

УДК 621.373.121

С.К. ПИДЧЕНКО, А.А.ТАРАНЧУК

Хмельницький державний університет, Україна

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТЕПЛООВОГО СТАНУ КВАРЦОВОГО РЕЗОНАТОРА НА ЕТАПІ ВСТАНОВЛЕННЯ КОЛИВАНЬ

В роботі розглядається задача оцінювання теплового стану кварцового резонатора на етапі встановлення коливань при використанні в якості термодатчика терморезистора, розміщеного поблизу активної зони п'єзоелемента, і за багаточастотного збудження кварцового резонатора з одночасним виділенням інформації про дестабілізуючі фактори. Надані рекомендації з мінімізації похибок ідентифікації температури.

кварцовий резонатор, багаточастотне збудження, ідентифікація, тепловий стан

Вступ

Варіація температури кварцового резонатора (КР) є одним із основних дестабілізуючих факторів, який обмежує точнісні характеристики п'єзорезонансних пристроїв на їх основі, зокрема кварцових генераторів (КГ). Намагання мінімізувати дані впливи у сукупності з вимогами до мікромініатюризації та зниження енергоспоживання призвело к створенню нового класу п'єзорезонансних пристроїв – кварцових резонаторів-термостатів (РТ) та КГ на їх основі. Дані пристрої базуються на системі термостатування, як правило, з плівковими нагрівачами та термодатчиками, які встановлені безпосередньо на п'єзоелементі (ПЕ). Якість термостатування визначається як основними квазістатичними параметрами РТ (за номінальної температури термостатування), так і одним із найважливіших динамічних параметрів – часом встановлення номінальної частоти РТ або часом його готовності [1].

Скорочення часу готовності РТ за рахунок прискорення (форсажу) розігріву суттєво спотворює температурне поле ПЕ, що обумовлює появу значних градієнтів температури. При цьому спостерігаються характерні термодинамічні зсуви частот, що помітно затягує процес встановлення. Цілком реальна ситуація, коли динамічна складова частоти зводить нанівець спроби скорочення часу встановлення за рахунок прискорення розігріву. Більш того, починаючи з деякого значення швидкості розігріву, по-

дальше її збільшення може не тільки не прискорювати, але і, навпроти, сповільнювати встановлення частоти [2].

Для уникнення цих явищ особливої уваги набуває задача забезпечення оптимального теплового режиму РТ як на етапі встановлення коливань, так і за номінального режиму термостатування, яка вимагає вирішення питань достовірної ідентифікації теплового стану ПЕ. Ідентифікація теплового стану шляхом вимірювання температури ПЕ за межами активної зони супроводжується значними похибками, значимість яких підвищується з підвищенням вимог до точності КГ. Принципово кращі результати може забезпечити підхід, за яким ідентифікація теплового стану КР здійснюється шляхом вимірювання частоти додаткового сигналу, що формується самим резонатором. При цьому КР збуджується в багаточастотному режимі, а частотовизначаюча та вимірювальні функції суміщаються. Такій підхід в квазістатичній постановці вперше був запропонований в [3], практично використаний в [4] та теоретично узагальнений в [5].

Мета роботи – визначення похибок оцінювання температури п'єзоелемента на етапі встановлення коливань при використанні в якості термодатчика терморезистора, який розташований поблизу активної зони ПЕ, і за багаточастотного збудження кварцового резонатора з одночасним виділенням інформації про дестабілізуючі фактори.

