

УДК 531.768:623.4.018



**О. М. Крюков**

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ПОХИБКИ ДАТЧИКА АКСЕЛЕРОМЕТРА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІДКОЧУВАННЯ СТВОЛА**

*У статті викладено принципи побудови математичної моделі температурної похибки акселерометра на базі рідинного датчика вимірювання параметрів відкочування стволів. Отримано вирази для кількісного оцінювання складових температурної похибки. Запропоновано конструктивні способи обмеження впливу температурної похибки на основі термостатування і теплоізоляції датчика акселерометра.*

*К л ю ч о в і с л о в а:* акселерометр, датчик, відкочування ствола, прискорення, рідинний компонент, вільна поверхня, температурна похибка, градієнт температури.

**Постановка проблеми.** Відомим способом дослідження дії порохових газів під час пострілу є вимірювання таких елементів відкочування ствола, як-от: шлях, швидкість, прискорення. Визначення цих параметрів широко використовується для вивчення роботи противідкочувальних пристроїв, автоматики зброї, ефективності дульних гальм тощо [1–4].

Найбільш цінною для балістичних досліджень є вимірювальна інформація, що надається акселерометрами, які забезпечують визначення кривої прискорення ствола. Реєстрація прискорення дозволяє визначати сили, що діють на ствол при відкочуванні, і у такий спосіб досліджувати закон зміни тиску в каналі ствола під час пострілу. Якщо ж виникає необхідність визначити швидкість або шлях ствола при його відкочуванні, крива прискорення може бути відповідно одноразово або дворазово проінтегрована за часом.

Одним із перспективних напрямів, які дозволяють створити акселерометр, що має сукупність бажаних технічних характеристик, є застосування датчика на основі рідинного компонента (газогідродинамічного датчика). При цьому найбільш доцільним є використання як інформативного параметра площі контакту рідини з торцем порожнини ротора. Застосування такого датчика дозволяє реалізувати переваги його високої перевагуючої спроможності, відсутності сил сухого тертя, можливості швидкого перенаштування межі вимірювання і чутливості [5]. Втім, датчики вказаного типу є вельми чутливими до коливань температури, що за певних умов експлуатації може викликати появу значної температурної похибки і нівелювати їх переваги. Так, при експлуатації акселерометра температура навколишнього повітря може змінюватися в межах від  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а стабілізація теплового режиму без застосування спеціальних технічних рішень здійснена лише в інтервалі від  $-2,5\text{ K}$  до  $+2,5\text{ K}$ . Крім того, в приводі обертання і електронних функціональних пристроях акселерометра мають місце внутрішні тепловиділення. Такі теплові впливи зумовлюють відповідне змінювання температурного режиму чутливого елемента і викликають появу додаткової температурної складової похибки, що має систематичний характер.

Виходячи із викладеного вище, можна стверджувати, що проблемна ситуація полягає у відсутності на цей час науково-методичного апарату моделювання і оцінювання температурної похибки датчика акселерометра, що значно обмежує можливості створення приладу, який мав би задані метрологічні характеристики.

**Аналіз публікацій.** Принцип побудови акселерометра із застосуванням датчика на основі рідинного компонента, а також його статичні характеристики детально розглянуті у статті [4]. У праці [6] розглянуто динамічну модель рідинного компонента акселерометра. Математичні моделі температурних похибок окремих елементів засобів вимірювальної техніки розглянуто в працях [7, 8], однак безпосередньо застосувати результати цих досліджень до газогідродинамічного чутливого

елемента не уявляється можливим. У працях [9, 10] розглянуто підходи до реалізації термостатування та теплоізоляції елементів конструкцій засобів вимірювальної техніки, втім вимоги до точності стабілізації температурного режиму акселерометра не наведено.

Таким чином, у відомих джерелах інформації відсутні відомості про математичні моделі температурної похибки газогідродинамічного чутливого елемента, а також конструктивні або алгоритмічні заходи, спрямовані на обмеження впливу температурної похибки такого датчика.

**Метою статті** є розроблення математичної моделі температурної похибки газогідродинамічного чутливого елемента акселерометра, аналіз температурної складової похибки та формування вимог до системи термостабілізації.

