

В. Д. Рудик, к. т. н., доц.; С. Ф. Гончар

КОМПЕНСАТОР НЕСТАЦІОНАРНИХ ЧАСОВИХ ПОХИБОК ШИРОКОСМУГОВИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ

Розглянуті питання підходу до визначення нестаціонарних часових похибок, досліджена природа їх виникнення, проведений аналіз похибок аналітичним методом із застосуванням моделі вимірювального каналу. Наведені математичні співвідношення, що можуть бути використані для визначення цих похибок, а також графіки, які наочно демонструють залежність таких похибок від різних значень параметрів каналу і сигналу. Розглянуто алгоритм обробки сигналів з метою компенсації нестаціонарної часової похибки в широкосмугових вимірювальних каналах та реалізація цього алгоритму в апаратному вигляді.

Ключові слова: нестаціонарна часова похибка (НЧП), широкосмуговий вимірювальний канал, компенсатор НЧП, алгоритм роботи компенсатора НЧП, структура компенсатора НЧП.

Вступ

Проблема покращення динамічних властивостей вимірювальних каналів набуває особливого значення при вимірах параметрів короткочасних сигналів, при дослідженні нестаціонарних процесів, при швидкій зміні досліджуваної величини. Оцінка динамічних властивостей вимірювальних каналів може бути проведена на основі дослідження їх АЧХ, ФЧХ або перехідних характеристик при входній дії ступінчатого чи гармонійного сигналів, а також шляхом визначення миттєвої різниці значення вхідного сигналу, розрахованого за вихідним сигналом вимірювального каналу, значенням номінальної статичної характеристики каналу і миттєвим значенням вхідного сигналу в даний момент часу [1]. Але таке дослідження не дозволяє оцінити динамічні похибки при вимірюванні фазових зсувів, часових інтервалів або групового часу затримки, які ґрунтуються на визначенні часових зсувів характерних точок сигналу, що відповідають його нульовим, максимальним або мінімальним значенням, і розробити на основі цього дослідження пристрої покращення динамічних властивостей таких вимірювальних каналів.

Метою роботи є розробка методів та засобів компенсації нестаціонарної часової похибки вимірювальних каналів з метою покращення їх динамічних властивостей.

1. Визначення нестаціонарної часової похибки

Для оцінки динамічних властивостей вищезгаданих вимірювальних каналів доцільним є дослідження реакції вимірювального каналу на одиничне гармонійне включення з подальшим визначенням зміщення часового положення характерних точок сигналу, в подальшому – абсолютної нестаціонарної часової похибки (АНЧП) [2].

Часове положення $t_{вих}$ характерних точок сигналу на виході вимірювального каналу при дії гармонійного включення визначається як сума таких складових:

$$t_{вих} = t_{ex} + \Delta t_{cm} + \Delta t_{nc}, \quad (1)$$

де t_{ex} – часове положення характерних точок вхідного сигналу; Δt_{cm} – стаціонарна складова часового зсуву, яка вноситься вимірювальним каналом у стаціонарному режимі; Δt_{nc} – АНЧП.

Нормована до періоду нестаціонарна часова похибка (ННЧП) буде визначатися з виразу:

$$\gamma = \frac{\Delta t_{nc}}{T_0}, \quad (2)$$

де T_0 – період сигналу гармонійного включення.

АНЧП визначається на підставі аналізу аргументу комплексно-значної функції $U_{вих}(t)$ відгуку вимірювального каналу на вхідне одиничне гармонійне діяння, зображення якої визначається з виразу:

$$U_{вих}(p) = K(p) \cdot U_{вх}(p), \quad (3)$$

де $K(p)$ – зображення передатної характеристики відповідного вимірювального каналу;

$U_{вх}(p) = U_m \cdot e^{j\varphi_0} / (p - j\omega_0)$ – зображення вхідного сигналу, U_m , ω_0 , φ_0 – відповідно амплітуда, частота та початкова фаза вхідного сигналу, p – оператор перетворення.

Для проведення необхідних досліджень може бути використана модель широкосмугового вимірювального каналу з передатною характеристикою:

$$K(p) = \frac{K_0}{1 + \tau \cdot p},$$

де K_0 – коефіцієнт передачі каналу при $\omega = 0$;

τ – стала часу каналу.

