

УДК 681.52.

DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771462023302699>

П. О. Піщела¹, *PhD студент*, С. О. Пономаренко², *к.т.н., с.н.с.*,
С. В. Головач³, *к.т.н.*, Г. Ю. Строкач⁴, *PhD студент*

ТЕРМОКОМПЕНСАЦІЯ ДРЕЙФУ ТВЕРДОТІЛЬНОГО ВІБРАЦІЙНОГО ГІРОСКОПА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СПЛАЙН- АПРОКСИМАЦІЇ

Ua В роботі розглядається твердотільний вібраційний гіроскоп та можливість компенсації температурної залежності, що впливає на його вихідний сигнал. Розглянуто можливість термокомпенсації на основі поліноміальної апроксимації, коефіцієнти моделі якого визначаються за допомогою множинної регресії. Запропоновано поліпшення термокомпенсації сплайн-апроксимацією температурної залежності вихідного сигналу гіроскопа.

En The paper considers a solid-state vibration gyroscope and the possibility of compensating for the temperature dependence affecting its output signal. The possibility of thermal compensation based on a polynomial approximation, the coefficients of which are determined by multiple regression, is considered. The improvement of thermal compensation by spline approximation of the temperature dependence of the gyroscope output signal is proposed.

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

² КПІ ім. Ігоря Сікорського

³ АТ «ЕЛМІЗ»

⁴ КПІ ім. Ігоря Сікорського

Вступ

Дрейф вихідного сигналу твердотілого вібраційного гіроскопу (ТВГ) є одним з найважливіших показників його точності. Температура це величина, що суттєво впливає та вносить додаткові зміни під час вимірювання кутової швидкості, зокрема температурний дрейф є додатковою зміною вихідного сигналу. При цьому також змінюються практично всі параметри гіроскопа: струми та напруги в електронних каскадах із-за зміни опору провідників; властивості матеріалу, із якого виготовляють чутливий елемент; виникнення механічних напруг у місцях з'єднання деталей із різними коефіцієнтами теплового розширення тощо. Врахувати всі фактори, що діють у гіроскопі під дією температури, є складною, але водночас і важливою задачею.

Відомий спосіб температурної корекції [1] ТВГ полягає у вимірюванні вихідного сигналу і температури у не менше, ніж у двох фіксованих значеннях температури, далі обчислюються калібрувальні коефіцієнти температурної моделі і компенсації температурної похибки із використанням вимірюваних коефіцієнтів є недосконалим, оскільки виміри здійснюються на фіксованих температурах чутливого елемента. У цей момент часу виміри не здійснюються, оскільки вихідні сигнали змінюються їх виміри призводять до похибок обчислення коефіцієнтів моделі. Такий момент часу коли встановлюється температура втрачається на кожній фіксованій температурі. У разі використання лінійної моделі залежності вихідного сигналу від температури, необхідно визначити коефіцієнти моделі на двох фіксованих температурах. Для поліноміальної моделі більшого порядку, наприклад, другого (парабола) знадобиться три фіксовані температури. Із-за наявності температурних градієнтів у практичних умовах експлуатації даний спосіб призводить до зростання похибок компенсації. Для зменшення цих похибок треба спеціально стабілізувати температуру.

Відмічається, що вихідний сигнал залежить не тільки від температури, але і від резонансної частоти вібрації та інших сигналів [2].

Слід зазначити, що датчик температури, який, встановлюють на електронній платі, показує температуру плати у точці його установки, тоді як резонансна частота є функція просторового розподілу температури за об'ємом резонатора, як частини чутливого елемента гіроскопа і значно точніше описує зміну вихідного сигналу.

Постановка задачі

Зміна температури викликає градієнти температур за яких залежності втрачають лінійність, отже, наявні нелінійності, що призводять до зрос-

тання похибки калібрування і, відповідно, до похибки компенсації вихідного сигналу [3].