1. Постановка задачі

Визначимо задачу ідентифікації теплового стану ПР як знаходження оптимального вектора параметрів вимірювального перетворювача $\mathbf{x} = [x_l]_{l=1}^L$ із експлуатаційної області \mathbf{X}_E шляхом мінімізації інтегрального функціонала якості [6]:

$$\Phi(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^K v_k(T_k) \cdot \left\{ \frac{1}{\Omega_k} \int_0^{\Omega_k} \Theta_k(t, \mathbf{x})^2 dt \right\}, \quad (1)$$

тобто як пошук

$$\mathbf{x}_{opt} = \arg \min_{\mathbf{x} \in \mathbf{X}_E} \Phi(\mathbf{x}), \quad (2)$$

де

$$\Theta_k(t, \mathbf{x}) = \Delta T_k(t) - \Delta \hat{T}_k(t - \tau, \mathbf{x}) - \quad (3)$$

k -та нев'язка відхилень $\Delta T_k(t) = T(t) - T_k$ миттєвої температури $T(t)$ ПР відносно k -го значення температури T_k , яка входить до вектора можливих значень температури

$$\mathbf{T} = [T_k]_{k=1}^K, \quad T_k \in [T_{min}, T_{max}]$$

і оцінка цих відхилень $\Delta \hat{T}_k(t - \tau, \mathbf{x})$, які враховують інерційність перетворення $T(t) \rightarrow T(t - \tau)$;

$\mathbf{N} = [v_k(T_k)]_{k=1}^K$ – вектор вартості помилок ідентифікації температури ПР в межах можливих значень вектора \mathbf{T} ; T_{min}, T_{max} – мінімальна, максимальна (експлуатаційна) температура ПР; Ω_k – період спостереження k -ої температури ПР.

2. Використання датчика температури для вимірювання температури ПЕ

Градувальна характеристика терморезистора (ТР) в околі температури T_k з достатнім ступенем точності апроксимується виразом

$$R(T) = R_k \exp\{B(T_k - T)/T_k T\}, \quad (4)$$

де R_k – значення опору ТР за температури T_k ; B – постійний коефіцієнт, який визначається типом ТР, що використовується.

Розкладаючи (4) в ряд Тейлора в малому околі $\Delta T_k(t)$ та обмежуючись лінійним наближенням, отримуємо

$$R = R_k(1 + \alpha_k \Delta T_k(t)), \quad (5)$$

де $\alpha_k = B/T_k^2$.

В якості функції оцінювання використаємо функцію

$$y_u(t) = k_u I(t) R(t) (1 + \alpha \Delta T(t)), \quad (6)$$

де k_u – коефіцієнт перетворення; $I(t)$ и $R(t)$ – миттєві значення струму та опору терморезистора:

$$I(t) = \langle I(t) \rangle + \delta I(t); \quad R(t) = \langle R(t) \rangle + \delta R(t), \quad (7)$$

які містять детерміновані ($\langle I(t) \rangle = I_k$, $\langle R(t) \rangle = R_k$) і стохастичні ($\delta I(t)$, $\delta R(t)$) компоненти у вигляді нор-мальних некорельованих випадкових процесів с нульовим математичним сподіванням.

Тоді, використовуючи функцію оцінювання (6), можна перейти до еквівалентного (3) виразу

$$\Theta_{u_k} = y_u(\Delta T_k(t), I_k, R_k) - y_u(\Delta T_k(t - \tau), I(t), R(t)), \quad (8)$$

а з урахуванням (6), (7) та зневажаючи членами другого порядку малості, отримаємо

$$\alpha_{u_k} \cdot \Theta_{u_k} = \Delta T_k(t) - \Delta T_k(t - \tau) - \frac{1}{\alpha_k} \left(\frac{\delta R(t)}{R_k} + \frac{\delta I(t)}{I_k} \right), \quad (9)$$

де $\alpha_{u_k} = (\alpha_k k_u R_k I_k)^{-1}$ – нормуючий коефіцієнт.

Дисперсія правої частини (9) характеризує похибку оцінки температури $T(t)$ в k -й точці градувальної характеристики ТР і визначається як

$$\sigma_{u_k}^2 = 2\sigma_T^2(1 - \rho(\tau)) + \frac{1}{\alpha_k^2} \left[\frac{\sigma_R^2}{R_k^2} + \frac{\sigma_I^2}{I_k^2} \right] = \sigma_{u_{дин}}^2 + \sigma_{u_{ст}}^2, \quad (10)$$

де σ_T^2 и $\rho(\tau)$ – дисперсія и коефіцієнт кореляції процесу $\Delta T_k(t)$; σ_R^2 и σ_I^2 – дисперсії флуктуацій процесів $\delta R(t)$ и $\delta I(t)$ відповідно; $\sigma_{u_{дин}}^2$ и $\sigma_{u_{ст}}^2$ – динамічна та статична складові (10).