Після підстановки виразу для $U_{вх}(p)$ у співвідношення (3) отримаємо:

$$U_{вих}(p) = \frac{U_m \cdot e^{j\varphi_0} \cdot K(p)}{(p - j\omega_0)}. \quad (4)$$

Використовуючи теорему розкладання та враховуючи співвідношення $\Delta t = \frac{\Delta\varphi}{\omega_0}$, з (4)

отримаємо вираз АНЧП для описаного випадку

$$\Delta t_{nc} = \frac{1}{\omega_0} \left\{ \arctg \left[\frac{B - A + C}{E - D} \right] - \omega_0 t - \varphi_0 + \arctg[\omega_0 \tau] \right\}, \quad (5)$$

де A, B, C, D, E – коефіцієнти, що дорівнюють:

$$A = \omega_0 \tau \cos(\omega_0 t + \varphi_0);$$

$$B = \sin(\omega_0 t + \varphi_0);$$

$$C = e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot (\omega_0 \tau \cos \varphi_0 - \sin \varphi_0);$$

$$D = e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot (\cos \varphi_0 + \omega_0 \tau \sin \varphi_0);$$

$$E = \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \omega_0 \tau \sin(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Аналіз залежності ННЧП від часу показує (рис. 1), що ННЧП в момент часу $t = 0$ складає

$$\gamma_{t1}^0 = \frac{\Delta t_{nc1}^0}{T_0} = 0,125, \text{ в } t = T_0/4 \text{ складає } \gamma_{t1}^{ext} = \frac{\Delta t_{nc1}^{ext}}{T_0} = 0,034, \text{ а в момент часу } t = T_0/2$$

складає $\gamma_{t2}^0 = \frac{\Delta t_{nc2}^0}{T_0} = 0,018$ при початковій фазі вхідного сигналу $\varphi_0 = 0$, де Δt_{nc1}^0 , Δt_{nc2}^0 ,

Δt_{nc1}^{ext} – АНЧП відповідно в 1-й, 2-й точках перетину нульового рівня вхідного сигналу та в 1-й точці екстремуму (рис.1).

Дослідження проведено для випадку $\frac{f_e}{f_0} = 1$, де f_0 – частота вхідного сигналу, $f_e = \frac{1}{2\pi\tau}$ –

верхня частота смуги пропускання каналу (частота зрізу).

При зростанні t НЧП змінюється за згасальним коливальним законом. Похибка досягає максимуму в точках з нульовим значенням миттєвої амплітуди вхідного сигналу, тобто точках нуль-переходів і нульових значень, в точках близьких до екстремальних значень сигналу і залежить від початкової фази вхідного сигналу. Отримана залежність дозволяє визначити часове положення точок сигналу, де НЧП сягає допустимих значень.

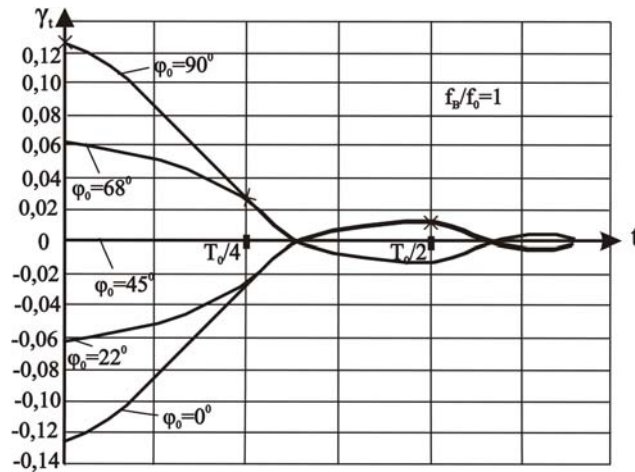


Рис. 1. Залежність НЧП від часу для широкопasmового вимірювального каналу

2. Компенсатор нестационарної часової похибки

Компенсація нестационарної часової похибки може бути здійснена введенням у вимірювальний канал компенсуючої ланки, що реалізує зворотний оператор вимірювального каналу $K^{-1}(p)$ в апаратному або програмному вигляді. При $K_0 = 1$ така передавальна функція у випадку широкопasmового вимірювального каналу буде мати вигляд:

$$K^{-1}(p) = 1 + p \cdot \tau,$$

що відповідає диференційному рівнянню

$$\tau \frac{dU_{\text{вих}}(t)}{dt} + U_{\text{вих}}(t) = U(t).$$

Для реалізації компенсатора нестационарної часової похибки (НЧП) широкопasmового вимірювального каналу в апаратному вигляді застосовується пристрій, зображений на рис. 2 [3].

Вузли компенсатора можуть бути як аналоговими, так і цифровими, залежно від виду сигналів $U_{\text{вих}}(t)$ і $U(t)$.

