

ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРІЛОЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИБАДІВ¹Вінницький національний технічний університет, e-mail: Vladimir.Kucheruk@gmail.com²Уманський національний університет садівництва, e-mail: roma_lir@mail.ru

У статті запропоновано спосіб автоматичного визначення динамічних метрологічних характеристик стрілочних вимірювальних приладів, який дозволяє підвищити точність вимірювання та швидкість роботи за рахунок використання оптичної системи зчитування показів зі шкал стрілочних вимірювальних приладів.

Ключові слова: динамічні характеристики, передаточна функція, MatLab

Вступ

Сучасний рівень інформаційно-вимірювальних систем з використанням засобів технічного зору дають широкі можливості автоматизації випробувань стрілочних вимірювальних приладів. Розв'язок задачі підвищення рівня автоматизації виробництва стрілочних приладів передбачає розробку й впровадження гнучких інформаційно-вимірювальних систем випробувань стрілочних вимірювальних приладів. Результати досліджень [1-4], які присвячені автоматизації контролю виробництва стрілочних індикаторів за допомогою оптико-електронних систем, що розпізнають покази стрілочних вимірювальних приладів, свідчать про високий рівень розвитку технічних і алгоритмічних засобів. Дані інформаційно-вимірювальні системи дають можливість повірити стрілочні вимірювальні прилади у статичному режимі роботи. Лише у роботі [4] розроблена імітаційна модель функціонування системи автоматизації перевірки, яка дозволяє імітувати різні способи перевірки, включаючи і динамічний режим.

Тому, незважаючи на досягнення, невирішеною залишається задача створення інформаційно-вимірювальних систем, що забезпечують побудову універсальних автоматизованих комплексів для випробувань аналогових стрілочних вимірювальних приладів у динамічному режимі роботи.

Метою даної статті є автоматизація процесу визначення динамічних метрологічних характеристик стрілочних вимірювальних приладів, що дозволить підвищити точність вимірювання за рахунок використання оптичної системи зчитування показів зі шкал стрілочних вимірювальних приладів.

Аналіз існуючих досліджень

В роботі [4] реалізований спосіб автоматичного зчитування показів зі шкал стрілочних вимірювальних приладів при їхній перевірці. Оптично сканують всю шкалу приладу в напрямку, що збігається з напрямком шкали при встановленому на нульову відмітку шкали стрілку (такий випадок буде при нульовому входному сигналі, тому що для усунення систематичної помилки у вимірюванні перед перевіркою показчик виставляють на нуль). У зчитаному рядку виділяються сигнали, положення ϕ_i , які відповідають положенням відміток, а їх кількість дорівнює N . Після цього на вхід приладу, що перевіряють, подають задане значення входного сигналу й знову здійснюють сканування всієї шкали. Зі зчитаного рядка виділяються сигнали та визначаються їхні положення $\phi_j^l = \phi_1^l, \phi_2^l, \phi_j^l$, і їх число L . У випадку збігу числа L виділених сигналів із числом N відміток шкали ($L=N$) фіксують суміщення індикатора з відміткою шкали, що перевіряють. А якщо ні, то ($L=N+1$) послідовно порівнюють кожну координату ϕ_j^l з L з кожною координатою ϕ_i з N . Координата ϕ_j^l , для якої виконується умова $|\phi_i - \phi_j^l| \geq \Delta\phi$, де $\Delta\phi$ похибка отримання координат, є положенням показчика, а різниця $\phi_i - \phi_j^l$ є відстань від показчика до відмітки шкали приладу, що перевіряють. Аналогічно визначають покази у всіх відмітках, що перевіряють. Похибка отримання координат $\Delta\phi$ визначається чутливістю граничних елементів, що формують відеосигнал, або дискретністю матриці фотодатчика.

Способи автоматичної перевірки в динамічному режимі орієнтовані на відмітки відлікового пристрою, що перевіряють.

Основною причиною, що обмежує використання при повірці динамічного вхідного сигналу, є інерційність рухомої частини системи живлення приладу. В результаті чого стрілка прямує за сигналом, який подається на вхід приладу, який відстає від його значення на динамічну похибку, яка складається із двох складових: постійної та затухаючої змінних.

При автоматичній повірці на перших відмітках шкали стрілка є інертною по відношенню до вхідного сигналу. Для запобігання динамічної похибки є розрахунок її значення через динамічні характеристики рухомої частини приладу, що повіряється: власну кругову частоту коливань ω_0 і коефіцієнт затухання β .