Динамічні властивості терморезистивного датчика еквівалентні інтегруючому колу першого порядку, тому

$$\rho(\tau) = \exp\{-\beta \cdot |\tau|\}, \quad (11)$$

де $\beta = 1/t_{proz}$; t_{proz} – час розповсюдження теплових хвиль від області локалізації енергії електромеханічних коливань КР до ТР; $\tau < \tau_{кор}$ – затримка перетворення температура – опір, яка визначається постійною часу терморезистора τ_R ($\tau \approx 3\tau_R$);

$$\tau_{кор} = \int_0^{\infty} \rho(\tau) d\tau = 1/\beta - \text{період кореляції.}$$

Представивши $\rho(\tau)$ у вигляді ряду та обмежившись одним нелінійним членом, маємо:

$$\sigma_{u_{дин}}^2 = 2\gamma_{\tau} \sigma_T^2; \quad \sigma_{u_{см}}^2 = \gamma_{R_k} (\chi_{R_k}^2 + \chi_{I_k}^2), \quad (12)$$

де $\gamma_{\tau} = \beta\tau \left(1 - \beta\tau/2\right)$ та $\gamma_{R_k} = 1/9\alpha_k^2$ – коефіцієнти,

які визначають динамічну та статичну складові похибки вимірювання температури; $\chi_{R_k} = \Delta_R \cdot R_k^{-1}$ і $\chi_{I_k} = \Delta_I \cdot I_k^{-1}$ – відносні варіації $R_k(t)$ і $I_k(t)$, з урахуванням того, що $\Delta_R = 3\sigma_R$ і $\Delta_I = 3\sigma_I$.

Аналіз статичної та динамічної складової похибки вимірювання температури (12) для вектора параметрів $\mathbf{x} = (\alpha_k, \tau_R, \beta)$ [6] вимірювального перетворювача показує, що підвищення точності вимірювань досягається за рахунок використання ТР з більшими значеннями параметра B , що сприяє підвищенню крутості градувальної характеристики.

Для більш-менш прийнятної точності відображення динаміки теплових змін необхідно забезпечити виконання умови $\tau_R \leq (0,03 \dots 0,035)/\beta$ або $\tau_R \leq 0,5 \dots 1$ с. На практиці це можливо тільки для обмеженої кількості терморезисторів (СТ1(3)-18, СТ1(3)-19, СТ3-25(26)).

Приклад. Розрахуємо складові похибок визначення теплового стану піделектродної області ти-

пового п'єзрезонатора АТ-зрізу з номінальною резонансною частотою $f_{111} = 6,027370$ МГц та конструктивними параметрами $2h_0 = 0,278$ мм, $R' = 270$ мм; $\rho'h'/\rho h = 0,00642$ (рис. 1) для температури термостатування $T_k = T_{stat} = 60$ °С. В якості датчика температури використаємо безкорпусний терморезистор СТ3-18-2,2к з типовими параметрами $B = 2350$ К, $\tau_R = 1$ с і реальними значеннями $\chi_{R_k} = \chi_{I_k} = 0,005$.

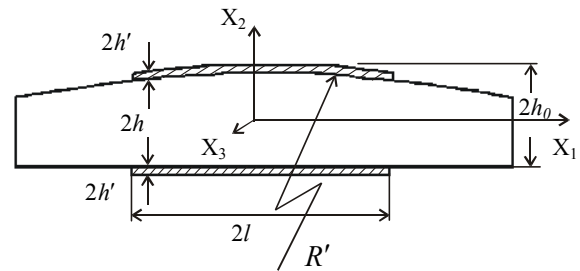


Рис. 1. Геометрична модель ПЕ

Як показано в [7], на етапі визначення розподілу температурного поля п'єзопластини допускається ізотропна інтерпретація задачі, тоді

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_V(x, y, z). \quad (13)$$

Для випадку кінцевого теплообміну між п'єзопластиною та зовнішнім середовищем доповнимо рівняння (13) граничними умовами третього роду

$$-k \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) \Big|_r = \alpha (T|_r - T_{sep}), \quad (14)$$

де $\left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) \Big|_r$ – похідна температури $T|_r$ за зовнішньою нормаллю n до розрахункової області; α – коефіцієнт теплообміну; T_{sep} – температура зовнішнього середовища.

