

Для пошуку таких значень координат, де похідна менша, щоб потім прийняти їх як найсприятливіші для роботи генератора, і таких координат де похідна більша, щоб по можливості їх уникати, були обчислені всі значення похідних $\partial F / \partial U_{зб}$ і $\partial F / \partial I_{зб}$ в крайніх та середній точках, як для тримірного факторного поля (для резонатора, що працює

при атмосферному тиску), так і для двомірного факторного поля (для резонатора у вакуумі). Встановлено, що значення похідних можуть істотно відрізнятися. Мінімальні та максимальні значення похідних в межах зазначеного поля, а також абсолютні та відносні похибки вказані у табл. 3.

Таблиця 3 - Результати розрахунку похибок.

| Умови роботи резонатора | Граничні значення | Чутливості. | | Похибки | | | |
|-------------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------|----------|
| | | $\partial F / \partial I_{зб}$ | $\partial F / \partial U_{зб}$ | Абсолютна | | | Відносна |
| | | Гц/мА | Гц/В | Δ_I , Гц | Δ_U , Гц | $\Sigma\Delta$, Гц | % |
| При ат-мосф. тиску | Мін. | -159,5 | 50,07 | 0,21 | 0,816 | 1,03 | 0,0087 |
| | Макс. | -245,1 | 80,17 | 0,32 | 1,31 | 1,63 | 0,014 |
| У вакуумі | Мін. | -16,25 | 5 | 0,016 | 0,02 | 0,036 | 0,0003 |
| | Макс. | -32 | 12 | 0,032 | 0,047 | 0,079 | 0,00068 |

Висновки: 1. Використання математичної моделі дає змогу без застосування рівнянь математичної фізики за допомогою простих емпіричних формул прогнозувати поведінку як резонатора, так і електронної схеми генератора при дії на них декількох дестабілізуючих факторів.

2. Для резонатора, що працює при атмосферному тиску, абсолютна похибка від нестабільності напруги $U_{зб}$ (1,31 Гц) в 4 рази більша, ніж абсолютна похибка від нестабільності струму (0,32 Гц). Тому для зменшення похибки електронної схеми треба особливу увагу приділяти стабільності блоку живлення для напруги $U_{зб}$.

3. Краще застосовувати резонатор, що працює у вакуумі. Тоді при сприятливих значеннях дестабілізуючих факторів вплив електронної схеми на резонансну частоту ($\delta F_{вак}=0,0003\%$) майже у 30 разів буде меншим, ніж при роботі резонатора в повітряному середовищі ($\delta F_{атм}=0,087\%$) і більш, ніж в 20 разів буде менший ($\delta F_{вак}=0,00068\%$,

$\delta F_{атм}=0,014\%$) при несприятливих значеннях факторів.

4. Наявність математичної моделі дає змогу при однакових умовах роботи резонатора вибирати такі значення дестабілізуючих факторів, при яких вплив електронної схеми на частоту резонатора буде істотно меншим ($\delta F_{атм}=0,014\%$, $\delta F_{атм}=0,0087\%$, $\delta F_{вак}=0,00068\%$, $\delta F_{вак}=0,0003\%$).

1. Байцар Р. І., Гінгін М. П., Рак В. С. Автогенераторні схеми напівпровідникових резонансних сенсорів // Автоматика, вимірювання та керування. - 2000. - № 398. - С. 166-171. 2. Байцар Р. І., Рак В. С. Особенности построения полупроводниковых виброчастотных сенсоров // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. - 1998. - № 1. - С. 1-3. 3. Засименко В. М. Основи теорії планування експерименту. Навчальний посібник. - Львів: ДУ "ЛП", 2000. - 205 с.

УДК 621.532.3:389

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКА ПОХИБКИ МАЛОІНЕРЦІЙНОГО ТЕРМОМЕТРА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПУЛЬСУЮЧИХ ГАЗОВИХ ПОТОКІВ

© Долішній Б. В., 2002

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Розроблена метрологічна модель малоінерційного термометра агресивних високотемпературних середовищ і на її базі здійснено розрахунок складових та сумарної похибки вимірювання амплітуди пульсацій температури.