Підставивши у вираз (4) передатну функцію вимірювального каналу з компенсатором

$$K(p) = \frac{K_{01}}{1 + \tau_1 \cdot p} \cdot \frac{1 + \tau_2 \cdot p}{K_{02}},$$

де K_{01} , τ_1 – коефіцієнт передачі і стала часу вимірювального каналу;

K_{02} , τ_2 – коефіцієнт передачі і стала часу компенсатора,

отримаємо вираз АНЧП для вимірювального каналу з компенсатором:

$$\Delta t_{нсК} = \frac{1}{\omega_0} \left\{ \arctg \left[\frac{D_K + E_K - F_K}{A_K - B_K - C_K} \right] - \omega_0 t - \varphi_0 - \arctg \left[\frac{\omega_0 (\tau_2 - \tau_1)}{1 + \omega_0^2 \tau_1 \tau_2} \right] \right\}, \quad (6)$$

де $A_K, B_K, C_K, D_K, E_K, F_K$ – коефіцієнти, що дорівнюють:

$$A_K = (1 + \omega_0^2 \tau_1 \tau_2) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0);$$

$$B_K = \omega_0 (\tau_2 - \tau_1) \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi_0);$$

$$C_K = e^{-\frac{t}{\tau_1}} \cdot \left(1 - \frac{\tau_2}{\tau_1} \right) \cdot (\cos \varphi_0 + \omega_0 \tau_1 \sin \varphi_0);$$

$$D_K = (1 + \omega_0^2 \tau_1 \tau_2) \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi_0);$$

$$E_K = \omega_0 (\tau_2 - \tau_1) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0);$$

$$F_K = e^{-\frac{t}{\tau_1}} \cdot \left(1 - \frac{\tau_2}{\tau_1} \right) \cdot (\sin \varphi_0 - \omega_0 \tau_1 \cos \varphi_0)$$

де $\Delta t_{нсК}$ – визначається з виразу (6).

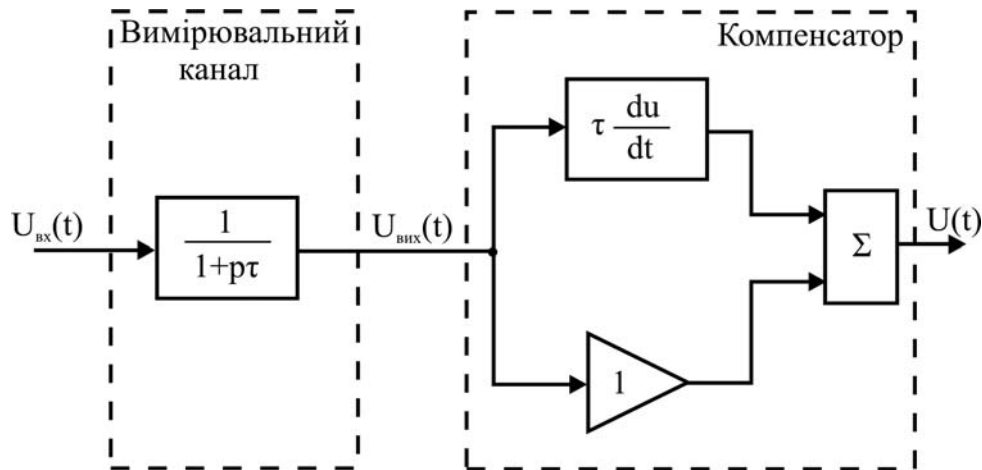


Рис. 2. Структура компенсатора НЧП

Аналіз залежності НЧП вимірювального каналу з компенсатором від співвідношення значень сталих часу вимірювального каналу τ_1 і компенсатора τ_2 (рис. 3) свідчить, що

НЧП не залежить від значень коефіцієнтів передачі. При $\frac{\tau_2}{\tau_1} = 1$ похибка дорівнює нулю.