Об'ємна щільність джерела тепла $q_V(x, y, z)$ визначається потужністю збудження $P_{зб} = 0,5 I_q^2 R_q$, де I_q , R_q – струм збудження та динамічний опір КР,

і розподілом амплітуд механічних коливань ПЕ. Для п'єзрезонаторів обернутих Y-зрізів (рис. 1) амплітуди механічних товщинно-зсувових коливань можуть бути представлені як [8]:

$$u_{1nmp} = \sin \frac{n\pi \cdot x_2}{2h} u_{nmp} \cdot e^{jw_{nmp}t}, \quad (15)$$

де
$$u_{nmp} = A^{nmp} \cdot e^{-\alpha_n \frac{x_1^2}{2}} H_{m-1}(\sqrt{\alpha_n} x_1) \times e^{-\beta_n \frac{x_3^2}{2}} H_{p-1}(\sqrt{\beta_n} x_3);$$

$$\alpha_n^2 = \frac{n^2 \pi^2 \hat{c}_1}{8R'h_0^3 M_{1n}}; \quad \beta_n^2 = \frac{n^2 \pi^2 \hat{c}_1}{8R'h_0^3 P_{1n}};$$

$H_{m-1}(\bullet)$, $H_{p-1}(\bullet)$ – поліноми Ерміта; \hat{c}_1 , M_{1n} і P_{1n} – константи, які залежать від геометрії ПЕ, модулів пружності, тощо; $n = 1, 3, 5 \dots$ та $m, p = 1, 2, 3 \dots$ – числа, які визначають кількість напівхвиль, що вкладаються вздовж осей X_2 , X_1 та X_3 відповідно. Тоді об'ємна щільність джерела тепла q_V визначається як

$$q_V(x_1, x_2, x_3) = \frac{P_{зб}}{V_N} \times e^{-\alpha_n \frac{x_1^2}{2}} H_{m-1}(\sqrt{\alpha_n} x_1) \times e^{-\beta_n \frac{x_3^2}{2}} H_{p-1}(\sqrt{\beta_n} x_3), \quad (16)$$

де $V_N = \int_V q_V(x_1, x_2, x_3) dx_1 dx_2 dx_3$ – нормуючий об'єм.

На рис. 2, 3 представлені розподіли температурного поля ПЕ, отримані в середовищі MATLAB за допомогою метода кінцевих елементів у відповідності до [10], в характерні моменти часу після його стрибкоподібного збудження зі струмом збудження I_q , який відповідає потужності збудження $P_{зб} = 500$ мкВт (початкова температура $T_0 = 0$ К, коефіцієнт теплообміну $\alpha \geq 1500$ Вт/К·м²).

Як показує аналіз температурного поля, максимальні спотворення спостерігаються по напрямку осі Z' в точках приєднання електричних виводів, мінімальні – по напрямку осі X (рис. 3). Використову-

