

ОЦІНКА СТАТИЧНИХ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ ЗУСИЛЛЯ

Кухарчук В.В., докт.техн.наук, професор,

Кучерук В.Ю., канд.техн.наук, доцент,

Поджаренко В.О., докт.техн.наук, професор,

Білинська М.Й.

Вінницький державний технічний університет

Отримано аналітичні залежності для оцінки основних статичних метрологічних характеристик вимірювального каналу зусилля за допомогою розкладання функції перетворення в ряд Тейлора. Експериментально встановлено, що адитивна і мультиплікативна похибки є не систематичними, як вважалось раніше, а випадковими похибками. Дану обставину необхідно враховувати під час оцінки вірогідності контролю неелектричних фізичних величин, вимірювальний контроль яких здійснюють на основі розглянутого вимірювального каналу.

The analytical dependencies for main static metrological characteristics evaluation of effort measuring channel are got by the expansion of the transformation function in Taylor's series. It was proved by the experiment that additive and multiplicative errors are not systematic, as it was considered earlier, but random. This circumstance should be considered at control trustworthiness evaluation of nonelectrical physical quantities, measuring control of which are made on the basis of considered measuring channel.

Характерною тенденцією розвитку сучасних засобів вимірювальної техніки є широке застосування інформаційно-вимірювальних систем в різноманітних сферах діяльності людини. Основними складовими таких технічних засобів є вимірювальні канали. Найбільш складними з точки зору визначення метрологічних характеристик є вимірювальні канали неелектричних величин, які мають у своєму складі первинні вимірювальні перетворювачі, вимірювальні підсилювачі і аналого-цифрові перетворювачі.

В залежності від режиму роботи засобу вимірювань виділяють статичні і динамічні метрологічні характеристики (МХ). Для оцінки динамічних МХ напрацьовано підходи, які введено у вимірювальну

динамічних МХ напрацьовано підходи, які введено у вимірювальну техніку із теорії автоматичного керування. Тому, якщо є можливість описати фізичні процеси, які протікають у вимірювальному каналі диференціальним рівнянням, то алгоритм отримання аналітичних залежностей для перехідної, імпульсної, амплітудно- і фазочастотних характеристик формалізовано.

Теорія формалізованого визначення статичних МХ знаходиться у стадії розвитку. Тому метою даної роботи є подальший розвиток теорії розкладання функції перетворення у ряд Тейлора для отримання аналітичних залежностей основних статичних метрологічних характеристик вимірювальних каналів зусилля.

Вимірювальний канал зусилля (ВКЗ), який розглядається у даній статті, представляє собою [1] сукупність вимірювальних пристроїв і засіб вимірювань (рисунок 1). До вимірювальних пристроїв в даній схемі належать: первинний вимірювальний перетворювач зусилля (сенсор зусилля СЗ) і масштабний перетворювач (вимірювальний підсилювач ПВ). Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) послідовного наближення є вторинним цифровим засобом вимірювань.