Пульсуючий потік відхідних газів двигуна внутрішнього згоряння характеризується швидкозмінними параметрами потоку, зокрема, температурою [1], від точності вимірювання якої залежить достовірність експериментів з вивчення закономірностей

теплообмінних процесів при утилізації тепла цих газів.

Експериментальна установка [2] забезпечує вивчення впливу на тепловіддачу відхідних газів дизельного двигуна основних технологічних параметрів

газового потоку, зокрема, температури та амплітуди її пульсацій.

Враховуючи високу температуру відхідних газів, нестаціонарність і агресивність середовища експериментальний стенд укомплектований малоінерційними термометрами [3] індивідуального виготовлення. Вірогідність результатів експериментальних досліджень безпосереднім чином визначає якісні характеристики математичних моделей теплообміну пульсуючого потоку, що зумовлює необхідність оцінки точності визначення температури і амплітуди її пульсацій.

Це здійснюється шляхом розробки метрологічної моделі агресивностійкого малоінерційного термометра та оцінки похибки при вимірюванні температури даним пристроєм.

Вимірювання амплітуди пульсацій температури відноситься до непрямих вимірювань [4], так як вони подаються розробленим алгоритмом

$$\Delta t = \frac{1}{2} \cdot \frac{S_t \cdot h_t}{k_t \cdot A_t \cdot K_{vt}}, \quad (1)$$

$$A_t = \sqrt{\left[\frac{1}{1 + (2\pi f_t T_t)^2} \right]^2 + \left[\frac{2\pi f_t T_t}{1 + (2\pi f_t T_t)^2} \right]^2}, \quad (2)$$

де S_t – чутливості самописця реєстрації температури, мВ/мм; h_t – розмахи в міліметрах пульсації температури по осцилограмі, мм; K_t – градувальний коефіцієнт вольфрамового термоперетворювача в мВ/°С; A_t – коефіцієнти амплітудно-частотної характеристики давача, який відображає ступінь зменшення амплітуди зареєстрованих пульсацій температури; K_{vt} – коефіцієнти підсилення вихідного сигналу диференціальним вольтметром в каналі дослідження температури; f_t – частота зареєстрованих пульсацій температури, Гц; T_t – постійна часу давача температури, с.

Основними структурними складовими формування сумарної похибки є похибки основних вузлів термометра [3]: давача температури, вимірювача пульсацій і самописця, які позначені через $\theta_{\Delta t}$, θ_{en2} , θ_c відповідно і розглядаються як невилучені систематичні похибки (НСП). Ще однією складовою, яка впливає на похибку $\delta_{\Delta t}$, є похибка від неточності суб'єктивного відліку амплітуди пульсацій з осцилограми, яка за своєю фізичною природою є випадковою і тому оцінюється як середнє квадратичне відхилення (СКВ) випадкової похибки вимірювання амплітуди температури S_{ht} . Перелічені вище складові похибок термометра будуть формувати його метрологічну модель, яка подана на рис. 1.

НСП давача $\theta_{\Delta t}$ складається з НСП, які характеризують його статичні θ_{kt} і динамічні θ_{At} метрологічні характеристики. Індивідуальність виготовлення і градування термодавача накладають на нього похибки засобів градування, якими є еталонний ла-

бораторний термометр (похибка θ_t), вольтметр для вимірювання напруги розбалансу мостової схеми (похибка θ_v), а також похибку від методики отримання градувальної характеристики (похибка від нелінійності градувальної характеристики θ_n). Результати градування термодавача доповнюються випадковою складовою похибки градування S_{kt} , яка сумуючись з НСП коефіцієнта перетворення термодавача θ_{kt} і НСП динамічної похибки термодавача θ_{At} в цілому будуть формувати НСП термодавача $\theta_{\Delta t}$.

