

УДК 623.51

О.М. Крюков, О.А. Александров, В.В. Афанасьєв, О.Є. Забула

Академія внутрішніх військ МВС України, Харків

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ПОХИБКИ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНОГО ДАТЧИКА ІМПУЛЬСНОГО ТИСКУ

Проведено оцінку впливу температури порохових газів та електричного струму джерела живлення на вихідний сигнал тензорезисторного датчика для вимірювання тиску в каналах стволів стрілецької зброї. Отримано математичну модель температурної похибки. Запропоновано спосіб зменшення впливу температурної похибки на результати вимірювання тиску.

Ключові слова: стрілецька зброя, внутрішньобалістичні процеси, порохові гази, датчик тиску, температурний вплив, тензорезисторний датчик, математична модель.

Вступ

Постановка проблеми. Датчики засобів вимірювання миттєвих значень тиску в каналах стволів стрілецької зброї працюють в жорстких температурних умовах при швидкозмінному вхідному сигналі та мають відповідати високим вимогам до верхньої межі діапазону вимірювання і точності вимірювання [1 - 4].

Для забезпечення вимог до точності вимірювання тиску необхідно дослідити вплив температури на метрологічні характеристики датчика шляхом побудови математичної моделі температурної похибки. Така модель дозволить проаналізувати особливості оцінки і врахування температурного впливу на вимірювальний сигнал, а також обґрунтувати вимоги до системи стабілізації температури датчика тиску.

Аналіз публікацій. Найбільш розповсюджені методи оцінки впливу температури на метрологічні характеристики датчиків тиску розглянуто авторами робіт [5-8]. В роботах [5], [6] пропонується обмежувати діапазон робочих температур середовища, в межах якого температурним впливом можна знехтувати, або визначати і враховувати в результатах вимірювань коефіцієнт, що характеризує лінійну залежність статичних характеристик датчика від температури [7]. Суттєвими обмеженнями вказаних робіт є те, що верхня межа робочого діапазону температур датчика миттєвих значень тиску значно вища за вказану в [5-7], а температура датчика в процесі вимірювань може змінюватись.

В роботі [8] розглядаються датчики тиску, які працюють в умовах впливу температури порохових газів, та наведено спосіб зменшення температурного впливу, який передбачає врахування поправки, що визначається апріорно розрахунковим. У вказаній роботі розглядаються варіанти пасивного охолодження датчика тиску за рахунок теплообміну з навколишнім середовищем.

Таким чином, відомі методи оцінки впливу температури на метрологічні характеристики датчиків

миттєвих значень тиску не дають змоги отримати точне значення температурної похибки. Розглянуті способи алгоритмічного зменшення температурного впливу не дозволяють врахувати вплив температури на результати вимірювань, а застосування запропонованих способів температурної стабілізації не забезпечує гарантованого зменшення впливу температури до нехтовно малого рівня.

Метою статті є забезпечення потрібної точності підготовки вимірювальної інформації про миттєві значення тиску в каналах стволів стрілецької зброї на основі розробки математичної моделі температурної похибки датчика тиску та врахування відповідної поправки в результатах вимірювання.

Викладення основного матеріалу

Датчик тиску (рис. 1), температурна похибка якого досліджується, складається з корпусу 1, що закривається кришкою 2, порожнини 3, заповненої малостискуваною діелектричною рідиною 4, в якій розташований тензорезисторний чутливий елемент 5. В корпусі виконаний приймальний канал 6, через який порохові гази діють на мембрану 7, яка сприймає вимірюваний тиск та передає його до рідини 4. Рідина 4 всебічно обтискає тензорезисторний чутливий елемент 5, що призводить до зміни його електричного опору. Тензорезисторний чутливий елемент 4 включений в плече мостового перетворювача 8, вихідним сигналом якого є напруга вимірювальної діагоналі моста U , пропорційна вимірюваному тиску p (міст живиться напругою постійного струму U_E).

Функція перетворення датчика тиску в статичному режимі (статична характеристика) має вигляд [9, 10]

$$U = kp,$$

а передаточний коефіцієнт визначається виразом

$$k = \frac{3}{16} \frac{r_M^4 (1 - \mu^2)}{l_p \beta E h_M^3} K, \quad (1)$$

де r_M – радіус мембрани;
 h_M – товщина мембрани;
 l_p – довжина циліндричної порожнини з рідиною;
 β – стискуваність рідини;
 E – модуль пружності матеріалу мембрани;
 K – тензометричний коефіцієнт тензорезисторного чутливого елементу;
 μ – коефіцієнт Пуасона матеріалу мембрани.