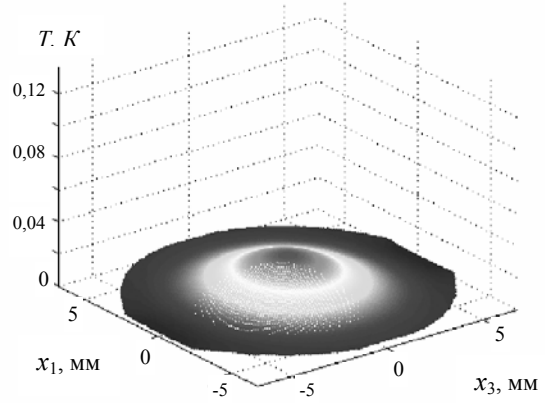


Рис. 2. Розподіл температури поверхні ПЕ, $t = 5$ с

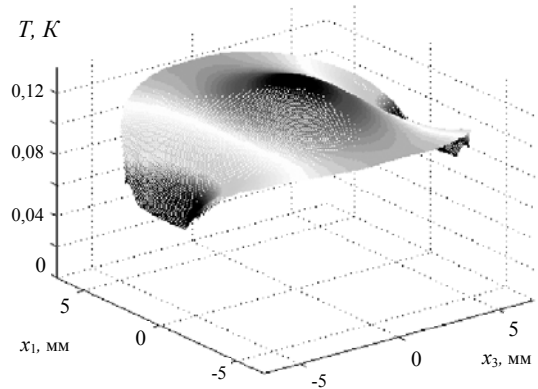


Рис. 3. Розподіл температури поверхні ПЕ, $t = 500$ с чи цей напрямок для ідентифікації температури піделектродної області ПЕ (рис. 4) визначимо параметр β , який для даного типу п'єзоелемента складає $\beta \approx 0,1$ с⁻¹. Тоді для визначених значень параметрів вимірювального перетворювача у відповідності до (13) отримаємо:

$$\gamma_{R_k} = 247,4 \text{ K}^2; \quad \sigma_{u_{cm}}^2 \approx 2,5 \text{ K}^2; \quad 2\gamma_{\tau} \approx 1,5.$$

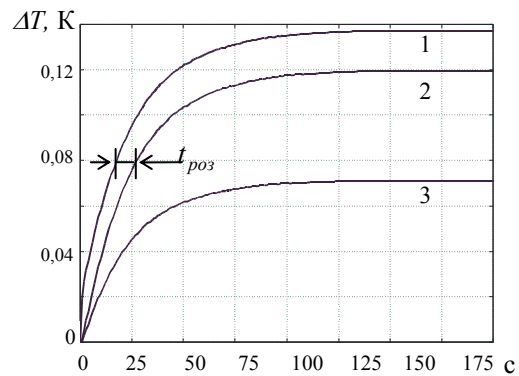


Рис. 4. Температура в центрі ПЕ (1) та на його краях: по осі X (2); по осі Z' (3)

3. Багаточастотне збудження ПР з одночасною ідентифікацією температурних збурень

Проаналізуємо метод вимірювання, у відповідності до якого ПР збуджується на декількох частотах, наприклад, на двох модах f_1 та f_2 з відмінними ТКЧ. У відповідності до (9) представимо температурно-частотні характеристики цих коливань як

$$\varphi_i(T) = \frac{f_i - f_{H_i}}{f_{H_i}} = \sum_{j=1}^3 a_{ij} (T - T_H)^j + \tilde{a}_i \frac{dT}{dt}, \quad (17)$$

де a_{ij} , \tilde{a}_i – ТКЧ відповідного порядку та термодинамічний коефіцієнт, $i = \overline{1, 2}$; f_{H_i} – номінальна частота ПР, яка відповідає температурі T_H .

Якщо для ідентифікації температурних збурень використовуються дві моди f_1 , f_2 з різними ТКЧ (бажано за знаком), то в якості оцінюючої доцільно використати функцію різниці

$$\varphi_1(t) - \varphi_2(t) = \frac{\Delta f_1(t)}{f_{H_1}} - \frac{\Delta f_2(t)}{f_{H_2}} = \xi_f(t). \quad (18)$$

Тоді, розглядаючи (18) як лінійну функцію поблизу температури T_k та здійснюючи перехід від диференціальної форми представлення до кінцевих різностей отримаємо

$$\xi_f(t) = \xi_{f_k} (1 + \lambda_k \Delta T_k(t)), \quad (19)$$

де $\xi_{f_k} = \xi_f(t) \Big|_{T(t)=T_k} = \sum_{j=1}^3 A_j \cdot (T_k - T_H)^j$ – відносна

