphi_2}{1 + 2\xi_2 \varphi_2 + \varphi_2^2}\right) z^{-2}\right)}{1 + 2z^{-1} + z^{-2}} \times \\ \times \frac{\left(1 + \left(\frac{1 - 2\varphi_3^2}{1 + 2\xi_3 \varphi_3 + \varphi_3^2}\right) z^{-1} + \left(\frac{\varphi_3^2 - 2\xi_3 \varphi_3}{1 + 2\xi_3 \varphi_3 + \varphi_3^2}\right) z^{-2}\right)}{1 + 2z^{-1} + z^{-2}}. \quad (3)$$

Вираз (3) є моделлю цифрового коректора вихідного сигналу датчика.

З метою поділу коректора на субкоректори введемо коефіцієнти  $K_1, K_{21}, K_{22}, K_{31}, K_{32}$  і передавальний коефіцієнт  $K_{tr}$ . Вони залежать тільки від параметрів  $k, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  і можуть бути обчислені один раз перед початком процесу оброблення вихідного сигналу датчика, відповідно до виразів:

$$K_{tr} = k(1 + \varphi_1) \left(1 + 2\xi_2\varphi_2 + \varphi_2^2\right) \left(1 + 2\xi_3\varphi_3 + \varphi_3^2\right); \quad (4)$$

$$K = \frac{1 - \varphi}{1 + \varphi}; \quad (5)$$

$$K = \frac{1 - 2\varphi}{1 + 2\xi\varphi + \varphi^2}; \quad (6)$$

$$K_{22} = \frac{\varphi_2^2 - 2\xi_2\varphi_2}{1 + 2\xi_2\varphi_2 + \varphi_2^2}; \quad (7)$$

$$K_{31} = \frac{1 - 2\varphi_3^2}{1 + 2\xi_3\varphi_3 + \varphi_3^2}; \quad (8)$$

$$K_{32} = \frac{\varphi_3^2 - 2\xi_3\varphi_3}{1 + 2\xi_3\varphi_3 + \varphi_3^2}. \quad (9)$$

Таким чином, модель цифрового коректора матиме вигляд:

$$W(z) = K \frac{(1 + K_1 z^{-1})}{1 + z^{-1}} \cdot \frac{(1 + K_{21} z^{-1} + K_{22} z^{-2})}{1 + 2z^{-1} + z^{-2}} \cdot \frac{(1 + K_{31} z^{-1} + K_{32} z^{-2})}{1 + 2z^{-1} + z^{-2}}. \quad (10)$$

Структура коректора може бути представлена блок-схемою (рис. 2).