**Виклад основного матеріалу.** Принцип дії однокомпонентного газогідродинамічного чутливого елемента з циліндричною формою порожнини ротора і безконтактним зніманням інформації полягає у вимірюванні реакції рідинного компонента при його рівномірному обертанні відносно фіксованої осі на прискорення уздовж цієї осі. Рух рідини розглядається в циліндричній системі координат  $ZOR$ , зв'язаний зі стволом зразка зброї, причому вісь  $Z$  співпадає з віссю обертання ротора і спрямована уздовж напрямку руху ствола.

Після завершення перехідних процесів рідина в порожнині приходить до стану стійкого обертання з кутовою швидкістю  $\omega$ , що дорівнює кутовій швидкості обертання ротора. Вираз, що описує форму вільної поверхні рідини, має вигляд [5]

$$r^2 = \frac{a}{\omega^2}(2z - H) + R^2 \left(1 - \frac{h}{H}\right), \quad (1)$$

де  $a$  – осьове прискорення;

$H, R$  – відповідно висота та радіус порожнини;

$h$  – рівень рідини у вертикально розташованій порожнині при  $\omega = 0$ .

У загальному випадку зміна температури в деякому перетині чутливого елемента описується виразом

$$\Delta t(z) = \Delta t + \varphi_t(z), \quad (2)$$

де  $\Delta t$  – рівномірна зміна температури за об'ємом чутливого елемента;

$\varphi_t(z)$  – градієнт температури для перетину з координатою  $Z$ .

Зміна  $\Delta t$  температури чутливого елемента від початкового значення  $t_0$  призводить до зміни лінійних розмірів порожнини і об'єму рідини. При цьому геометричні параметри чутливого елемента, що входять в основне рівняння (1), можуть бути записані у вигляді

$$H = H_0(1 + \alpha\Delta t); \quad R = R_0(1 + \alpha\Delta t); \quad R^2 = R_0^2(1 + 2\alpha\Delta t), \quad (3)$$

де  $H_0, R_0$  – значення геометричних параметрів чутливого елемента при  $t = t_0$ ;

$\alpha$  – коефіцієнт лінійного розширення матеріалу ротора.

Правомірність відсутності в формулі (3) членів більш високих порядків обумовлена нехтовною малістю відповідних температурних коефіцієнтів розширення конструкційних матеріалів і рідин [11].

Залежність рівня рідини в порожнині ротора від змін температури може бути отримана з урахуванням виразів для об'єму рідинного компонента:

– при  $t = t_0$

$$V_0 = \pi R_0^2 h_0; \quad (4)$$

– при  $t = t_0 + \Delta t$

$$V = V_0(1 + \beta\Delta t) = \pi R^2 h, \quad (5)$$

де  $h_0$  – рівень рідини при  $t = t_0$ ;

$\beta$  – коефіцієнт об'ємного розширення рідини,

звідки 
$$h = h_0 \frac{1 + \beta \Delta t}{1 + 2\alpha \Delta t}. \quad (6)$$

З урахуванням виразів (3) та (6) основне рівняння (1) для верхнього «+» і нижнього «-» торців порожнини ротора матиме вигляд

$$r_{\Delta t}^2 = \pm \frac{a}{\omega^2} H_0 (1 + \alpha \Delta t) + R_0^2 (1 + 2\alpha \Delta t) \left( 1 - \frac{h_0}{H_0} \frac{1 + \beta \Delta t}{1 + 3\alpha \Delta t} \right). \quad (7)$$

Отже, зміна температури на значення  $\Delta t$  призводить до зміни радіуса вільної поверхні рідини, що спричинює зміну площі контакту рідини з торцями порожнини ротора

$$\Delta S(\Delta t) = \pi \left( r_{\Delta t}^2 - r_0^2 \pm \frac{a}{\omega^2} H_0 \right) \quad (8)$$

що еквівалентно похибці  $\Delta_{t_1}$  за входом акселерометра.

Відповідно до специфіки розглянутих у статті [5] способів знімання інформації з чутливого елемента як інформативні параметри (ІІ) можуть використовуватися: площа контакту рідинного компонента з верхнім торцем порожнини ротора (ІІ1), площа контакту газового компонента з верхнім торцем порожнини ротора (ІІ2) і різниця площ контакту газового компонента з верхнім і нижнім торцями порожнини ротора (ІІ3). Проведемо оцінювання похибки для зазначених ІІ.