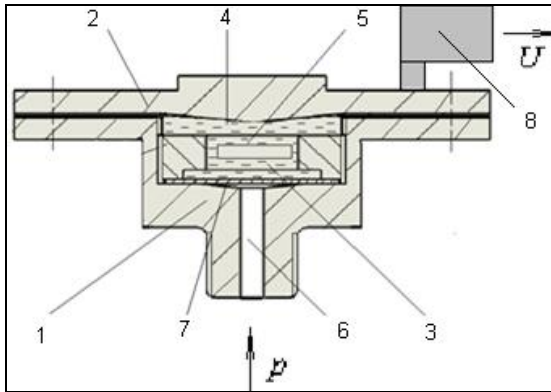


Рис. 1. Розріз конструкції датчик тиску

Оскільки процеси теплообміну між джерелами тепла та елементами датчика тиску проходять повільно в порівнянні з тривалістю вимірювання, розроблятимемо математичну модель температурної похибки на основі аналізу зміни статичної характеристики датчика від температури.

При зростанні температури мембрани та корпусу на ΔT_{MK} , рідини на ΔT_p , тензорезисторного чутливого елементу на ΔT_T параметри в правій частині (1) зміняться таким чином:

$$r_M' = r_M (1 + \alpha_{MK} \Delta T_{MK}), \quad h_M' = h_M (1 + \alpha_{MK} \Delta T_{MK}),$$

$$l_p' = l_p (1 + \alpha_p \Delta T_p), \quad K' = \frac{K}{1 + \alpha \Delta T_T},$$

$$E' = k_{MP} (\Delta T_{MK}) E, \quad (2) \quad \beta' = k_\beta (\Delta T_p) \beta,$$

$$\mu' = k_\mu (\Delta T_{MK}) \mu,$$

де α_p – коефіцієнт об'ємного теплового розширення рідини;

α_{MK} – коефіцієнт лінійного теплового розширення матеріалу мембрани та корпусу;

$k_{MP} (\Delta T_{MK})$ – коефіцієнт, що характеризує зміну початкового значення модуля пружності матеріалу мембрани під впливом температури;

$k_\beta (\Delta T_p)$ – коефіцієнт, що характеризує зміну початкового значення стискуваності рідини під впливом температури;

$k_\mu (\Delta T_{MK})$ – коефіцієнт, що характеризує зміну початкового значення коефіцієнта Пуасона для матеріалу мембрани під впливом температури;

α – параметр, що характеризує залежність тензометричного коефіцієнту від температури.

Залежності $k_{MP} (\Delta T_{MK})$, $k_\beta (\Delta T_p)$, $k_\mu (\Delta T_{MK})$ відомі та опубліковані в джерелах інформації [11 – 15].

Якщо мостовий перетворювач має плечі з опорами R_1, R_2, R_3, R (тут R – опір тензорезисторного чутливого елементу), умова балансу моста подається у вигляді

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R, \quad (3)$$

За наявності зміни температури елементів датчика умова балансу моста порушиться, а відносна зміна δU_T напруги на вимірювальній діагоналі моста становитиме

$$\delta U_T = \frac{U' - U}{U'}, \quad (4)$$

де U' – напруга на вимірювальній діагоналі моста за наявності зміни температури.

Підставивши до (4) вирази (1) і (2) та провівши спрощення, отримаємо

$$\delta U_T = 1 - \frac{1 + \alpha_{MK} \Delta T_{MK}}{(1 + \alpha_p \Delta T_p)(1 + \alpha \Delta T_T)} \times \frac{1 - \mu^2 [k_\mu (\Delta T_{MK})]^2}{k_\beta (\Delta T_p) k_{MP} (\Delta T_{MK}) (1 - \mu^2)}, \quad (5)$$

Відзначимо, що зміна ΔR опору тензорезисторного чутливого елементу за рахунок нагрівання визначається виразом

$$\Delta R = R \left(1 + \alpha \frac{Q_E}{\alpha_1 s_1 t} \right), \quad (6)$$

має квазістатичний характер і оперативно компенсується відповідним регулюванням опору суміжного або протилежного плеча моста, тому в подальшому не враховується.