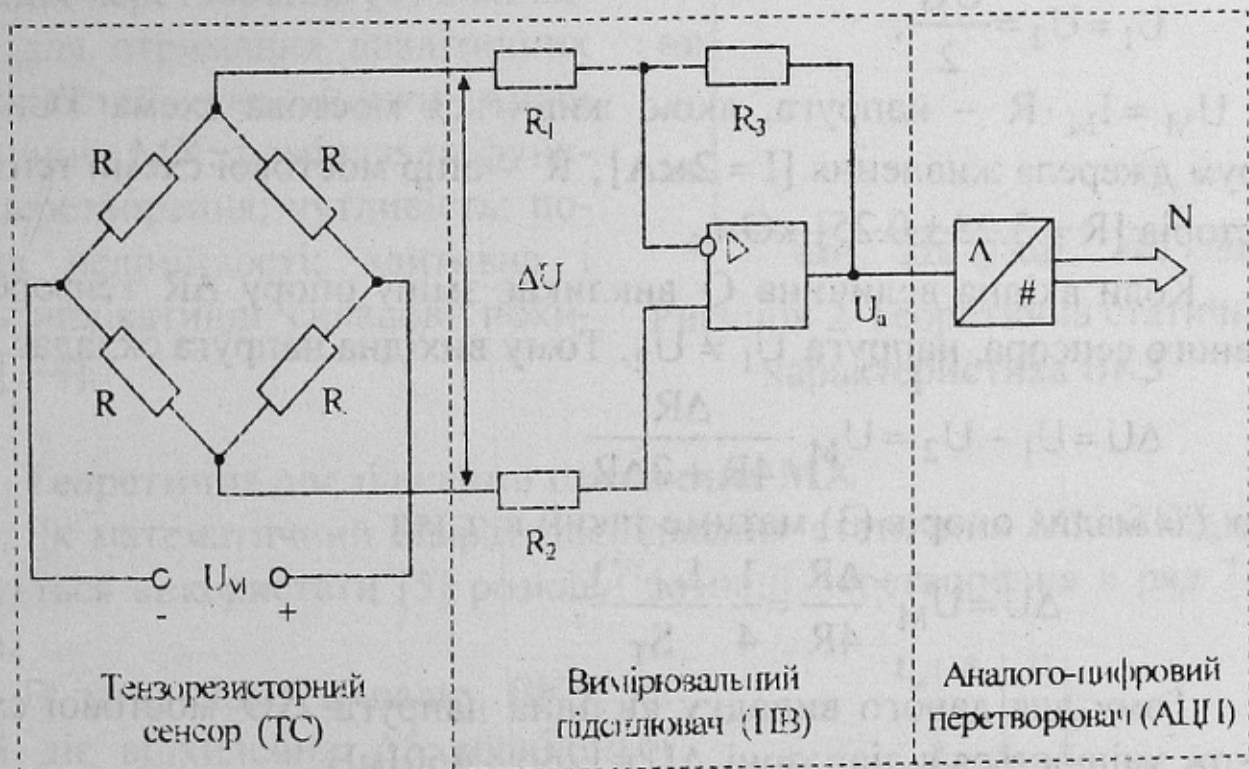


Рисунок 1- Структурна схема вимірювального каналу зусилля

Представлений ВКЗ є основою для побудови апаратних засобів для вимірювань зусилля, моменту (пускового, динамічного, електро-

магнітного, інерції), деформацій, тиску, витрат. Тип сенсора зусилля (тензорезистивний, ємнісний, індуктивний і т. ін.) визначає підходи до аналізу МХ таких засобів вимірювань.

В зв'язку з цим розглянемо методику визначення функції перетворення на прикладі ВКЗ з тензорезистивним сенсором (ТС).

Виведення функції перетворення

В основу принципу дії ТС покладено тензоефект у напівпровідниках. Чутливим елементом ТС є сапфірова мембрана з кремнієвими тензорезисторами R . Під дією інформативного параметра (зусилля Q) мембрана деформується, що в свою чергу викликає зміну опору ΔR мостової схеми тензорезисторів R (рисунок 1).

$$\Delta R = \frac{Q}{S_T}, \quad (1)$$

де S_T – чутливість тензорезистивного вимірювального перетворювача [Г/Ом].

Зміна опору викликає відповідну зміну вихідної напруги ΔU тензомоста. Якщо опори всіх плечей моста однакові, то напруги

$$U_1 = U_2 = \frac{U_M}{2}, \quad (2)$$

де $U_M = I_M \cdot R$ – напруга, якою живиться мостова схема ТС; I_M – струм джерела живлення [$I = 2 \text{ мА}$]; R – опір мостової схеми тензорезисторів [$R = 3.25 \pm 0.25$] кОм.

Коли вхідна величина Q викликає зміну опору ΔR тензорезистивного сенсора, напруга $U_1 \neq U_2$. Тому вихідна напруга складає

$$\Delta U = U_1 - U_2 = U_M \cdot \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} \quad (3)$$

або для малих опорів (3) матиме такий вигляд

$$\Delta U = U_M \cdot \frac{\Delta R}{4R} = \frac{1}{4} \cdot \frac{I_M \cdot Q}{S_T}. \quad (4)$$

Тому для даного випадку вихідна напруга ΔU мостової схеми також змінюється в діапазоні $\Delta U \in [260 \div 450] \text{ мВ}$.

Для підсилення малих різниць напруги на фоні синфазної завади, яка може бути більшою за величину ΔU , застосовують вимірювальний підсилювач. В даному випадку диференціальний вхідний си-

нал представляє вихідну напругу ΔU , що змінюється на виході ТС. Підсилений ПВ диференціальний вхідний сигнал

$$U_a = k \cdot \Delta U = \frac{1}{4} \cdot \frac{k \cdot I_M \cdot Q}{S_T}, \quad (5)$$

поступає на вхід АЦП, де перетворюється в бінарний код

$$N = \frac{k \cdot \Delta U \cdot 2^n}{U_0}, \quad (6)$$

де k – коефіцієнт підсилення вимірювального підсилювача; n – розрядність регістра послідовного наближення АЦП; U_0 – опорна напруга АЦП.