Розрахунок значень власної кругової частоти і коефіцієнта затухання проводять за результатами вимірювання моментів накладання стрілки приладу з контрольними відмітками, які задаються вхідним сигналом.

Запропонований спосіб автоматичної повірки вимірювальних приладів складається з двох циклів [5].

В основному циклі подають вхідний сигнал, що змінюється за лінійним законом

$$I = S_c \cdot t, \quad (1)$$

де t – час; S_c – швидкість зміни вхідного сигналу, яка дорівнює

$$S_c = \frac{I_n}{T}, \quad (2)$$

де I_n – значення вхідного сигналу, яке відповідає кінцевій точці шкали приладу, що повіряють; T – час збільшення вхідного сигналу від нуля до I_n .

Далі визначають моменти часу в яких відбувається співпадіння стрілки з відмітками на шкалі приладу, що повіряється I'_n , та знаходять відповідні моменти часу t_k значенням вхідного сигналу I_n .

Різниця між значення вхідного сигналу та значення вхідного сигналу вимірюваного приладом є абсолютною похибкою вимірювального приладу

$$\Delta_k = I'_k - I_k. \quad (3)$$

По відношенню до вхідного сигналу стрілка є інертною, що призводить до виникнення динамічної похибки повірки

$$\Delta_k = I'_k - I_k + \Delta_{gk}, \quad (4)$$

де $\Delta_{gk} = \Delta_{g0} + \Delta_{gtk}$; Δ_{g0} – постійна складова динамічної похибки; Δ_{gtk} – змінна складова динамічної похибки.

Через технологічні похибки виробництва електровимірювальних приладів класу точності 1,5 і нижче значення β і ω_0 сильно змінюються, тому значення β і ω_0 визначають для кожного приладу, що повіряється, у допоміжному циклі.

Для цього подають на прилад вхідний сигнал, який відповідає кінцевій точці шкали I_n . Рух стрілки приладу описується рівняннями:

$$I'_k|_{\beta < 1} = I_n \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \cdot e^{\beta \omega_0 t_k} \cdot \sin \left(\omega_0 \cdot t_k \cdot \sqrt{1 - \beta^2} + \arctg \left(\frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{\beta} \right) \right) \right]; \quad (5)$$

$$I'_k|_{\beta > 1} = I_n \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \cdot e^{\beta \omega_0 t_k} \cdot \text{sh} \left(\omega_0 \cdot t_k \cdot \sqrt{1 - \beta^2} + \text{arth} \left(\frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{\beta} \right) \right) \right], \quad (6)$$

що є розв'язком диференціального рівняння

$$\frac{\partial^2 I'}{\partial t^2} + 2\beta \omega_0 \frac{\partial I'}{\partial t} + \omega_0^2 I' = \omega_0^2 I_n. \quad (7)$$

Випадок, $\beta=1$, можливий тільки теоретично і тому не розглядається.

Безпосереднє використання виразів (5) і (6) для визначення β і ω_0 неможливе через нелінійність отриманих системи алгебраїчних рівнянь, а вирішення цієї системи потребує багато часу. Так як спосіб автоматичної повірки вимірювальних приладів повинен працювати в реальному часі, то затримка, яка необхідна для обчислення β і ω_0 досить суттєво впливає на швидкодію повірки.

Тому розрахунок β і ω_0 за допомогою рівнянь (5), (6), (7) виконують у два етапи. Спочатку знаходять наближені значення, а потім точні значення величин.

Для знаходження наближених величин рівняння (7) розкладають в ряд Тейлора

$$I'(t) = I'(0) + \frac{1}{11} \frac{\partial I'}{\partial t} \Big|_{t=0} \cdot t + \frac{1}{21} \frac{\partial^2 I'}{\partial t^2} \Big|_{t=0} \cdot t^2 + \dots \quad (8)$$

В динамічному режимі, що відповідає допоміжному циклу повірки, задають такі початкові умови:

$$I'(0) = 0; \quad (9)$$

$$\frac{\partial I'}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0. \quad (10)$$

Беручи до уваги лише два члени розкладу в (8) і враховуючи (9), (10), отримаємо

$$I'(t) = \omega_0^2 I_n \left[\frac{1}{2} t^2 - \frac{1}{3} \beta \omega_0 t^3 \right]. \quad (11)$$