Задля підвищення точності температурної компенсації вихідного сигналу гіроскопа додатково вимірюються резонансна частота, сигнал квадратури та сигнал збудження, які забезпечують більш повний і точний опис змін вихідного сигналу ТВГ у разі зміни температури.

Для оцінки впливу додаткових параметрів, що впливають на вихідний сигнал у його модель вводяться зазначені параметри у вигляді полінома, обчислення цих коефіцієнтів полінома за таких параметрах виконується методом множинної регресії. Даний метод показує прийнятні результати термокомпенсації. Проте у даній роботі пропонується підвищити точність термокомпенсації за допомогою апроксимації температурної залежності за допомогою сплайнів.

Термокомпенсація поліноміальною апроксимацією із множинною регресією

Поліноміальна апроксимація по температурі та термокомпенсація показані на рис. 1, *а*. Для визначення коефіцієнтів полінома застосовувалась множинна регресія. На рис. 1, *б* демонструється результат термокомпенсації вихідного сигналу ТВГ із застосуванням множинної регресії з поліноміальною моделлю від чотирьох параметрів ТВГ, а саме, температури, резонансної частоти, амплітуди збудження та амплітуди компенсації квадратурного сигналу.

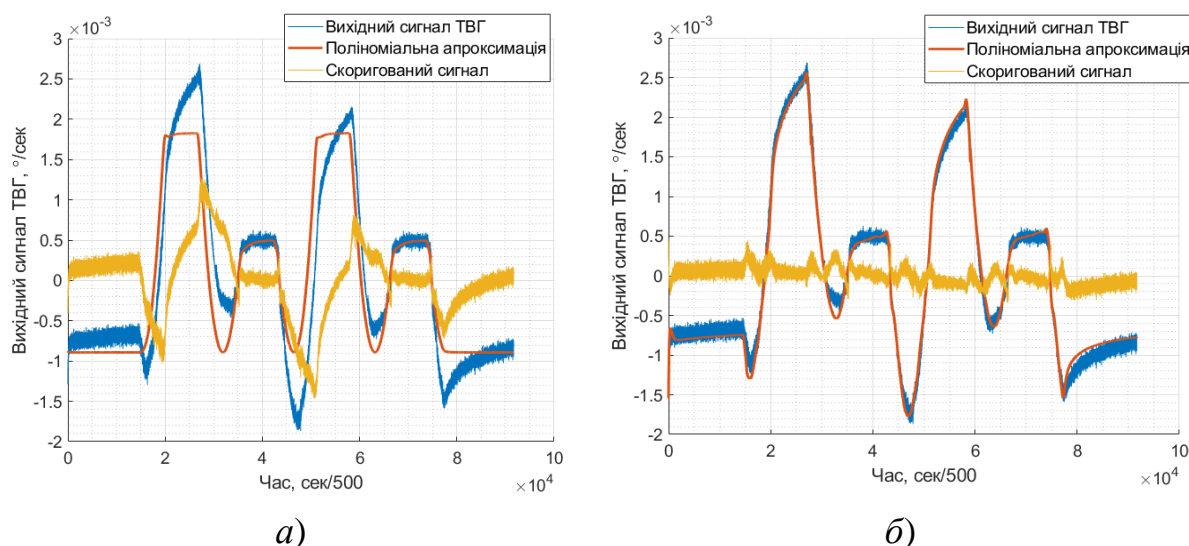


Рис. 1. Результат компенсації множинною регресією: *а*) по температурі; *б*) по чотирьох параметрах

Модель вихідного сигналу для випадку рис. 1, *а* описується поліномом із нелінійною залежністю від температури:

$$out = bias + a \cdot temp + b \cdot temp^2 + c \cdot temp^3, \quad (1)$$

де out – нульовий вихідний сигнал, $bias$ – зміщення нуля, $temp$ – температура, a, b, c – коефіцієнти полінома, які визначаються множинною регресією.