Тоді остаточно функція перетворення ВКЗ аналітично представиться у вигляді

$$N = \frac{1}{4} \cdot \frac{k \cdot I_M \cdot 2^n}{S_T \cdot U_0} \cdot Q. \quad (7)$$

Отримана статична характеристика (рисунок 2) лінійна, а функція перетворення (7) є вихідною для отримання аналітичних залежностей для оцінки таких статичних МХ: номінальна функція перетворення; чутливість; похибка нелінійності; адитивна і мультиплікативні складові похибок [2-4].

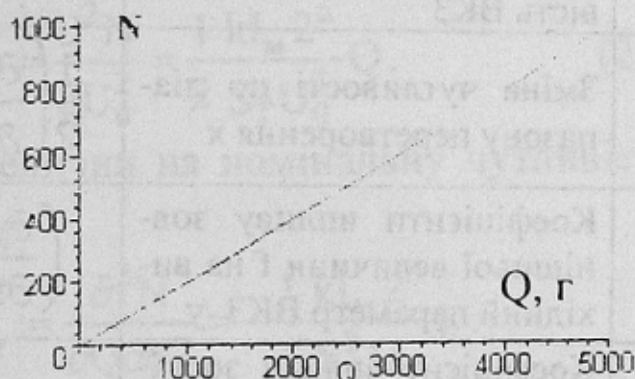


Рисунок 2-Теоретична статична характеристика ВКЗ

Теоретичне дослідження статичних МХ

Як математичний апарат дослідження статичних МХ ВКЗ пропонується використати [5] розклад функції перетворення в ряд Тейлора.

В загальному випадку ВКЗ, на який діє відхилення Δf зовнішньої величини f від її значення f_0 в нормальних умовах, описується аналітичною функцією перетворення (ФП)

$$y = y(x, \Delta f). \quad (8)$$

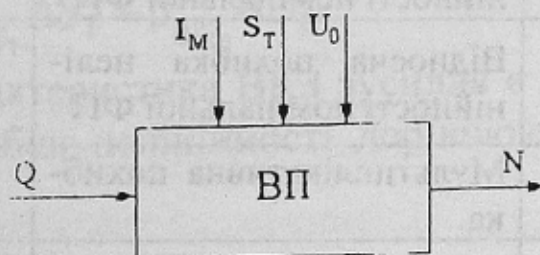


Рисунок 3- Узагальнена структурна схема ВКЗ

Аналітичні залежності для визначення основних статичних метрологічних характеристик із використанням [5] представлені в табл. 1.

В робочих умовах ВКЗ здійснює функціональне перетворення інформативного параметра Q у бінарний код N . Крім інформативного сигналу, на такий засіб вимірювання діють впливні величини $\bar{f} = (I_M, S_T, U_0)$, які мають зв'язок з вихідною величиною N і спричиняють виникнення неінформативних складових перетворення. В цьому випадку ВКЗ можна представити як на рисунку 3.

Таблиця 1- Аналітичні залежності для визначення основних статичних МХ

№	Найменування	Аналітична залежність	№ ф-ли
1.	Номінальний коефіцієнт перетворення або чутливість ВКЗ	$\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_0 = S_0$	(9)
2.	Зміна чутливості по діапазону перетворення x	$\frac{1}{2}\left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}\right)_0 = S'_0$ і $\frac{1}{6}\left(\frac{\partial^3 y}{\partial x^3}\right)_0 = S''_0$	(10)
3.	Коефіцієнти впливу зовнішньої величини f на вихідний параметр ВКЗ y	$\left(\frac{\partial y}{\partial f}\right)_0 = \beta_0$ і $\frac{1}{2}\left(\frac{\partial^2 y}{\partial f^2}\right)_0 = \beta'_0$	(11)
4.	Коефіцієнт впливу зовнішньої величини f на номінальну чутливість S_0 ВКЗ	$\left(\frac{\partial^2 x}{\partial x \partial f}\right)_0 = \alpha_0$	(12)
5.	Номінальна ФП	$y = S_0 x + S'_0 x^2 + S''_0 x^3 + \dots$	(13)
6.	Абсолютна похибка нелінійності номінальної ФП	$S'_0 x^2 + S''_0 x^3 = \Delta y_n$	(14)
7.	Відносна похибка нелінійності номінальної ФП	$\delta_n = \frac{\Delta y_n}{S_0 x} = \frac{S'_0}{S_0} x + \frac{S''_0}{S_0} x^2$	(15)
8.	Мультиплікативна похибка	$\alpha_0 x \Delta f = \Delta y_m$	(16)
9.	Адитивна похибка	$\beta_0 \Delta f + \beta'_0 \Delta f^2 = \Delta y_a$	(17)