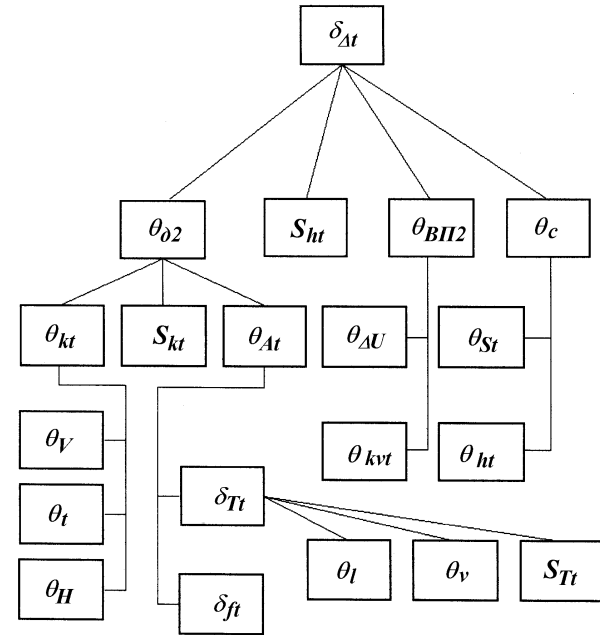


Рис. 1. Метрологічна модель малоінерційного термометра

Динамічні властивості термодавача характеризуються динамічною похибкою θ_{At} (похибка визначення коефіцієнта A_t), яка складається з похибки визначення частоти пульсацій температури δ_{ft} і похибки знаходження чисельного значення сталої часу δ_{Tt} . Остання, в свою чергу, містить складові від неточності вимірювання довжини ділянки осцилограми, що характеризує постійну часу θ_l , від нестабільності швидкості руху стрічки самописця θ_v , а також СКВ випадкової похибки визначення сталої часу S_{Tt} . Складові похибки вимірювача пульсацій температури θ_{en2} зумовлені НСП диференціального вольтметра при вимірюванні різниці напруг $\theta_{\Delta U}$ і НСП підсилення ним вихідного сигналу θ_{kv} . Водночас НСП самописця складаються з НСП функціонування каскаду підсилення θ_{St} (визначається заданою чутливістю самописця по каналу пульсацій температури S_t) і НСП механізму реєстрації вимірюваного параметра θ_{ht} .

Таким чином, згідно складеної структурної схеми (рис. 1) алгоритму (1–2) обчислення амплітуди пульсацій температури, а також враховуючи ос-

новні положення метрології [4] формула для обчислення НСП похибки буде такою:

$$\theta_{\Delta t} = K \sqrt{\tilde{\theta}_{kt}^2 + \tilde{\theta}_{At}^2 + \tilde{\theta}_{St}^2 + \tilde{\theta}_{ht}^2 + \tilde{\theta}_{KVI}^2 + \tilde{\theta}_{\Delta U}^2}, \quad (3)$$

де $\tilde{\theta}_{\Delta t}$ - НСП визначення амплітуди пульсацій температури; K - поправний коефіцієнт, який визначається прийнятою довірливою ймовірністю і кількістю складових НСП.

Спочатку проаналізуємо методику визначення НСП термодавача θ_{kt} і здійснимо її кількісну оцінку, яка характеризує точність визначення коефіцієнта перетворення k_t термоопору. Здійснювані при цьому вимірювання температури лабораторним термометром і вихідної напруги мостової схеми вольтметром з наступним обчисленням коефіцієнта k_t вказують на ознаку цих вимірювань як посередніх, що реалізують нелінійну залежність. Тому при аналізі за основу доцільно взяти алгоритм практичного визначення похибки [4], у якому, враховуючи ідентичність операцій вимірювання на початку і в кінці побудови градуувальної характеристики, НСП вимірювання температури і напруги розбалансу мостової схеми будуть вдвічі збільшені. Тому вираз для визначення НСП коефіцієнта перетворення термодавача записується у вигляді:

$$\theta_{kt} = \sqrt{2(\theta_v)^2 + 2(\theta_t)^2} + \theta_n. \quad (4)$$

Так як НСП θ_n накладається на отримане значення НСП коефіцієнта K_t , який розрахований для цілого діапазону вимірювання, то цю складову НСП необхідно алгебраїчно сумувати з попередньо визначеною сумою основних складових без врахування функції впливу і коефіцієнтів впливу [5].

Для визначення НСП використовуваного вольтметра θ_v типу В2-34 скористаємося також формулою з його технічної документації:

$$\delta_g = 0,005 + 0,001 \cdot \frac{U_g}{U_x} \%, \quad (5)$$

де δ_g - границя основної допустимої похибки диференціального вольтметра в режимі вольтметра; U_g - значення напруги, яка відповідає встановленій границі вимірювання з діапазону 0,1; 1; 10; 100; 1000 В; U_x - значення вимірюваної напруги.