Вираз (5) представляє собою математичну модель температурної похибки датчика тиску та визначає відносну зміну вихідного параметра (напруги на вимірювальній діагоналі мосту) від зміни температури елементів датчика.

Запропонована модель дозволяє проаналізувати температурну похибку датчика за різних температур та при різних сукупностях його фізичних параметрів. На основі такого аналізу може бути визначено потребу у температурній стабілізації датчика тиску та обґрунтовано вимоги до системи температурної стабілізації.

Проведемо кількісну оцінку похибки δU_T , яка зумовлена нагріванням елементів датчика при поодиноких пострілах та при стрільбі чергами.

Оцінимо нагрів елементів датчика, спричинений температурним впливом струму живлення вимірювального моста.

Нехай протягом деякого часу до початку вимірювань на діагональ живлення моста подається струм напругою U_E . На протязі цього часу тепловий потік, що виникає за рахунок передачі теплоти між елементами датчика, спричинений нагрівом тензорезисторного чутливого елемента, стає постійним. Знайдемо вираз, що описує процес теплопередачі від тензорезисторного чутливого елемента до мембрани та стінок корпусу.

Враховуючи те, що перетворення електричної енергії на теплову є повним, кількість теплоти Q_E , що виділяється в чутливому елементі, визначимо виразом

$$Q_E = \frac{U_E^2}{R} t, \quad (7)$$

де t – тривалість проходження струму.

Згідно з конструктивними особливостями датчика процес теплопередачі від тензорезисторного чутливого елемента включає п'ять стадій. Перша стадія – тепловіддача від тензорезисторного чутливого елемента рідині, друга – теплопровідність через рідину, третя – тепловіддача від рідини стінкам корпусу датчика (а також мембрані), четверта – теплопровідність через стінки корпусу, п'ята – тепловіддача від стінок корпусу повітря.

Враховуючи те, що тепловий потік на всіх проміжках теплообміну повинен залишатися сталим, маємо

$$\begin{aligned} \frac{Q_E}{t} = \frac{U_E^2}{R} &= \alpha_1 S_1 \Delta T_{\text{тен}} = \frac{\lambda_1}{L_1} S_1 \Delta T_{\text{рід}} = \\ &= \alpha_2 S_2 \Delta T_{\text{рк}} = \frac{\lambda_2}{L_2} S_2 \Delta T_{\text{к}} = \alpha_3 S_3 \Delta T_{\text{кп}}, \end{aligned} \quad (8)$$

де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від тензорезисторного чутливого елемента до рідини;

S_1 – площа поверхні тензорезисторного чутливого елемента;

λ_1 – теплопровідність рідини;

L_1 – товщина шару рідини;

α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від рідини до стінок корпусу датчика тиску;

$\Delta T_{\text{рк}}$ – різниця температур між рідиною та корпусом;

S_2 – внутрішня площа стінок корпусу;

λ_2 – теплопровідність матеріалу корпусу;

L_2 – середня товщина стінок корпусу;

α_3 – коефіцієнт тепловіддачі від корпусу датчика тиску до повітря;

S_3 – зовнішня площа поверхні корпусу датчика тиску;

$\Delta T_{\text{кп}}$ – різниця температур між корпусом та повітрям;

$\Delta T_{\text{к}}$ – різниця температур між внутрішньою та зовнішньою поверхнями корпусу;

$\Delta T_{\text{рід}}$ – різниця температур між шарами рідини, що контактують з чутливим елементом та корпусом;

$\Delta T_{\text{тен}}$ – різниця температур між тензорезистором та рідиною.

Визначимо втрату теплоти корпусом датчика за рахунок вільної конвекції, розглядаючи його в першому наближенні як циліндр діаметром d та висотою h_k .

Число Грасгофа [15], що характеризує співвідношення підйомної сили, (яка виникає внаслідок різниці густини повітря) та сили молекулярного тертя, знаходимо з виразу

$$Gr = \frac{\beta_k h_k^3 g \Delta T_{\text{мк}}}{\nu^2}, \quad (9)$$

де λ_3 – теплопровідність повітря;

ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря;

g – прискорення сили ваги;

β_k – коефіцієнт об'ємного розширення повітря.