Модель вихідного сигналу для випадку рис. 1, a описується поліномом із нелінійною залежністю від температури:

$$\begin{aligned} out = & bias + a_{temp} \cdot temp + b_{temp} \cdot temp^2 + c_{temp} \cdot temp^3 + a_{freq} \cdot freq + \\ & + b_{freq} \cdot freq^2 + c_{freq} \cdot freq^3 + a_{an} \cdot antinode + b_{an} \cdot antinode^2 + \\ & + c_{an} \cdot antinode^3 + a_{quad} \cdot quad + b_{quad} \cdot quad^2 + c_{quad} \cdot quad^3, \end{aligned} \quad (2)$$

де out – нульовий вихідний сигнал, $bias$ – зміщення нуля, $temp$ – температура, $freq$ – резонансна частота, $antinode$ – амплітуда збудження, $quad$ – амплітуда квадратури, $a_{temp}, b_{temp}, c_{temp}, a_{freq}, b_{freq}, c_{freq}, a_{an}, b_{an}, c_{an}, a_{quad}, b_{quad}, c_{quad}$ – коефіцієнти полінома при параметрах залежності від температури, резонансної частоти, амплітуди збудження та амплітуди квадратури, відповідно, які визначаються множинною регресією.

Точність даного методу термокомпенсації оцінено за допомогою середньоквадратичної похибки (СКП) у градусах за годину. Таким чином, СКП для випадку (1) дорівнює 1,5948 град/г. Для випадку (2) стандартне відхилення дорівнює 0,3742 град/г.

Таким чином, поліноміальна апроксимація температурної залежності вихідного сигналу гіроскопа, є одним досить потужним способом термокомпенсації, проте для кращого результату потребує вводити у поліном залежність не тільки від параметру температури, а й резонансної частоти, амплітуди збудження, амплітуди квадратури.

Термокомпенсація сплайн-апроксимацією

Сплайн – кусково-поліноміальна функція (рис. 2), що визначена на відрізку і має на цьому відрізку деяке число безперервних похідних. Відмінність сплайн апроксимації від звичайної поліноміальної, полягає у тому, що сплайн підганяє поліноми низького ступеня до невеликих підмножин значень, наприклад, підганяючи дев'ять кубічних поліномів між кожною із пар по десять точок, замість того, щоб підганяти під них один поліном дев'ятого ступеня. Сплайн-інтерполяція часто краща за поліноміальну інтерполяцію, оскільки помилку інтерполяції можна зробити невеликою навіть у разі використання для сплайну поліномів низького ступеня [4].

Якщо маємо залежність $f(x)$ на відрізку $[a, b]$, що розбивається на частини $[x_{i-1}, x_i]$, то можна побудувати сплайн якщо:

- на кожному відрізку $[x_{i-1}, x_i]$ є поліномом степеня не вище від трьох;
- має неперервні першу і другу похідні на всьому відрізку $[a, b]$.

– у точках x_i виконується рівність $S(x_i) = f(x_i)$, тобто сплайн $S(x)$ апроксимує залежність f у точках x_i .

Крім того, для побудови сплайну необхідно накласти додаткові граничні умови:

- $S''(a) = S''(b) = 0$;
- $S'''(a) = S'''(b) = 0$;
- $S'(a) = S'(b)$ і $S''(a) = S''(b) = 0$.

Таким чином, для будь-якої залежності f і будь-якого розбиття відрізка $[a, b]$ на частини $[x_{i-1}, x_i]$ існує рівно один сплайн $S_i(x)$, що задовольняє переліченим вище умовам [5].

Сплайн-інтерполяція дозволяє уникнути проблеми явища Рунге, за якого між точками можуть виникати коливання під час інтерполяції з використанням поліномів високого ступеня.