Для отриманого під час градуування давача діапазону напруг мостової схеми вимірювання від 90 до 650 мВ похибка δ_g для кожного з двох піддіапазонів буде такою:

$$\delta_g = 0,005 + 0,001 \cdot \frac{0,1}{0,09} = 0,0061 \%, \quad (6)$$

$$\delta_g = 0,005 + 0,001 \cdot \frac{0,1}{0,1} = 0,015 \%. \quad (7)$$

Звідси приймаємо, що $\theta_v = 0,015 \%$.

НСП еталонного термометра θ_t розрахуємо за відомою формулою, яка визначає приведену віднос-

ну похибку засобу вимірювання

$$\theta_t = \frac{1}{2} \cdot \frac{C}{D} \cdot 100 \%, \quad (8)$$

де C - ціна поділки термометра, D - діапазон вимірюваних температур.

Для лабораторного термометра типу ТЛ-7 з ціною поділки 1°C і діапазоном вимірювання $D=400^\circ\text{C}$ чисельне значення похибки θ_t буде складати

$$\theta_t = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{400} \cdot 100 = 0,125 \%. \quad (9)$$

Похибку нелінійності отриманої градуувальної характеристики проаналізуємо як адитивну похибку випадкового процесу [4] і її обчислимо виходячи з експериментально обробленої [3] градуувальної характеристики графоаналітичним методом за допомогою виразу

$$\theta_n = \frac{\Delta U_{\max}}{2 \cdot U_{\max}} \cdot 100 \%, \quad (10)$$

де ΔU_{\max} - максимальне відхилення вихідної напруги мостової схеми від прийнятої лінеаризованої характеристики.

Визначені таким чином значення параметрів для формули (10) становлять $\Delta U_{\max}=16$ мВ і $U_{\max}=650$ мВ. Тому

$$\theta_n = \frac{316}{2 \cdot 650} \cdot 100 = 1,23 \%. \quad (11)$$

Після підставлення числових значень в (4) отримуємо, що

$$\theta_{kt} = \sqrt{2 \cdot (0,015)^2 + 2 \cdot (0,125)^2} + 1,23 = 1,41 \%. \quad (12)$$

СКВ похибки градуування термоопору S_{kt} визначимо з відомої залежності для оцінки СКВ відхилення випадкової величини [4]:

$$S_{kt} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (k_{ti} - \bar{k}_t)^2}{n-1}}, \quad (13)$$

де k_{ti} - значення градуувального коефіцієнта при експериментальній побудові i -тої градуувальної характеристики, \bar{k}_t - середнє значення градуувального коефіцієнта.

Розраховане за (13) значення похибки по результатах п'ятикратного градуування термоопору у відсотках є таким:

$$S_{kt} = \pm 0,43 \%. \quad (14)$$

Значення НСП θ_{At} визначимо виходячи з виразу (2), який свідчить про посередній метод його визначення через постійну часу термодавача T_t і фактично досліджувану частоту пульсацій температури f_t . Систематична складова похибки θ_{At} (рис. 1) буде визначатися складовими θ_t і θ_n , які згідно [4] стосовно посередніх вимірювань і згідно методики та результатів експериментальних досліджень постійної часу

T_i [3] розробленого малоінерційного термометра, дозволяють записати, що

$$\theta_{T_i} = 1,1 \cdot \sqrt{\theta_l^2 + \theta_v^2}. \quad (15)$$

Враховуючи паспортні дані самописця, маємо, що $\theta_v=1,5\%$, а застосовуючи відлік довжини l з абсолютною похибкою $0,5$ мм (півподілки міліметрової шкали діаграми) на довжині близько 50 мм діаграми (довжину можна змінювати перемиканням швидкості руху стрічки) отримуємо, що

$$\theta_l = \frac{0,5}{50} \cdot 100\% = 1\%. \quad (16)$$

Крім того, за результатами обробки багаторазового визначення T_i встановлено, що СКВ випадкової похибки його визначення згідно обробки даних за відомими залежностями не перевищувало $S_{T_i}=\pm 0,5\%$. Тому похибка визначення постійної часу δ_{T_i} буде становити

$$\delta_{T_i} = K_{\Sigma} (t_q \cdot \tilde{S}_{A_i} + \theta_{T_i}), \quad (17)$$