ІІ1. Значення  $\Delta S(\Delta t)$  визначається з урахуванням рівняння (8)

$$\Delta S(\Delta t) = \pi \left( R_0^2 \frac{h_0}{H_0} \frac{\beta - \alpha}{1 + \alpha \Delta t} - \frac{a}{\omega^2} H_0 \alpha \right) \Delta t, \quad (9)$$

при цьому вираз для похибки  $\Delta_{t_1}$  матиме вигляд

$$\Delta_{t_1} = \left[ \left( \frac{\omega R_0}{H_0} \right)^2 h_0 \frac{\beta - \alpha}{1 + \alpha \Delta t} - a \alpha \right] \Delta t. \quad (10)$$

ІІ2. Значення  $\Delta S(\Delta t)$  визначається з урахуванням рівняння (8) виразом

$$\Delta S(\Delta t) = \pi \left[ R_0^2 \frac{2H_0 \alpha - h_0(\beta - \alpha)}{H_0(1 + \alpha \Delta t)} + \frac{a}{\omega^2} H_0 \alpha \right] \Delta t, \quad (11)$$

а вираз для похибки  $\Delta_{t_1}$  може бути записаний так:

$$\Delta_{t_1} = \left[ \left( \frac{\omega R_0}{H_0} \right)^2 \frac{2H_0 \alpha - h_0(\beta - \alpha)}{1 + \alpha \Delta t} + a \alpha \right] \Delta t. \quad (12)$$

ІІ3. Значення  $\Delta S(\Delta t)$  визначається з урахуванням рівняння (8) таким чином:

$$\Delta S(\Delta t) = \frac{2\pi a H_0}{\omega^2} \alpha \Delta t. \quad (13)$$

З виразу (13) випливає, що для ПЗ має місце ефект часткового взаємного поглинання (компенсації) змін площ контакту газового компонента з верхнім і нижнім торцями порожнини ротора. Вираз для похибки  $\Delta_{t_1}$  подамо у вигляді

$$\Delta_{t_1} = a \alpha \Delta t. \quad (14)$$

Аналіз залежностей  $\Delta_{t_1}(\Delta t)$  для граничних поєднань значень  $\alpha$  і  $\beta$  [10] показує, що  $\Delta_{t_1} / \Delta t$  для ПП1 та ПП2 знаходяться в діапазоні від  $5 \times 10^{-4}$  м/(с<sup>2</sup>·К) до  $3 \times 10^{-3}$  м/(с<sup>2</sup>·К), а для ПП3 – в діапазоні від  $6 \times 10^{-6}$  м/(с<sup>2</sup>·К) до  $2,5 \times 10^{-4}$  м/(с<sup>2</sup>·К) при використанні довільно вибраних традиційних конструкційних матеріалів і рідин. У такому випадку при використанні ПП1 та ПП2 для задоволення вимог до точності вимірювань потрібна стабілізація температурного режиму чутливого елемента з граничним відхиленням від  $10^{-4}$  К до  $10^{-3}$  К, що в даний час знаходиться за межею технічних можливостей. Разом з тим при використанні ПП3 потрібна стабілізація температурного режиму з граничним відхиленням від 0,004 К до 0,1 К, що є реально досяжним для сучасних систем терморегулювання.

При експлуатації акселерометра його чутливий елемент може перебувати в локальному просторі з нерівномірним за обсягом розподілом температури. Створення таких умов можливе як за рахунок тепловиділення з приводу обертання ротора, так і за рахунок близькості до потужних сторонніх джерел тепла (апаратури електроживлення, підсилювальних каскадів тощо). Наявність градієнта температури  $\varphi(z)$  призводить до зміни площі контакту рідини лише з одним з торців порожнини ротора ( $z = H$ ) при незмінному стані чутливого елемента в області протилежного торця.

Таким чином, використовуючи ПП1 та ПП2, наявність градієнта температури зумовлює появу додаткової похибки  $\Delta_{t_2}$  акселерометра, яка визначається виразами, аналогічними (10) і (12) (змінювання температури у верхньому торці ротора відносно нижнього визначається значенням  $\varphi(z)$  у перетині  $H$ ).