різницева розстройка за температури T_k ;

$$A_1 = (a_{11} - a_{22}) + (\tilde{a}_1' - \tilde{a}_2'); \quad A_j = (a_{1j} - a_{2j}) -$$

коефіцієнти різницевої ТЧХ ($j = \overline{2, 3}$);

$$\tilde{a}_i' = \tilde{a}_i / \Delta t, \quad i = \overline{1, 2};$$

$$\lambda_k = \frac{\partial \xi_f(t) / \partial T}{\xi_f(t)} \Big|_{T(t)=T_k} = \frac{1}{T_k} \cdot \frac{\sum_{j=1}^3 j A_j \cdot T_k^{j-1}}{\sum_{j=1}^3 A_j \cdot T_k^{j-1}} -$$

нормована крутизна.

Нестабільності частот, які генеруються, $f_1(t) = \langle f_1(t) \rangle + \delta f_1(t)$ і $f_2(t) = \langle f_2(t) \rangle + \delta f_2(t)$, обумовлені флуктуаціями напруги живлення, шумами схеми, тощо, де $\delta f_1(t)$, $\delta f_2(t)$ – нормальні випадкові процеси з нульовим середнім та часом кореляції $\tau_{1,2} \ll \tau_{кор}$, призводять до виникнення похибки перетворення температура – частота ($T(t) \rightarrow f(t)$):

$$\xi_{f_k}(t) = \langle \xi_{f_k}(t) \rangle + \delta \xi_f(t), \quad (20)$$

де $\langle \xi_{f_k}(t) \rangle = \xi_{f_k}$ та $\delta \xi_f(t)$ – детермінована та випадкова компоненти параметра перетворення.

З урахуванням (22), (23) перейдемо від (3) до еквівалентного виразу

$$\Theta_{f_k} = \xi_f(\Delta T_k(t), \xi_{f_k}) - \xi_f(\Delta T_k(t - \tau), \xi_{f_k}, \delta \xi_f(t)), \quad (21)$$

тоді аналогічно (9)

$$\lambda_{f_k} \Theta_{f_k} = \left\{ \Delta T_k(t) - \Delta T_k(t - \tau) - \frac{1}{\lambda_k} \cdot \frac{\delta \xi_f(t)}{\xi_{f_k}} \right\}, \quad (22)$$

де $\lambda_{f_k} = (\lambda_k \xi_{f_k})^{-1}$ – нормуючий коефіцієнт.

Дисперсія похибки (22) відповідно визначається як

$$\sigma_{\xi_{f_k}}^2 = 2\sigma_T^2(1 - \rho(\tau)) + \frac{1}{\lambda_k^2} \cdot \frac{\sigma_{\xi_f}^2}{\xi_{f_k}^2} = \sigma_{\xi_{f_{dun}}}^2 + \sigma_{\xi_{f_{cm}}}^2, \quad (23)$$

де $\sigma_{\xi_f}^2$ – дисперсія флуктуацій процесу $\delta \xi_f(t)$.

Флуктуації $\delta \xi_f = \delta f_1(t)/f_{H_1} - \delta f_2(t)/f_{H_2}$ та дисперсія $\sigma_{\xi_f}^2$ похибки $\sigma_{\xi_{f_{cm}}}^2$ визначаються безпосередньо з (23):

$$\sigma_{\xi_f}^2 = \sigma_{f_{12}}^2 (\xi_{12} + \xi_{12}^{-1} - 2\rho_{12}) \cdot (f_{H_1} f_{H_2})^{-1}, \quad (24)$$

де $\xi_{12} = f_{H_1}/f_{H_2}$; $\sigma_{f_{12}} = \sigma_{f_1} = \sigma_{f_2}$;

ρ_{12} – коефіцієнт взаємної кореляції процесів $\delta f_1(t)$

та $\delta f_2(t)$.