Розкладемо в ряд Тейлора ФП (7) ВКЗ. Оскільки в даному випадку на процес перетворення впливає не одна зовнішня величина, а декілька, то доданки рівняння (9) будуть мати вигляд:

1) чутливість

$$S_Q = \frac{\partial N}{\partial Q} = \frac{1 k I_M 2^n}{4 S_T U_0}; \quad (18)$$

2) зміна чутливості по діапазону

$$S'_Q = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 N}{\partial Q^2} = 0, \quad S''_Q = \frac{1}{6} \frac{\partial^3 N}{\partial Q^3} = 0; \quad (19)$$

3) коефіцієнти впливу зовнішніх величин на вихідний параметр N:

$$\beta_{0I_M} = \frac{\partial N}{\partial I_M} = \frac{1 k 2^n}{4 S_T U_0} Q, \quad \beta'_{0I_M} = \frac{\partial^2 N}{\partial I_M^2} = 0; \quad (20)$$

$$\beta_{0S_T} = \frac{\partial N}{\partial S_T} = -\frac{1 k I_M 2^n}{4 S_T^2 U_0} Q, \quad \beta'_{0S_T} = \frac{\partial^2 N}{\partial S_T^2} = \frac{1 k I_M 2^n}{2 S_T^3 U_0} Q; \quad (21)$$

$$\beta_{0U_0} = \frac{\partial N}{\partial U_0} = -\frac{1 k I_M 2^n}{4 S_T U_0^2} Q, \quad \beta'_{0U_0} = \frac{\partial^2 N}{\partial U_0^2} = \frac{1 k I_M 2^n}{2 S_T U_0^3} Q. \quad (22)$$

4) коефіцієнти впливу зовнішніх величин на номінальну чутливість S_0 ВП:

$$\alpha_{0I_M} = \frac{\partial^2 N}{\partial Q \partial I_M} = \frac{1 k 2^n}{4 S_T U_0}; \quad \alpha_{0S_T} = \frac{\partial^2 N}{\partial Q \partial S_T} = -\frac{1 k I_M 2^n}{4 S_T^2 U_0};$$

$$\alpha_{0U_0} = \frac{\partial^2 N}{\partial Q \partial U_0} = -\frac{1 k I_M 2^n}{4 S_T U_0^2}. \quad (23)$$

Врахувавши наведені вище формули (18)-(23), номінальну функцію перетворення представимо у вигляді:

$$N = S_Q Q + \alpha_{0I_M} Q \Delta I_M + \alpha_{0S_T} Q \Delta S_T + \alpha_{0U_0} Q \Delta U_0 + \beta_{0I_M} \Delta I_M + \beta_{0S_T} \Delta S_T + \beta_{0U_0} \Delta U_0 + \beta'_{0I_M} \Delta I_M^2 + \beta'_{0S_T} \Delta S_T^2 + \beta'_{0U_0} \Delta U_0^2 \quad (24)$$

В зв'язку з тим, що статична характеристика ВКЗ зусилля є лінійною, то абсолютна і відносна похибки нелінійності дорівнюють нулю: $\Delta N_H = 0, \delta_H = 0$.

Тоді адитивна похибка матиме вигляд

$$\Delta N_a = \frac{1}{2} \frac{2^n k}{S_T U_0} Q \left[\frac{1}{2} \left(\Delta I_M - I_M \left(\frac{\Delta S_T}{S_T} + \frac{\Delta U_0}{U_0} \right) \right) + I_M \left(\frac{\Delta S_T^2}{S_T^2} + \frac{\Delta U_0^2}{U_0^2} \right) \right], \quad (25)$$

а мультиплікативну похибку ВКЗ представимо такою аналітичною залежністю

$$\Delta N_M = \frac{1}{4} \frac{2^n k}{S_T U_0} Q \left[\Delta I_M - I_M \left(\frac{\Delta S_T}{S_T} + \frac{\Delta U_0}{U_0} \right) \right]. \quad (26)$$

Результати моделювання адитивної і мультиплікативної складових похибок наведені на рисунку 4. Аналіз представлених результатів дозволяє дійти таких висновків.