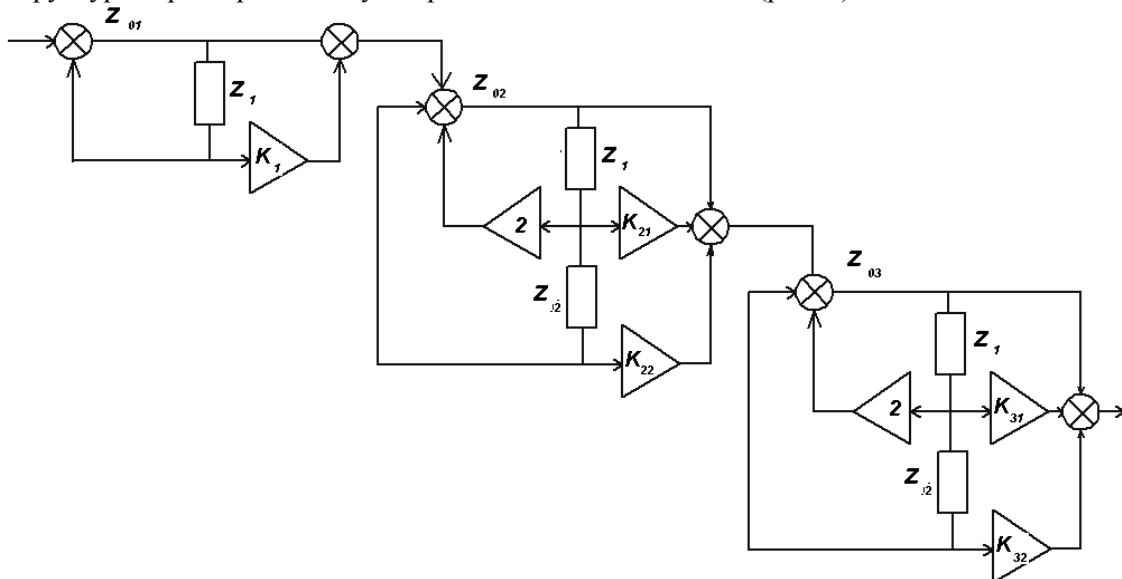


Рис. 2. Блок-схема коректора

Оператори  $z^{-1}$  і  $z^{-2}$  у виразі (10) реалізуються шляхом затримки сигналу на 1 і 2 інтервалах дискретизації ( $t_d$  та  $2t_d$  відповідно). На рис. 2 вони зображені у вигляді елементів  $z_1$  і  $z_2$ .

Для елементарних ланок другого, першого та нульового порядку, з яких складається датчик тиску, співвідношення, що зв'язують вихідний і вхідний сигнали коректора, матимуть вигляд:

$$\begin{aligned} Y(n-2) \left(4T_M^2 + t_d^2 - 4\xi_2 T_M t_d\right) - Y(n-1) \left(8T_M^2 - 2t_d^2\right) + Y(n) \left(4T_M^2 + 4\xi_2 T_M t_d + t_d^2\right) = \\ = X(n) k_M t_d^2 + X(n-1) 2k_M t_d^2 + X(n-2) k_M t_d^2; \end{aligned} \quad (11)$$

$$Y(n-1)(t_d - 2T_n) + Y(n)(2T_n + t_d) = X(n)t_d + X(n-1)t_d; \quad (12)$$

$$X(n) = KY(n). \quad (13)$$

Ці вирази дозволяють визначати миттєві значення вихідного сигналу коректора з урахуванням параметрів конкретного датчика тиску.

### **Висновки**

Запропоновано математичну модель цифрового коректора, отриману на основі обернення та білінійного  $z$ -перетворення передавальної функції датчика тиску. Обґрунтовано структуру цифрового коректора та запропоновано вирази для алгоритмізації його функціонування на ЕОМ.

Результати роботи можуть бути використані у розробленні та обґрунтуванні параметрів засобів вимірювання імпульсного тиску.

### **Список використаних джерел**

1. Крюков, О. М. Дослідна установка для вимірювання миттєвих значень тиску в каналах стволів стрілецької зброї та артилерійських систем [Текст] / О. М. Крюков, О. А. Александров // Метрологія та прилади. – 2011. – № 4 (30). – С. 62–67.
2. Чинков, В. М. Основи теорії похибок засобів вимірювальної техніки [Текст] / В. М. Чинков. – Х. : НТУ “ХП”, 2008. – 88 с.
3. Полищук, Е. С. Измерительные преобразователи [Текст] / Е. С. Полищук. – К. : Вища шк., 1990. – 480 с.
4. Гутников, В. С. Фильтрация измерительных сигналов [Текст] / В. С. Гутников. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-е (1981), 1990. – 192 с.
5. Мизин, И. А. Цифровые фильтры [Текст] / И. А. Мизин, А. А. Матвеев. – М. : Связь, 1979. – 242 с.
6. Веретенников, В. Г. Теоретическая механика. Вывод и анализ уравнений движения на ЭВМ [Текст] / В. Г. Веретенников. – М. : Высш. шк., 1990. – 176 с.

*Стаття надійшла до редакції 07.06.2012 р.*