Для найбільш характерних сполучень параметрів виразу (9) число Грасгофа дає підстави вважати рух повітря ламінарним. Виходячи з цього, визначається число Нуссельта, що характеризує конвективний теплообмін між повітрям та зовнішньою поверхнею датчика [15]

$$Nu = 0,75 (Gr \cdot Pr)^{0,25}, \quad (10)$$

де Pr – число Прандтля, яке визначає фізичні властивості повітря.

Звідси коефіцієнт тепловіддачі від корпусу датчика тиску до повітря становитиме [15]

$$\alpha_3 = \frac{Nu \cdot \lambda_3}{h_k}. \quad (11)$$

З (8) отримаємо $\Delta T_{\text{Т}}$, $\Delta T_{\text{р}}$, $\Delta T_{\text{мк}}$:

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{Т}} &= \frac{U_E^2}{\alpha_1 S_1 R} + \frac{L_1 U_E^2}{S_1 \lambda_1 R} + \frac{U_E^2}{\alpha_2 S_2 R} + \\ &+ \frac{L_2 U_E^2}{\lambda_2 S_2 R} + \frac{U_E^2}{\alpha_3 S_3 R}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\Delta T_{\text{р}} = \frac{L_1 U_E^2}{S_1 \lambda_1 R} + \frac{U_E^2}{\alpha_2 S_2 R} + \frac{L_2 U_E^2}{\lambda_2 S_2 R} + \frac{U_E^2}{\alpha_3 S_3 R}, \quad (13)$$

$$\Delta T_{\text{мк}} = \frac{L_2 U_E^2}{\lambda_2 S_2 R} + \frac{U_E^2}{\alpha_3 S_3 R}. \quad (14)$$

Оцінимо нагрів елементів датчика, спричинений температурним впливом порохових газів за один постріл. Тепловіддача від порохових газів до внутрішньої поверхні приймального каналу та мембрани датчика тиску становить

$$Q_{\text{п}} = \alpha_{\text{gm}} S_4 t_{\text{п}} \Delta T_{\text{пг}}, \quad (15)$$

де $Q_{\text{п}}$ – кількість теплоти, що переноситься до мембрани, корпусу та рідини;

$\alpha_{\text{п}}$ – коефіцієнт тепловіддачі порохових газів до матеріалу мембрани та стінок приймального каналу;

S_4 – площа поверхні мембрани та стінок приймального каналу, через які проходить теплопередача;

$t_{\text{п}}$ – тривалість температурного впливу з боку порохових газів на мембрану та стінки приймального каналу;

$\Delta T_{\text{пг}}$ – різниця температур поверхонь мембрани та стінок приймального каналу, що контактують з пороховими газами.

В першому наближенні кількість теплоти, що віддається від порохових газів до внутрішньої поверхні приймального каналу та мембрани датчика тиску, після закінчення теплообміну та вирівнювання температури усіх елементів датчика дорівнюватиме кількості теплоти, що набувають всі елементи датчика з більш низькою температурою. Тобто, за законом Ріхмана [11]

$$Q_{\text{п}} = c_{\text{мк}} m_{\text{мк}} \Delta T_{\text{Д}} + c_{\text{р}} m_{\text{р}} \Delta T_{\text{Д}} + c_{\text{Т}} m_{\text{Т}} \Delta T_{\text{Д}}, \quad (16)$$

де $\Delta T_{\text{Д}}$ – різниця між початковою температурою елементів датчика, та температурою, яку вони набули після завершення теплообміну;

$c_{\text{мк}}$ – питома теплоємність матеріалу мембрани та корпусу датчика;

$m_{\text{мк}}$ – маса мембрани та корпусу датчика.

$c_{\text{р}}$ – питома теплоємність рідини;

$m_{\text{р}}$ – маса рідини;

$c_{\text{Т}}$ – питома теплоємність матеріалу тензорезисторного чутливого елемента;

$m_{\text{Т}}$ – маса тензорезисторного чутливого елемента.