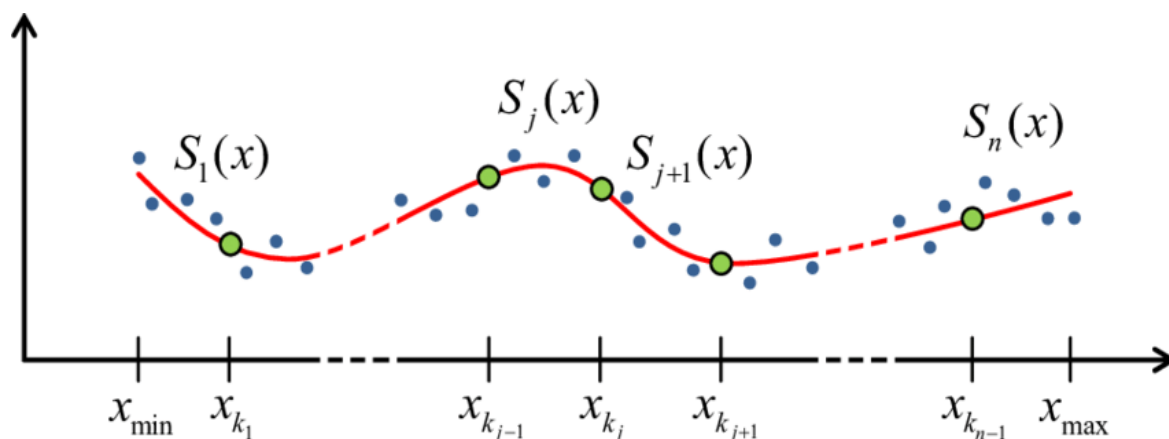


Рис. 2. Сплайн-апроксимація

Одним із найпоширеніших сплайнів є кубічний, тобто якщо маємо апроксимовану криву:

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_i\}, \quad (3)$$

де S_i – поліном третього порядку, який описується наступним виразом:

$$S_i(x) = a + bx + cx^2 + dx^3, \quad (4)$$

Аналогічно одиничний сплайн вихідного сигналу ТВГ залежного від температури можна визначити наступним чином:

$$out_i(T) = a_i + b_i T + c_i T^2 + d_i T^3, \quad (5)$$

де out – вихідний сигнал гіроскопа i -го сплайну, T – температура, a, b, c, d – поліноміальні коефіцієнти. Повний вираз вихідного сигналу гіроскопа у залежності від температури зі сплайн апроксимацією виглядає наступним чином:

$$OUT = \{out_i\}, i = 1 \dots n . \quad (6)$$

На рис. 3 наведено графік залежності нульового вихідного сигналу від температури гіроскопа ТВГ-25М виробництва АТ «ЕЛМІЗ». Видно, залежність нульового вихідного сигналу від температури нелінійна та має гістерезис.

Виконавши сплайн-апроксимацію нелінійної температурної залежності нульового вихідного сигналу гіроскопа (рис. 3), отримуємо результат, який показано на рис. 4. Результат сплайн апроксимації (рис. 4, а), де різний колір апроксимованої функції відповідає одиничному сплайну згідно формули (5). Розмір сплайну, можливо збільшувати і зменшувати, що дозволяє підібрати прийнятний вигляд апроксимованої функції, проте слід враховувати потужність обчислювального модуля. На рис. 4, б показано сплайн-апроксимацію зі зменшеним інтервалом.