Для ПП1

$$\Delta_{t_2} = \left[ \left( \frac{\omega R_0}{H_0} \right)^2 h_0 \frac{\beta - \alpha}{1 + \alpha \varphi(H)} - a \alpha \right] \varphi(H). \quad (15)$$

Для ПП2

$$\Delta_{t_2} = \left[ \left( \frac{\omega R_0}{H_0} \right)^2 \frac{2H_0 \alpha - h_0(\beta - \alpha)}{1 + \alpha \varphi(H)} + a \alpha \right] \varphi(H). \quad (16)$$

Ефект часткового взаємного поглинання змін площ контакту газового компонента з верхнім і нижнім торцями порожнини ротора, притаманний ПП3 при рівномірній за обсягом зміні температури, в даному випадку відсутній, оскільки геометричні параметри чутливого елемента в одному з торців є фіксованими. Таким чином, для ПП3 вираз, що описує похибку  $\Delta_{t_2}$ , набуває вигляду

$$\Delta_{t_2} = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\omega R_0}{H_0} \right)^2 \frac{2H_0 \alpha - h_0(\beta - \alpha)}{1 + \alpha \varphi(H)} + a \alpha \right] \varphi(H). \quad (17)$$

Кількісне оцінювання  $\Delta_{t_2}$  показує, що абсолютна похибка, обумовлена наявністю градієнта температури, для ПП1 та ПП2 знаходиться в діапазоні від  $5 \times 10^{-4}$  м/(с<sup>2</sup>·К) до  $3 \times 10^{-3}$  м/(с<sup>2</sup>·К), а для ПП3 –

в діапазоні від  $2,5 \times 10^{-4}$  м/(с<sup>2</sup>·К) до  $1,5 \times 10^{-3}$  м/(с<sup>2</sup>·К) при довільно вибраних традиційних конструкційних матеріалах і рідинах. Таким чином, для задоволення вимог до точності вимірювань за наявності градієнта температури потрібно застосування температурної стабілізації з тепловирівнюванням від  $3 \times 10^{-3}$  К/м до  $2 \times 10^{-2}$  К/м (ІІ1, ІІ2) і від  $6 \times 10^{-3}$  К/м до  $4 \times 10^{-2}$  К/м (ІІ3).

Аналіз виразів (9) – (12) показує, що, використовуючи ІІ1 та ІІ2, шляхом відповідного вибору значень  $\alpha$  і  $\beta$  може бути досягнута сталість площ контакту рідинного або газового компонента з торцем порожнини ротора за наявності флуктуацій температури, отже, зменшення температурної похибки. Фізичний зміст забезпечення сталості площ контакту полягає в забезпеченні певних співвідношень між приростами об'ємів порожнини ротора і рідинного компонента. Вибір співвідношень між  $\alpha$  і  $\beta$  здійснюється на підставі виразів (10) і (12) при  $\Delta_{t_1} = 0$ .

У разі використання ІІ1 вираз для визначення співвідношення між  $\alpha$  і  $\beta$  матиме вигляд

$$\left(\frac{\omega R_0}{H_0}\right)^2 h_0(\beta - \alpha) - a\alpha = 0, \quad (18)$$

а для ІІ2

$$\left(\frac{\omega R_0}{H_0}\right)^2 [2H_0\alpha - h_0(\beta - \alpha)] + a\alpha = 0. \quad (19)$$

Розв'язування рівнянь (18) і (19) у вигляді залежностей одного з параметрів від інших, наприклад,  $\beta$  від  $\alpha, R_0, H_0, h_0$ , дозволяє сформулювати такі умови вибору параметрів чутливого елемента.

Для ІІ1

$$\beta = \alpha \left[ 1 + \frac{a}{h_0} \left( \frac{H_0}{\omega R_0} \right)^2 \right]. \quad (20)$$

Для ІІ2

$$\beta = \alpha \left[ 1 + \frac{a}{h_0} \left( \frac{H_0}{\omega R_0} \right)^2 + 2 \frac{H_0}{h_0} \right]. \quad (21)$$

У разі дотримання умов (20), (21) флуктуації температури не впливають на значення інформативного параметра чутливого елемента. Кількісне оцінювання умов (20) і (21) показує, що для різних сполучень геометричних і кінематичних параметрів чутливого елемента значення  $\beta$  необхідно вибирати з діапазонів від  $2\alpha$  до  $8\alpha$  для ІІ1 і від  $10\alpha$  до  $20\alpha$  для ІІ2. Аналіз діапазонів можливих значень  $\alpha$  і  $\beta$  показує, що умови вибору параметрів можуть бути задоволені, однак умова (20) є більш жорсткою, порівнюючи з умовою (21). Отже, використання ІІ2 є кращим, ніж ІІ1.