Провівши перетворення, отримаємо вираз для визначення $\Delta T_{\text{Д}}$:

$$\Delta T_{\text{Д}} = \frac{\alpha_{\text{гм}} S_4 t_{\text{п}} \Delta T_{\text{пг}}}{c_{\text{мк}} m_{\text{мк}} + c_{\text{р}} m_{\text{р}} + c_{\text{Т}} m_{\text{Т}}}. \quad (17)$$

Вирази (12), (13), (14) та (17) дозволяють кількісно оцінити зміну температури мембрани, рідини та тензорезисторного чутливого елемента для деяких найбільш характерних сполучень параметрів датчика тиску. Для найбільш характерних параметрів датчика тиску та параметрів заряджання зміна температури мембрани при стрільбі одиночними пострілами складатиме 1...5 °С, рідини – 0,1...2 °С, тензорезисторного чутливого елемента 1...10 °С, а температурна похибка становитиме 0,5...3 %. обсудить

Відомо, що допустима відносна температурна похибка датчика тиску не повинна перевищувати 1,0 ... 1,5 % [1]. У випадках, коли прогнозоване дійсне значення температурної похибки перевищує цей допуск, доцільно застосування системи температурної стабілізації чутливого елемента датчика тиску.

При цьому для кожного з поєднань конструктивних параметрів датчика тиску та вимог до точності вимірювання тиску вираз (4) дозволяє обґрунтувати вимоги до допустимих відхилень температури чутливого елемента, тобто задати вихідні вимоги до системи термостабілізації.

Запропонована система термостабілізації передбачає додаткове застосування в складі датчика тиску (конструкцію якого наведено на рис. 1) термопари, елемента Пельтьє та блоку управління.

Термопара 6 (рис. 2) розміщується поруч з тензорезисторним чутливим елементом 4, який поєднується з елементом Пельтьє 7. Вихідний сигнал термопари поступає до блоку управління 8, який формує сигнал, що управляє елементом Пельтьє 7.

Температурна стабілізація чутливого елемента реалізується таким чином. Термопара 6 постійно виробляє сигнал вимірювальної інформації про поточне значення температури в місці розташування чутливого елемента 4 та подає його до блоку управління 8. Блок управління 8 здійснює віднімання (порівняння) поточного значення температури чутливого елемента з номінальним її значенням з урахуванням знаку різниці.

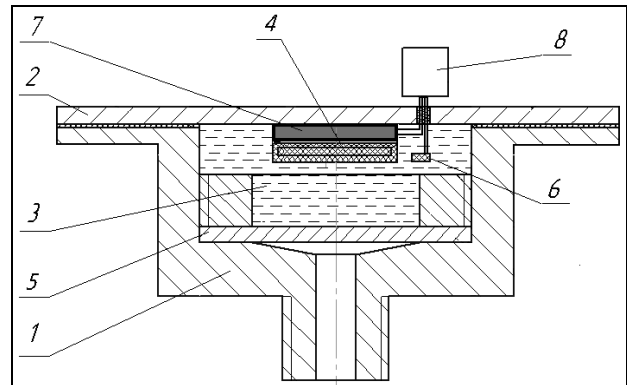


Рис. 2. Розріз конструкції датчика тиску із застосуванням системи термостабілізації

В разі перевищення поточним значенням температури номінального значення блок управління 8 виробляє пропорційний цій різниці керуючий сигнал негативної полярності, що подається до елемента Пельтьє 7. Під впливом керуючого сигналу негативної полярності елемент Пельтьє 7 забезпечує теплоперенесення від чутливого елемента 4 до навколишнього середовища, таким чином, температура чутливого елемента зменшується і доводиться до номінального значення.

У випадку коли поточним значенням температури менше номінального значення (наприклад під час вимірювань в польових умовах), блок управління 8 виробляє пропорційний різниці керуючий сигнал позитивної полярності, що подається до елемента Пельтьє 7. Під впливом керуючого сигналу позитивної полярності елемент Пельтьє 7 забезпечує

теплоперенесення від навколишнього середовища до чутливого елементу 4, таким чином, температура чутливого елементу збільшується і доводиться до номінального значення.

Застосування вказаного способу термостабілізації забезпечує сталість температури тензорезистивного чутливого елементу і, таким чином, зменшення температурної похибки до необхідного значення.

Висновки

Отримано математичну модель температурної похибки датчика тиску. З її допомогою можливо здійснювати кількісну оцінку температурної похибки за конкретних умов проведення вимірювань, розраховувати відповідну поправку та задати вимоги до системи температурної стабілізації чутливого елементу датчика тиску.