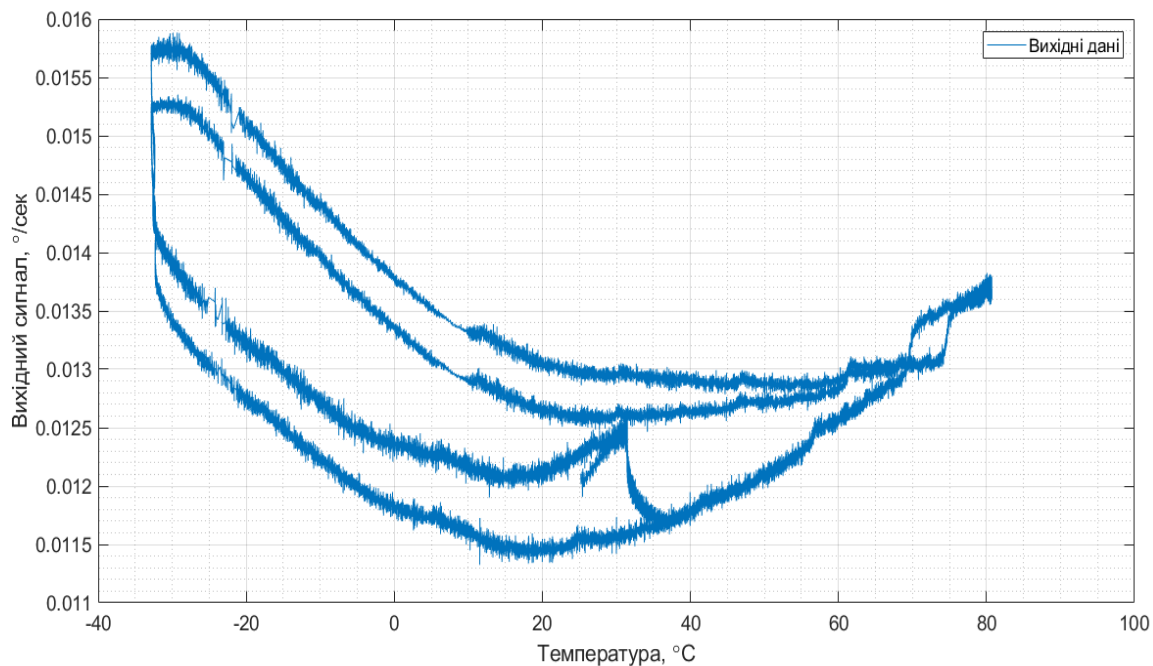


Рис. 3. Залежність вихідного сигналу ТВГ від температури

Нульовий вихідний сигнал із апроксимованою по температурі моделлю в залежності від часу показаний на рис. 5, а. Оскільки сигнал із гіроскопа знімався з частотою 500 Гц, на графіку одиниця часу позначено відповідно до секунд поділений на частоту зйому, тобто 500.

За отриманими сигналами на рис. 5 можливо виконати компенсацію температурної залежності у вихідному сигналі. Результат компенсації показано на рис. 5, б.

Отже, СКП термокомпенсації сплайнами дорівнює 0,1358 град/г, що у 2,7568 разів краще за поліноміальну багатопараметричну апроксимацію.