Значення параметрів  $\alpha, \beta, H_0, h_0, R_0$  на етапі виготовлення чутливого елемента можуть бути визначені з похибками, які характеризуються відповідними СКВ  $\sigma_\alpha, \sigma_\beta, \sigma_{H_0}, \sigma_{h_0}, \sigma_{R_0}$ . При цьому суворе виконання умов вибору параметрів буде порушене, і значення похибки  $\Delta_{t_1}$  будуть відмінними від нуля. СКВ невилученого залишку температурної похибки, обумовленого порушенням умов (20) та (21), може бути оцінене за виразом

$$\sigma_t = \left[ \left( \frac{\partial \Delta_{t_1}}{\partial \alpha} \right)^2 \sigma_\alpha^2 + \left( \frac{\partial \Delta_{t_1}}{\partial \beta} \right)^2 \sigma_\beta^2 + \left( \frac{\partial \Delta_{t_1}}{\partial H_0} \right)^2 \sigma_{H_0}^2 + \left( \frac{\partial \Delta_{t_1}}{\partial h_0} \right)^2 \sigma_{h_0}^2 + \left( \frac{\partial \Delta_{t_1}}{\partial R} \right)^2 \sigma_R^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (22)$$

Враховуємо вирази (10), (12) та введемо позначення  $p = \left(\frac{\omega R_0}{H_0}\right)^2$ , тоді вираз для визначення  $\sigma_t$

подамо у такому вигляді.

Для ПП1

$$\sigma_t = \left\{ (ph_0 - a)^2 \sigma_\alpha^2 + (ph_0)^2 \sigma_\beta^2 + \left[ \frac{2ph_0}{H_0} (\beta - \alpha) \right]^2 \sigma_{H_0}^2 + \right. \\ \left. + [p(\beta - \alpha)]^2 \sigma_{h_0}^2 + \left[ \frac{2ph_0}{R_0} (\beta - \alpha) \right]^2 \sigma_{R_0}^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \Delta t. \quad (23)$$

Для ПП2

$$\sigma_t = \left\{ [p(2H_0 + h_0) + a]^2 \sigma_\alpha^2 + (ph_0)^2 \sigma_\beta^2 + \left[ 2p \left( \frac{h_0}{H_0} (\beta - \alpha) - \alpha \right) \right]^2 \sigma_{H_0}^2 + \right. \\ \left. + [p(\beta - \alpha)]^2 \sigma_{h_0}^2 + \left[ \frac{2p}{R_0} (2H_0\alpha - h_0(\beta - \alpha)) \right]^2 \sigma_{R_0}^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \Delta t. \quad (24)$$

Для прикладу кількісне оцінювання  $\sigma_t(\Delta t)$  проводилося для сполучень параметрів  $\alpha$  і  $\beta$ , що були вибрані відповідно до виразів (20), (21), за таких значень СКВ похибок визначення параметрів чутливого елемента:  $\sigma_\alpha = 10^{-6} K^{-1}$ ,  $\sigma_\beta = 10^{-5} K^{-1}$ ,  $\sigma_{H_0} = \sigma_{R_0} = 10^{-6} m$ ,  $\sigma_{h_0} = 10^{-4} m$ . Результати такого оцінювання показують, що вибір співвідношення між значеннями параметрів  $\alpha, \beta, H_0, h_0, R_0$  відповідно до умов (20), (21) дозволяє обмежити значення  $\sigma_t / \Delta t$  у діапазоні від  $2 \cdot 10^{-5} m/(c^2 \cdot K)$  до  $2 \cdot 10^{-4} m/(c^2 \cdot K)$ . При цьому найбільш доцільним є виконання чутливого елемента зі значеннями параметра  $\omega R / H$ , що є близькими до мінімально можливого, оскільки це дозволяє обмежити  $\sigma_t / \Delta t$  значеннями від  $10^{-5} m/(c^2 \cdot K)$  до  $5 \cdot 10^{-5} m/(c^2 \cdot K)$ . Крім того, за порівняно малих значень відношення  $\omega R / H$  фізична реалізація чутливого елемента з відповідними параметрами  $\alpha$  і  $\beta$  не становить труднощів, разом з тим як із зростанням  $\omega R / H$  вибір конструкційних матеріалів і рідин з параметрами  $\alpha$  і  $\beta$ , що задовольняють умови (20) та (21), є проблематичним.