Оскільки опорна напруга U_0 АЦП високостабільна, а чутливість S_T для конкретного типу тензорезистивного сенсора постійна (18), то на рисунку 4 представлені залежності адитивної ΔN_a похибки і муль-

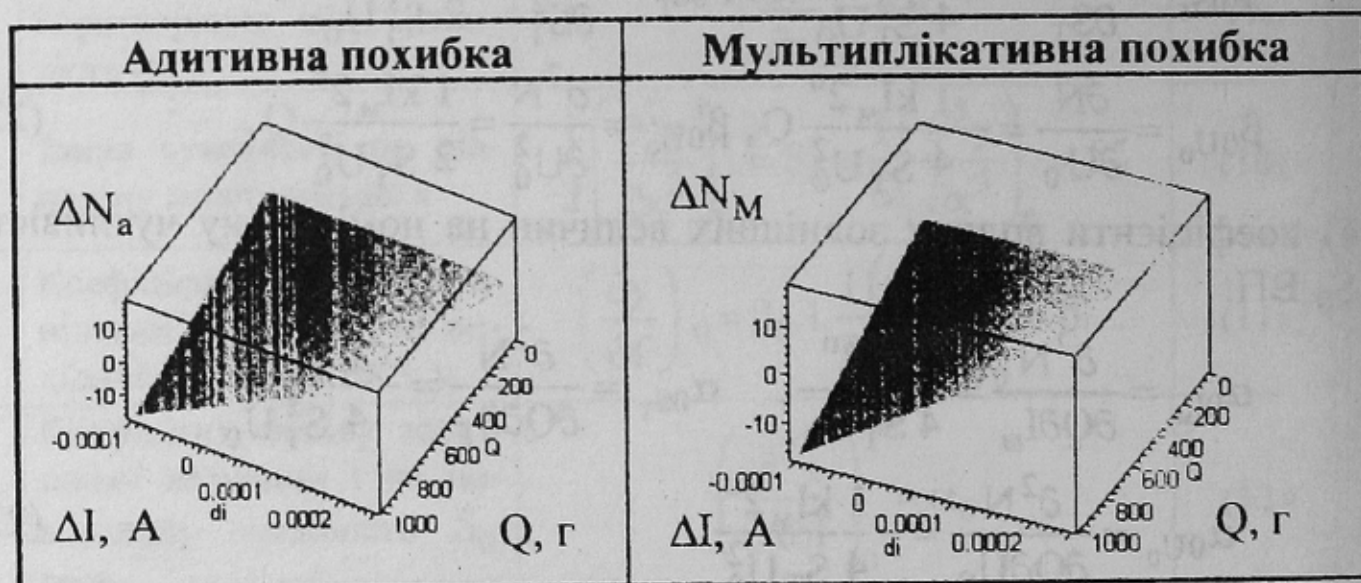


Рисунок 4- Результати моделювання адитивної і мультиплікативної складових похибки

типлікативної ΔN_M похибок тільки від дії однієї впливної величини ΔI_M в діапазоні зміни інформативного параметра Q .

Експериментальні дослідження

Для експериментального отримання основних статичних МХ ВКЗ здійснено 500 серій вимірювань зразкового зусилля Q , що задавалось за допомогою зразкових мір. Аналіз експериментальної статичної характеристики (рисунок 5) показує, що в результатах вимірювань присутні як адитивна, так і мультиплікативна похибки.

Для оцінки цих похибок в кожній із $n=500$ серій здійснено по 10 вимірювань зразкових значень зусилля в діапазоні від 0 до 1000 г. В результаті інтерполяції результатів вимірювань поліномом виду $\Delta_a + \Delta_M \cdot Q$ для кожної серії отримано $n=500$ значень адитивної (рисунок 6) і 500 значень мультиплікативної (рисунок 7) похибок ВКЗ.

Характер зміни даних похибок випадковий. Тому оцінено статистичні характеристики для даних похибок (таблиця 2).