В даному випадку вектор параметрів, що оптимізуються, $\mathbf{x} = (\tau_T, \lambda_k)$, визначається характеристиками ПР (формою та типом зрізу ПЕ, геометрією його електродів, конструкцією утримувачів тощо) і розв'язок (2) зводиться в основному до задачі конструктивно-технологічної оптимізації параметрів п'єзрезонатора на етапі його виготовлення.

Аналіз компонент статичної складової $\sigma_{\xi_{f_{cm}}}^2$ похибки (23) для реальних п'єзрезонаторів АТ-зрізу та SC-зрізу [6] підтверджує більш високу температурну чутливість ідентифікуючої функції (21) для резонаторів SC-зрізу за достатньо високою лінійністю її коефіцієнтів $\lambda_k(T_k)$ і $\xi_{f_k}(T_k)$. Це обумовлено високою температурною чутливістю та лінійністю спеціально сконструйованої моди В резонаторів SC-зрізу, яким доцільно віддавати перевагу при побудові прецизійних пристроїв.

Для аналізу динамічної похибки ідентифікації (23) за багаточастотного збудження використаємо часові залежності зсувів частоти п'єзрезонатора АТ-зрізу для двох мод коливань: першої механічної гармоніки Δf_1 та третьої механічної гармоніки Δf_3 за стрибкоподібною зміни потужності збудження

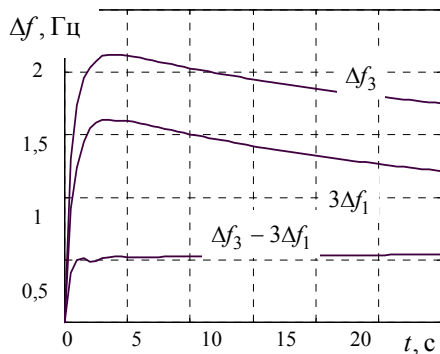


Рис. 5. Встановлення коливань КР АТ-зрізу

($P_{зб} = 100$ мкВт) [9]. Бачимо, що процеси встановлення коливань носять достатньо довготривалий характер (рис. 5).

Але високий степінь кореляції процесів встановлення для мод Δf_1 і Δf_3 , обумовлений локалізацією енергії коливань в одному і тому ж об'ємі збудження ПЕ, дозволяє значно покращити динамічні характеристики перетворювача температура-частота (на порядок і більше) за рахунок використання різницевої частоти $\Delta f_3 - 3\Delta f_1$.

Приклад. Для реальних значень параметрів КГ «Сонет» ($f_{H_1} = 9999,924$ кГц, $f_{H_2} = 3350,024$ кГц за температури $T_k = T_0 = 60$ °С, термодинамічні коефіцієнтів для першої гармоніки $\tilde{a}_1 = -3,75 \cdot 10^{-5}$ °С/К, третьої – $\tilde{a}_3 = -5,5 \cdot 10^{-5}$ °С/К типових нестабільностей $\Delta f_1/f_{H_1} = 3\sigma_{f_1}/f_{H_1} = 1 \cdot 10^{-6}$, $\Delta f_2/f_{H_2} = 3\sigma_{f_2}/f_{H_2} = 0,5 \cdot 10^{-5}$, $\rho_{12} = 0,7$) та періоді вимірювання частоти $\tau = 0.1$ с, з урахуванням (26), (27), отримаємо:

$$\lambda_k \approx 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}; \quad \xi_{f_k} = 0,0172$$

і відповідно статичну та динамічну складові похибки:

$$\sigma_{\xi_{f_{cm}}}^2 \approx 0,068 \text{ К}^2; \quad \sigma_{\xi_{f_{дин}}}^2 \approx 0,19 \sigma_T^2.$$

Співставлення отриманих даних показує, що навіть за відносно невисокої стабільності коливань f_1 і f_2 статична похибка ідентифікації поточної температури ПЕ з використанням функції (18) зменшується приблизно на два порядки в порівнянні з (6), а динамічна – на порядок.