Таким чином, при використанні ПП1 і ПП2 з урахуванням умов вибору параметрів (20), (21) значення  $\sigma_t / \Delta t$  складає від  $10^{-5} m/(c^2 \cdot K)$  до  $5 \cdot 10^{-5} m/(c^2 \cdot K)$ , а при використанні ПП3 значення  $\Delta t_1 / \Delta t$  обмежене діапазоном від  $6 \cdot 10^{-6} m/(c^2 \cdot K)$  до  $2,5 \cdot 10^{-4} m/(c^2 \cdot K)$ . Завдання обмеження флуктуацій температури з метою задоволення вимог до точності вимірювань може бути вирішене шляхом комплексного застосування термостатування і теплоізоляції.

Найбільш доцільним для стабілізації температури чутливого елемента є використання системи з об'єднаним вимірювальним і нагрівальним елементом, що являє собою інтегральний датчик температури, який утворює безперервну поверхню, яка оточує термостатований об'єм. Короткоперіодичні варіації інтегральної температури, спричинені нестабільністю параметрів системи регулювання і зміною температури навколишнього середовища, для даної системи терморегулювання становлять близько  $3,5 \cdot 10^{-6} K$ , що на 1-2 порядки менше аналогічної характеристики двопозиційних систем і пропорційних систем з незалежним живленням датчика [9]. Довгоперіодичні зміни в системі регулювання можуть спричинити флуктуації температури  $(2...3) \cdot 10^{-6} K/добу$ , а сповзання точки

балансу постарених мідно-манганінових мостів – не більше  $(3..4) \times 10^{-5}$  К/добу. Системи з об'єднаним вимірювальним і нагрівальним елементом дозволяють отримати температурний коефіцієнт термостата, менший  $10^{-4}$ . Детальний аналіз динамічних характеристик системи терморегулювання з об'єднаним мостом не є цікавим з огляду на те, що період непридушених змін зовнішньої температури на кілька порядків більше сталої часу системи зворотного зв'язку. Теплоізоляція реалізується додатково до термостатування шляхом розміщення чутливого елемента і датчика системи терморегулювання в посудині Дьюара або всередині теплоізолювальної гільзи і оболонки з теплоізолюючої речовини.

Спільне застосування розглянутих способів термостатування і теплоізоляції дозволяє забезпечити високу стабільність температури чутливого елемента. Так, відомі конструкція, технологія виготовлення і результати випробувань термостата датчика прискорення, температурний коефіцієнт якого становить від  $2 \times 10^{-4}$  до  $3 \times 10^{-4}$ , при цьому забезпечується теплоізолювання не гірше, ніж від  $10^{-4}$  К/м до  $10^{-3}$  К/м [12].

Застосування такого термостата забезпечує стабілізацію внутрішньої температури і температурного градієнта чутливого елемента на необхідному рівні, що дозволяє обмежити температурну похибку  $\Delta_t$  (для ПЗ) значенням  $1,5 \times 10^{-7}$  м/(с<sup>2</sup>·К) або СКВ  $\sigma_t$  невилученого залишку температурної похибки (для ПП1, ПП2) значенням  $10^{-7}$  м/(с<sup>2</sup>·К).

### **Висновки**

Розроблено математичні моделі температурної похибки чутливого елемента для різних варіантів реалізації способу знімання інформації та проведено кількісне її оцінювання. Встановлено, що систематична похибка, обумовлена змінюванням температури, становить від  $10^{-5}$  м/(с<sup>2</sup>·К) до  $3 \times 10^{-3}$  м/(с<sup>2</sup>·К) залежно від специфіки інформативного параметра та поєднання фізичних параметрів чутливого елемента. На основі аналізу моделей температурної похибки запропоновано спосіб компенсації впливу змінювання температури на похибку акселерометра. Отримано умови вибору параметрів чутливого елемента, використання яких дозволяє знизити СКВ невилученого залишку температурної похибки до  $2 \cdot 10^{-4}$  м/(с<sup>2</sup>·К), тобто на порядок. Для обмеження флуктуацій температури чутливого елемента запропоновано спільне застосування термостатування та теплоізоляції, що дозволяє обмежити температурну похибку значенням  $1,5 \times 10^{-7}$  м/(с<sup>2</sup>·К).