Проведено оцінку температурного вливу порохових газів та електричного струму живлення мосту на елементи датчика тиску, отримано співвідношення для визначення кількості теплоти, що отримують ці елементи.

Запропоновано спосіб зменшення температурної похибки за рахунок термостабілізації датчика тиску, що дозволить задовольнити вимоги до точності вимірювання тиску в каналах стволів стрілецької зброї за наявності теплопередачі від джерел теплової енергії. Розроблено схему та визначено принцип дії системи температурної стабілізації чутливого елементу датчика тиску.

Список літератури

1. Крюков О.М. Шляхи підвищення точності моделювання внутрішньобалістичних процесів / О.М. Крюков, О.А. Александров // *Озброєння та військова техніка: науковий журнал*. – 2009. – № 2 (18). – С. 79-89.
2. Голомбовский А.К. Теория и расчёт автоматического оружия / А.К. Голомбовский. – Пенза: ПВАИУ, 1973. – 493 с.

3. Кириллов В.Н. Основы устройства и проектирования стрелкового оружия / В.Н. Кириллов. – Пенза: ПВАИУ, 1963. – 342 с.

4. Серебряков Н.Е. Внутренняя баллистика / Н.Е. Серебряков. – М.: Оборониздат ГИОП, 1949. – 673 с.

5. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.

6. Проектирование датчика для измерения механических величин / Е.П. Осадчий и др. – М.: Машиностроение, 1979. – 477 с.

7. Полищук Е.С. Измерительные преобразователи / Е.С. Полищук. – К.: Вища школа, 1990. – 480 с.

8. Марьямова И.И. Полупроводниковый датчик для измерения больших давлений / И.И. Марьямова, Б.И. Сыдир, Ю.С. Екимов // *Приборы и системы управления*. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – С. 124-145.

9. Крюков О.М. Математична модель датчика для вимірювання миттєвих значень тиску в каналах стволів стрілецької зброї / О.М. Крюков, О.А. Александров // *Озброєння та військова техніка: науковий журнал*. – 2010. – № 4 (24). – С. 83-89.

10. Патент на корисну модель «Датчик миттєвих значень швидкозмінного тиску» № 53153 від 27.09.2010.

11. Кухлинг Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг. – М.: Мир, 1982. – 520 с.

12. Иванов А.И. Поведение металлов при повышенных нестационарных температурах и нагрузках / А.И. Иванов. – М.: Мир, 1982. – 432 с.

13. Лозинский М. Г. Строение и свойство металлов и сплавов при высоких температурах. – М.: Энергоатомиздат, 1966. – 235 с.

14. Писаренко Г.С. Прочность материалов при высоких температурах / Г.С. Писаренко. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 235 с.

15. Нацокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача / В.В. Нацокин. – М.: Высшая школа, 1975. – 496 с.

Надійшла до редколегії 13.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.В. Руженцеї, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНОГО ДАТЧИКА ИМПУЛЬСНОГО ДАВЛЕНИЯ

А.М. Крюков, А.А. Александров, В.В. Афанасьев, О.Е. Забула

Проведена оценка влияния температуры пороховых газов и электрического тока источника питания на исходящий сигнал тензорезисторного датчика для измерения давления в каналах стволов стрелкового оружия. Получена математическая модель температурной погрешности. Предложен способ уменьшения влияния температурной погрешности на результат измерения давления.

Ключевые слова: стрелковое оружие, внутрибаллистические процессы, пороховые газы, датчик давления, температурное влияние, тензорезисторный датчик, математическая модель.

THE INVESTIGATION OF THE THERMAL ERROR OF THE TENSORESISTIVE SENSOR OF THE PULSE PRESSURE

A.M. Krukov, A.A. Alexanderov, V.V. Afanasiev, O.E. Zabula

The effect of temperature propellant gas and electric power source to the output signal tensoresistance sensor for measuring pressure in the barrel of small arms has been evaluated. The mathematical model of temperature error has been received. The method for reducing the influence of the temperature error on the result of pressure measurement has been proposed.

Keywords: shooter weapon, ntraballistic processes, gunpowder gases, pressductor, temperature influence, tensoresistive sensor, mathematical model.