Висновки

Аналіз отриманих аналітичних виразів, які визначають похибки ідентифікації температурного стану п'єзрезонатора, а також безпосередній розрахунок статичних та динамічних складових цих похибок показують, що система терморегулювання з окремим термодатчиком та ідентифікуючою функцією (6) за рахунок просторового розподілу джерел температурних збурень та термодатчика не дозволяє ефективно проводити ідентифікацію теплового стану ПР як в квазістатичному режимі, так і за високих

швидкостей змін температури ПЕ на етапі встановлення коливань, обмежуючи тим самим своє використання пристроями низького та середнього класів точності. Для високоточних п'єзореzonансних пристроїв допустимі похибки ідентифікації досягаються за рахунок використання інформації, яка міститься в змінах частот додатково збуджених коливань (переводу коливальної системи в режим багаточастотного збудження), що дозволяє покласти на КР, окрім функції стабілізації частоти коливань, ще і функцію вимірювання температури, розглядаючи, в даному випадку п'єзореzonатор, по суті, як прецизійний датчик дестабілізуючих впливів.

На практиці, перехід до ідентифікуючої функції (18) дозволяє суттєво покращити (як мінімум на порядок) стабільність коливань КГ «Сонет» в режимі термостабілізації, а також скоротити час готовності генератора до 20 ... 24 с, що в 4,5 ... 6 разів менше в порівнянні з початковим. Це пояснюється низькою ефективністю використовуваної системи терморегулювання з окремим термодатчиком, керуюча напруга якого в деякі моменти часу має суттєву похибку, як за величиною, так і за знаком, особливо на етапі встановлення коливань, де переважає термодинамічна складова нестабільності частот f_1 і f_2 . В той же час, ефективна компенсація термодинамічних зсувів частоти досягається безпосередньо із аналізу стану самого ПР за допомогою додатково збуджуємої моди f_2 .

Література

1. Пьезоэлектрические резонаторы: Справочник / В.Г. Андросова, Е.Г. Бронникова, А.М. Васильев и др. // Под ред. П.Е. Кандыбы и П.Г. Позднякова. – М.: Радио и связь, 1992. – 392 с.
2. Таранчук А.А. Аналіз методів поліпшення температурних характеристик прецизійних кварцових генераторів // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький. – 2000. – № 3. – С. 196 – 199.

3. Баржин В.Я., Зеленский А.А., Колпаков Ф.Ф. и др. Многоволновой кварцевый резонатор – термодатчик // Электронная техника. Сер. Радиокomпоненты. – 1972. – Вып. 1. – С. 54 – 57.

4. Mourey M., Vaterkowski J.L. New design of a dualmode quartz crystal oscillator // Electronics Letters. – 1985. – V. 21, № 5. – P. 184 – 186.

5. Колпаков Ф.Ф. Многочастотный подход к проблеме инвариантности пьезорезонансных устройств // Радиотехника. – 1987. – № 9. – С. 16 – 18.

6. Колпаков Ф.Ф., Підченко С.К., Таранчук А.А. Идентификация теплового состояния кварцевых резонаторов-термостатов // Вісник Технологічного університету Поділля. Т. 1. Технічні науки. – 2002. – № 3. – С. 232 – 237.

7. Колпаков Ф.Ф., Підченко С.К., Таранчук А.А. Вплив анізотропних властивостей кристалу кварцу на розрахунок температурно-наведених зсувів частоти кварцових п'єзореzonаторів // Вісник Технологічного університету Поділля. Т. 2. Технічні науки. – Хмельницький. – 2003. – № 3. – С. 116 – 120.

8. J.P. Valentin, G. Theobald, J.J. Gagnepain. Frequency shifts arising from in-plane temperature gradient distribution in quartz resonators // Proc. of 38th AFCS. – 1984. – P. 157 – 163.

9. Підченко С.К., Таранчук А.А., Лаба О.А. Температурно-динамічні характеристики кварцових п'єзореzonаторів АТ- та SC-зрізів // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2003. – № 2. – С. 49 – 55.

Надійшла до редакції 20.07.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ф.Ф. Колпаков, Національний аерокосмічний університет ім. М.Е. Жуковського «ХАІ», Харків.