Результати досліджень можуть бути використані у обґрунтуванні шляхів удосконалення тактико-технічних та метрологічних характеристик перспективних акселерометрів, що використовуються для вимірювання параметрів відкочування стволів вогнепальної зброї.

Напрямами подальших досліджень є дослідження закономірностей дрейфу та розроблення методів стабілізації параметрів функціональних елементів структурної схеми акселерометра.

### **Перелік джерел посилання**

1. Крюков, О. М., Мудрик В. Г. Перспективи експериментального визначення балістичних елементів пострілу. *Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України*. Харків, 2013. Вип. 1(21). С. 21–24.
2. Толпегин О. А. Экспериментальная баллистика. СПб : БГТУ, 2015. 211 с.
3. Atkinson J. Internal ballistics. Trieste Publishing, 2018. 288 p.
4. Крюков О. М., Мельніков Р. С., Музичук В. А. Метод діагностування технічного стану каналів стволів та боєприпасів на основі ідентифікації характеристик балістичних елементів пострілу. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків, 2018. Вип. 2 (32). С. 5–11.
5. Крюков О. М. Принцип побудови перспективного акселерометра для вимірювання параметрів відкочування ствола. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків, 2017. Вип. 2 (30). С. 5–8.

6. Крюков О. М. Метод побудови математичної моделі датчика акселерометра для вимірювання параметрів відкочування ствола *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків, 2018. Вип. (31). С. 5–9.

7. Датчики : справочное пособие / под ред. В. М. Шарапова, Е. С. Полищука. Москва : Техносфера, 2012. 624 с.

8. Алексеева В. В., Скаморин Д. А. Метод компенсации температурной погрешности коэффициента преобразования прецизионных акселерометров. *Известия ВУЗ. Поволжский регион. Технические науки*. № 1 (9). 2009. С. 118–123.

9. Поляков А. А. Термостатирование. Москва : МВТУ, 1984. 235 с.

10. Латышенко К. Технические измерения и приборы. Т. 2, Кн. 1. Москва : Юрайт, 2019. 292 с.

11. Кухлинг Х. Справочник по физике. Москва : Мир, 1982. 520 с.

12. Измерения в промышленности : справочник в 3 кн. / под ред. П. Профоса. Москва : Металлургия, 1990. Кн. 1. 492 с.

*Стаття надійшла до редакції 02.10.2022 р.*

**UDC 531.768:623.4.018**

**O. Kriukov**

### **STUDY OF THE TEMPERATURE ERROR OF THE ACCELEROMETER SENSOR FOR MEASURING THE PARAMETERS OF BARREL RECOIL**

*The paper describes a methodical approach to building a mathematical model of the temperature error of an accelerometer based on a liquid sensor for measuring barrel recoil parameters.*

*The effect of a uniform temperature change over the volume of the sensitive element is considered. Mathematical models of temperature error are presented in the form of expressions for evaluating changes in the informative parameters of the sensitive element. It is shown that with certain combinations of design parameters of the sensitive element, there is an effect of partial compensation of changes in the contact areas of the gas component with the upper and lower ends of the rotor cavity. Quantitative assessment of temperature error for cases of using traditional structural materials and liquids was carried out.*

*The impact of uneven heating of the sensitive element due to point sources of heat generation, which leads to the appearance of a temperature gradient for its arbitrary intersection, is considered. Expressions for evaluating the change in the informative parameters of the sensitive element in the presence of a temperature gradient have been obtained. A quantitative assessment of the temperature error due to the temperature gradient of the use of traditional structural materials and liquids was carried out.*

*Constructive methods of limiting the effect of temperature error based on thermostating and thermal insulation of the accelerometer sensor are proposed. The condition for choosing the ratio between the design parameters of the sensitive element, which provides a significant reduction in the influence of the temperature error, has been obtained. The method of stabilizing the temperature of the sensitive element, which is based on its simultaneous thermostating and thermal insulation, is substantiated. The requirements for the parameters of the temperature control system of the sensitive element are given.*

*Key words: accelerometer, sensor, barrel rolling, acceleration, liquid component, free surface, temperature error, temperature gradient.*

**Крюков Александр Михайлович** – заслужений працівник освіти України, доктор технічних наук, професор, професор кафедри оперативного та логістичного забезпечення Національної академії Національної гвардії України.

<https://orcid.org/0000-0003-4194-6081>