Так як вираз (11) отримано за допомогою розкладу в ряд Тейлора (8), в допоміжному циклі для підвищення точності повірки після подачі вхідного сигналу I_n визначають моменти часу t_1 та t_2 , що відповідають двом першим відміткам на початку шкали I_1' та I_2'

$$\begin{cases} I_1'(t) = \omega_0^2 I_n \left[\frac{1}{2} t_1^2 - \frac{1}{3} \beta \omega_0 t_1^3 \right]; \\ I_2'(t) = \omega_0^2 I_n \left[\frac{1}{2} t_2^2 - \frac{1}{3} \beta \omega_0 t_2^3 \right]. \end{cases} \quad (12)$$

З системи рівнянь (12) знаходять власну кругову частоту коливань ω_0 і коефіцієнт затухання β :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{I_2'}{I_n \left(\frac{1}{2} t_2^2 - \frac{1}{3} \lambda t_2^3 \right)}}; \quad (13)$$

$$\beta = \frac{\lambda}{\omega_0}; \quad (14)$$

$$\lambda = \frac{3}{2} \left(t_1^2 - \frac{I_1'}{I_2'} t_2^2 \right) \cdot \left(t_1^3 - \frac{I_1'}{I_2'} t_2^3 \right)^{-1}. \quad (15)$$

Для значень кругової частоти коливань ω_0 і коефіцієнт затухання β була проведена оцінка похибок рівнянь (13) і (14) за допомогою моделювання на ПК процесів (5) і (6). В результаті було показано, що при використанні двох перших відміток на шкалі для серійних приладів їх похибка у визначенні кругової частоти коливань ω_0 по формулі (13) складає соті долі відсотка і її можна вважати надзвичайно малою, а похибка у визначенні коефіцієнта затухання β за формулою (14) складає не більше 15 відсотків.

Розглянуті вище методики дають добрі результати у статичному режимі, але в динамічному режимі роботи, похибка визначення коефіцієнта затухання β складає не більше 15 відсотків, що досить суттєво впливає на визначення динамічних характеристик стрілочних вимірювальних приладів.

Основний зміст

Відхилення стрілки стрілочного вимірювального індикатора можна описати коливальною ланкою, що є найпростішим динамічним елементом системи автоматичного керування та має передаточну функцію виду (рис. 1)

$$W(S) = \frac{k}{T^2 S^2 + 2\xi TS + 1}. \quad (16)$$

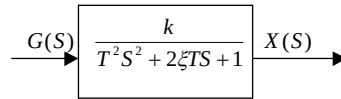


Рисунок 1 – Структурне зображення коливальної ланки

Динамічні властивості коливальної ланки визначаються трьома параметрами [6]: k – коефіцієнтом підсилення (передачі) коливальної ланки; T – постійною часу коливальної ланки; ξ – відносним коефіцієнтом згасання коливальної ланки $0 \leq \xi < 1$.

Перетворюючи рівняння (1), отримаємо:

$$h(t) = k \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\frac{\xi}{T} \cdot t} \cdot \sin \left(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T} t + \varphi \right) \right] \quad (17)$$

$$\varphi = \arctg \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}$$

Рівняння (17) описує згасаючий коливальний процес з відносним коефіцієнтом згасання та частотою $\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T}$. Усталене значення цільової функції визначається як $k = \lim_{t \rightarrow \infty} h(t)$. Графік функції $h(t)$ показаний на рис. 2:

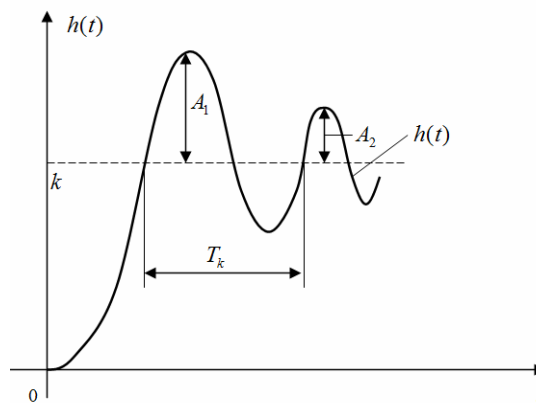


Рисунок 2 – Згасаючий коливальний процес
(T_k – період коливань, A_1, A_2 – амплітуди двох сусідніх коливань)