Таблиця 2 - Статистичні характеристики похибок

Позначення	n	Q_{min}	Q_{max}	\bar{Q}	σ
Адитивна	500	-6.4000	5.9300	0.4134	1.6958
Мультиплікативна	500	0.9937	1.0047	0.9991	0.0019

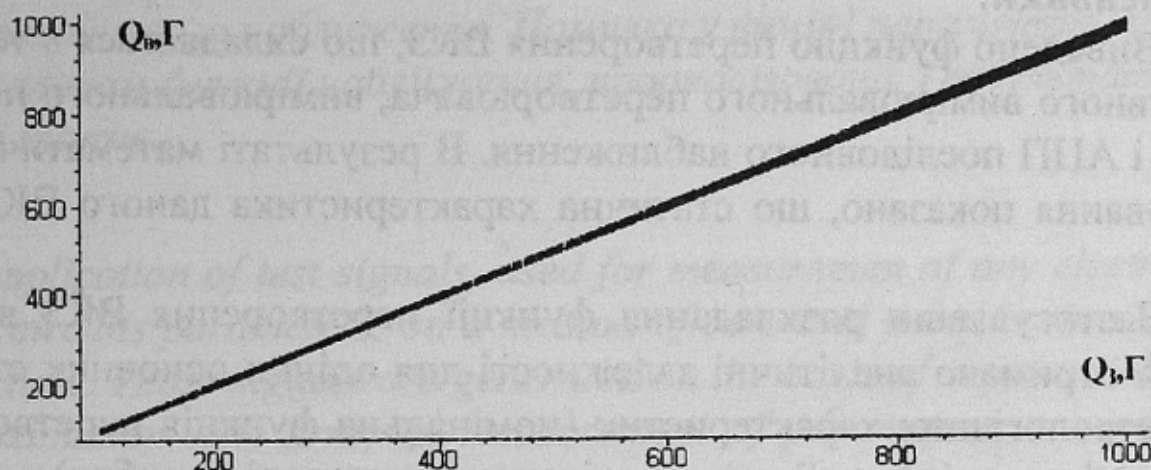


Рисунок 5 - Експериментальна статична характеристика ВКЗ

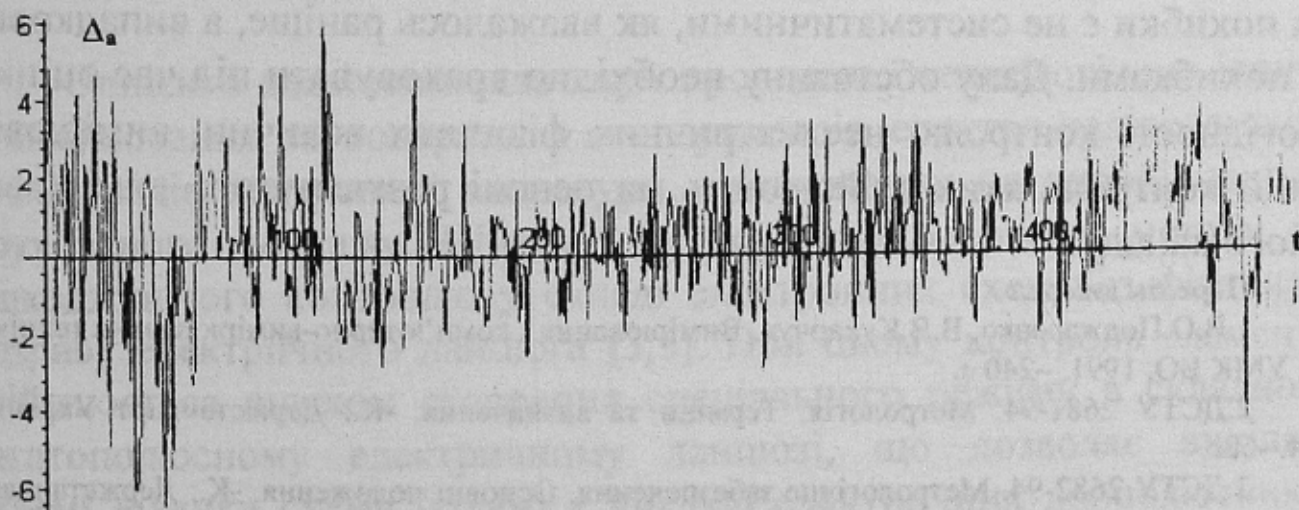


Рисунок 6 - Зміна адитивної похибки в часі

За даними статистичними характеристиками отримано закони розподілу адитивних і мультиплікативних похибок і показано, що вони є нормальними.