де K_{Σ} - коефіцієнт, який визначає особливість сумування складових похибки і залежить від довірчої ймовірності і співвідношення θ_A/S_A , t_q - коефіцієнт Ст'юдента при довірчій ймовірності $0,95$ і числі спостережень n . Підставляючи конкретні числові значення, знаходимо, що

$$\delta_{T_i} = 0,76 \cdot \left(2,179 \cdot 0,5 + 1,1 \sqrt{1,5^2 + 1^2} \right) = 2,33\%.$$

У виразі (17) значення коефіцієнта K_{Σ} вибрано згідно [5].

Враховуючи описану в [6] методику знаходження похибки δ_{T_i} , яка чисельно рівна $\pm 0,6\%$, і з урахуванням реальної постійної часу $T_i=0,04$ с [3] отримуємо, що складова $\theta_{A_i}=2,21\%$.

Значення НСП θ_{en2} чисельно дорівнюють розрахованим при аналізі похибок давача температури, так як при перетворенні вимірювальної інформації використовується аналогічний диференціальний вольтметр постійного струму типу В2-34. Тому згідно формул із технічного опису приладу маємо, що

$$\theta_{\Delta U} = 0,006\% \text{ і } \theta_{kv} = 0,8\%. \quad (18)$$

Складову похибки θ_{st} приймемо співрозмірною з похибкою стабільності руху стрічки самописця, а складову похибки θ_{ht} - із систематичною складовою похибки диференціального вольтметра В 2-34, яка для умов вимірювання не перевищує $0,06\%$. Під-

ставляючи отримані числові значення складових похибки в (3) отримуємо таке значення НСП:

$$\theta_{\Delta t} = 1,1 \sqrt{0,06^2 + 2,21^2 + 1^2 + 0,06^2 + 0,8^2 + 0,006^2} = 2,81\%. \quad (19)$$

СКВ випадкової похибки відліку амплітуди пульсації температури з осцилограми S_{ht} приймемо за результатами розрахованого для відліку пульсації температури, яке чисельно становить $0,01\%$.

Далі, обчислюючи відношення $\tilde{\theta}_{\Delta t} / \tilde{S}_{\Delta t} \approx 280$, бачимо, що воно суттєво перевищує по значенню число 8 , тому згідно [4] за похибку вимірювання пульсації температури приймаємо невилучену систематичну похибку $\theta_{\Delta t}$, яка розрахована згідно в (19) і її чисельне значення становить $\theta_{\Delta t}=2,8\%$.

Отримане значення похибки хоча і є на перший погляд суттєвим, але воно є меншим 5% і в повній мірі задовольняє умовам якісного контролю технологічних параметрів, які необхідні для побудови розрахунково-експериментальних математичних моделей процесу теплообміну пульсуючих нестационарних газорідних середовищ.

1. Седач В. С. Газовая динамика выпускных систем поршневого машин. - Харьков: Вища школа, 1974. - 248 с. 2. Долишній Б. В., Козак Ф. В., Середюк О. Є., Чеховський С. А. Дослідження якісних параметрів дизельних двигунів // Методи та прилади контролю якості. - 2000. - № 5. - С. 79-83. 3. Малоінерційний термометр для дослідження пульсуючих високотемпературних газових потоків / Долишній Б. В., Козак Ф. В., Середюк О. Є. та ін. // Геологія, буріння та експлуатація родовищ нафти і газу: Зб. наук. пр. - Київ: ВАТ "Український нафтогазовий інститут". - 2000. - Вип. 2. - С. 81-89. 4. Бурдун Г. Д., Марков Б. И. Основы метрологии. - М.: Издательство стандартов, 1975. - 335 с. 5. Рабинович С. Г. Погрешности измерений. - Л.: Энергия, 1978. - 262 с. 6. Долишній Б. В., Козак Ф. В., Середюк О. Є. Аналіз точності визначення частоти нестационарних коливань пульсуючих газових потоків // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Технічна кібернетика та електрифікація об'єктів паливно-енергетичного комплексу: Державний міжвідомчий науково-технічний збірник. - 2001. - Т. 6. - № 37. - С. 135-140.