За графіком функції $h(t)$ можна визначити параметри коливальної ланки. Коефіцієнт підсилення коливальної ланки визначають за встановленим значенням перехідної функції $k = \lim_{t \rightarrow \infty} h(t)$. Постійну часу T і коефіцієнт згасання ξ можна знайти з рівнянь:

$$\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T} \cdot T_k = 2 \cdot \pi ; \quad (18)$$

$$\frac{A_1}{A_2} = e^{-\frac{\xi}{T} \cdot T_k} \quad (19)$$

Для автоматизації процесу визначення динамічних метрологічних характеристик фотографують покази приладу через певний дискретний час. При практичних випробуваннях встановлено, що один кадр зображення отримувася в середньому за 15-40 мс. До цього проміжку часу додавався час на запис зображення у постійну пам'ять комп'ютера. При циклічному фотографуванні приладу створюється папка з цифровою фотографією показу

приладу. Далі ці зображення також у циклічному режимі розпізнають.

У результаті маємо масив зображень показів приладу з відповідним їм рядом часу, в моменти якого ці фото були отримані. Для визначення динамічних характеристик стрілочних вимірювальних приладів ці масиви імпортуються в пакет прикладних програм MatLab.

За допомогою пакету Curve Fitting апроксимуємо ці значення відповідно до рівняння, яке описує затухаючий коливальний процес [7]. Результат представлений на рис. 3.

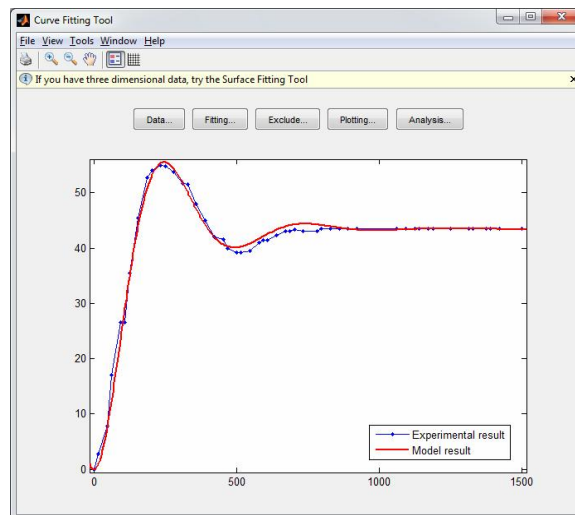


Рисунок 3 – Результат апроксимації

Параметри математичної моделі (довірчий інтервал з надійністю 95%): $T = 72.53$ (71.92, 73.15); $k = 43.44$ (43.3, 43.59); $\xi = 0.3776$ (0.3697, 0.3855).

Статистичні показники: SSE = 10,41; R-square = 0,9984; Adjusted R-square = 0,9983; RMSE = 0,4706;

Квадрату змішаної кореляції (R-square = 0,9984) та уточненого квадрату змішаної кореляції (Adjusted R-square = 0,9983) наближаються до 1, що свідчить про гарне наближення вихідних даних параметричною моделлю. Наближення суми квадратів похибок (SSE=10,41) до нуля говорить про гарну якість наближення даних параметричною моделлю. Але візуальний аналіз графіка побудованої моделі показує добре наближення між емпіричними даними та теоретичними даними.

Список літературних джерел

1. Свинолупов Ю.Г., Седов Э.Н. Автоматизированные установки для поверки и градуировки стрелочных приборов // Проблемы систем управления. - 1995. - № 2. - С.30-34.
2. Патент 2054689 Россия, МКИ G 01 R 35/00 Способ автоматической поверки стрелочных измерительных приборов / С.К. Киселев, Л.В. Федотов, В.А. Мишин (Россия). - № 92008502/09-96.
3. Киселев С.К. Система автоматизации поверки электроизмерительных приборов // Датчики и системы. - 2003. - №6. - С.33-37.
4. Киселев С.К. Способы автоматической поверки стрелочных электроизмерительных приборов в динамических режимах : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.11.05 «Прилади і методи вимірювання електричних та магнітних величин» // Киселев С.К. – Ульяновск, 1994. – 20 с.
5. Патент 2035746 Россия, МКИ G 01 R 35/00. Способ автоматического считывания показаний со шкал стрелочных измерительных приборов при их поверке / С.К. Киселев, В.А. Мишин (Россия). - №5021979/21-95.
6. ДСТУ 2681-94. Метрологія. Терміни та визначення. – К.: Держстандарт України, 1994.
7. Р. Гонсалес, Р. Вулс, С. Эддинс Цифровая обработка изображений в среде MATLAB – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.