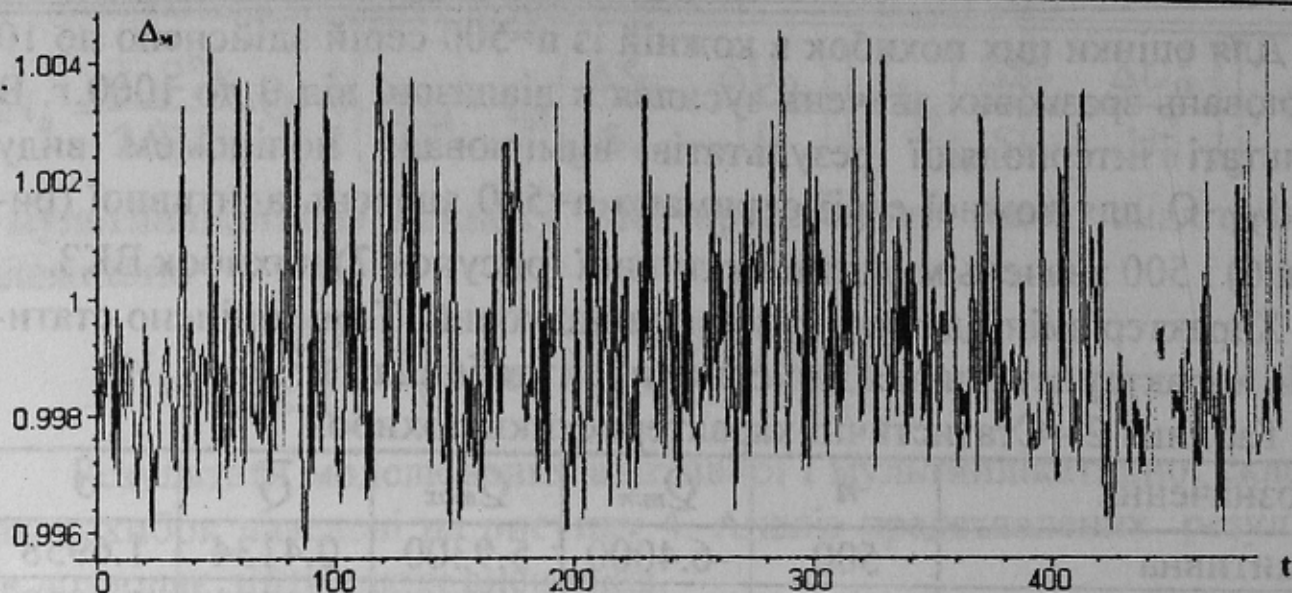


Рисунок 7-. Зміна мультиплікативної похибки в часі

Висновки:

1. Виведено функцію перетворення ВКЗ, що складається з тензорезистивного вимірювального перетворювача, вимірювального підсилювача і АЦП послідовного наближення. В результаті математичного моделювання показано, що статична характеристика даного ВКЗ лінійна.

2. Застосувавши розкладання функції перетворення ВКЗ в ряд Тейлора отримано аналітичні залежності для оцінки основних статичних метрологічних характеристик (номінальна функція перетворення, чутливість, адитивна і мультиплікативна складові похибок).

3. Експериментально встановлено, що адитивна і мультиплікативна похибки є не систематичними, як вважалось раніше, а випадковими похибками. Дану обставину необхідно враховувати під час оцінки вірогідності контролю неелектричних фізичних величин, вимірювальний контроль яких здійснюють на основі розглянутого вимірювального каналу.

Перелік джерел

1. В.О.Поджаренко, В.В.Кухарчук. Вимірювання і комп'ютерно-вимірювальна техніка. -К.: УМК ВО, 1991. -240 с.
2. ДСТУ 2681-94. Метрологія. Терміни та визначення. -К.: Держстандарт України, 1994. -68с.
3. ДСТУ 2682-94. Метрологічне забезпечення. Основні положення. -К.: Держстандарт України, 1994. -15с.
4. ДСТУ 3215-95. Метрологічна атестація засобів вимірювальної техніки. Організація та порядок проведення. -К.: Держстандарт України, 1995. -10с.
5. Воловик Г. С. Основы теории инвариантных измерений. -Севастополь: "Севпол", 1995 - 160 с.