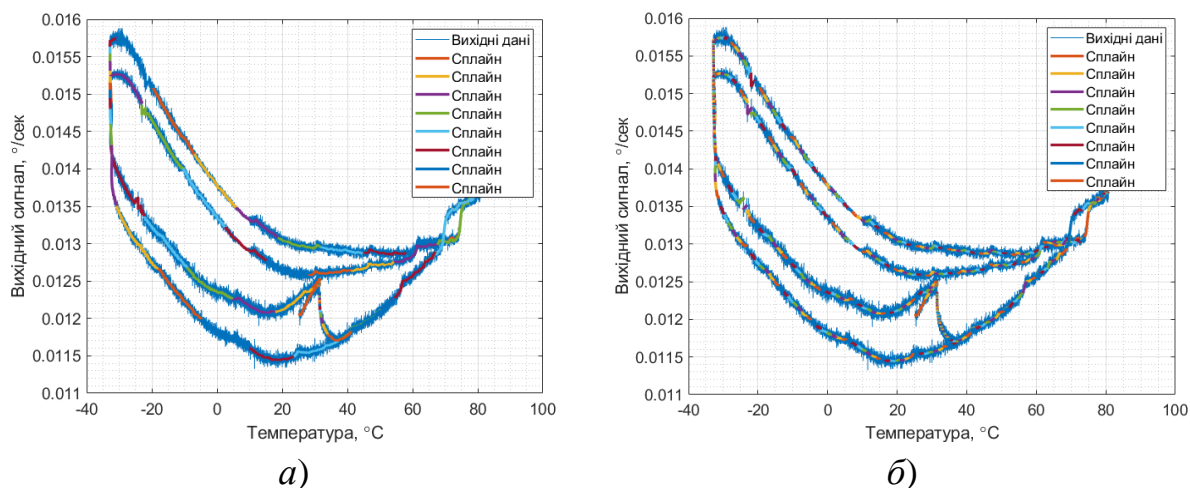


Рис. 4. Результат сплайн апроксимації

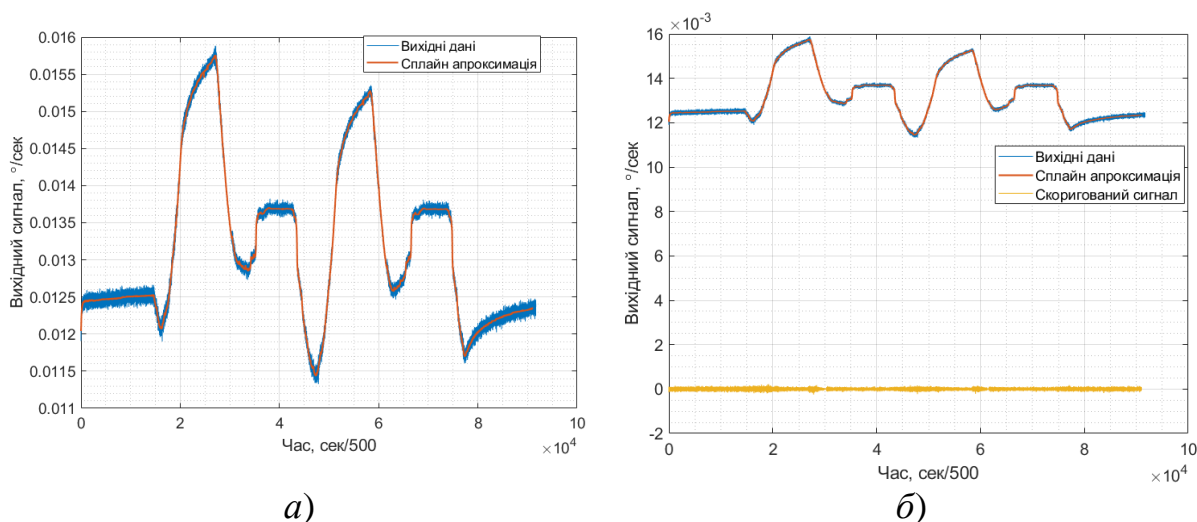


Рис. 5. Вихідний сигнал із апроксимованою моделлю

Висновок

Запропонований метод термокомпенсації вихідного сигналу ТВГ із використанням сплайн-апроксимації демонструє прийнятний результат, щодо підвищення точності приладу у порівнянні із аналогічним методом на поліноміальній моделі із множинною регресією. Зокрема сплайн-апроксимація нелінійної температурної залежності вихідного сигналу не потребує додаткових впливаючих параметрів (резонансної частоти, амплітуди збудження, амплітуди квадратури), для уточнення поліноміальної, оскільки навіть без них поліпшує результат термокомпенсації.

Список використаної літератури

1. Weinberg H. Calibration iMEMS gyroscopes /H. Weinberg // AN-1049 Application note. – Analog devices Inc.. — 2009.

2. *Chikovani V. V.* Bias compensation in differential Coriolis vibratory gyro /V. V. Chikovani, H. V. Tsiruk // Electronics and control systems. — 2013. — №4(37). — PP. 99-103.
3. *Петренко О. В.* Багатопараметрична модель дрейфу вібраційного гіроскопа /О. В. Петренко // Вісник інженерної академії України. — Київ, 2016. — №2. — С.93-97.
4. Sky McKinley and Megan Levine. Cubic Spline Interpolation. Електронний ресурс. Режим доступу - <https://web.archive.org/web/20090408054627/http://online.redwoods.cc.ca.us/instruct/darnold/laproj/Fall98/SkyMeg/Proj.PDF>
5. Електронний ресурс, режим доступу - https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%83%D0%B1%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D1%81%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%B9%D0%BD