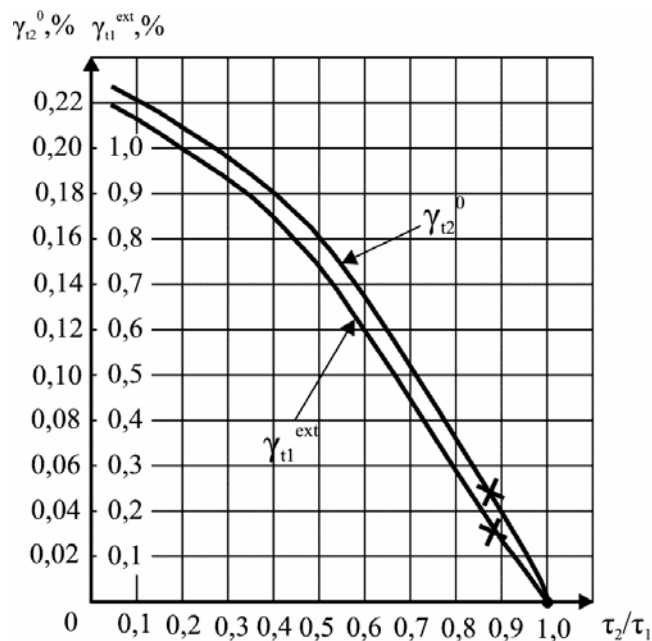


Рис. 3. Залежність ННЧП від співвідношення сталих часу вимірювального каналу та компенсатора

3. Результати експериментальних досліджень

На рис. 4 наведено загальну структурну схему установки для експериментальних досліджень АНЧП у вимірювальному каналі з компенсатором похибки.

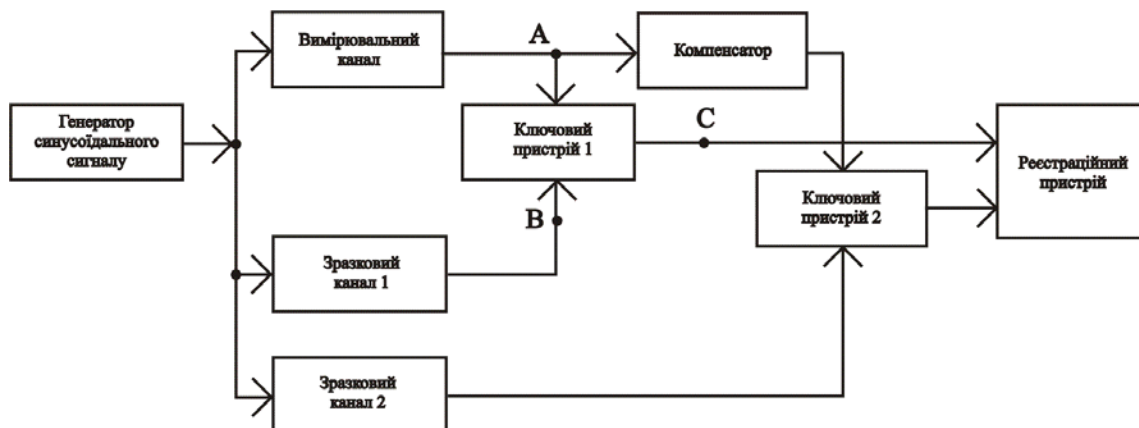


Рис. 4. Установа для дослідження дії компенсатора НЧП

Така установка складається з генератора синусоїдального сигналу; двох зразкових каналів, компенсатора, двох ключових пристроїв, які формують прямокутні імпульси в моменти переходу сигналів через нульові або екстремальні значення; реєструючого пристрою, яким може бути двопроменевий осцилограф.

Часовий зсув між сигналами визначається шляхом фіксації точок переходу вихідних сигналів каналів через встановлені рівні. На рис. 5 показано осцилограми сигналів на входах (точки А, В) першого ключового пристрою. На виході ключового пристрою (точка С) сигнал буде у вигляді послідовності імпульсів (рис. 6).

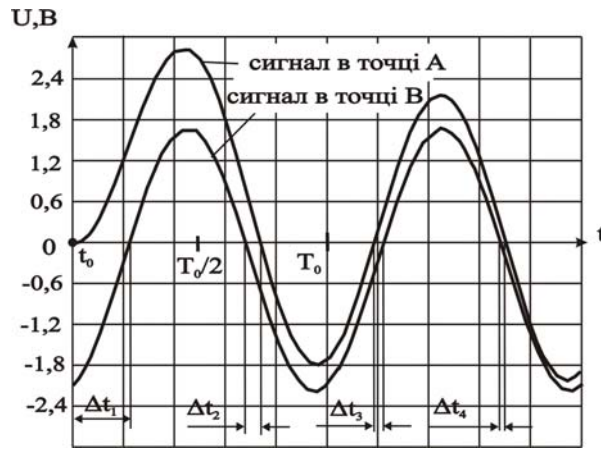


Рис. 5. Осцилограми сигналів на входах ключового пристрою

Тривалість сформованих імпульсів відповідає АНЧП сигналу, що пройшов через досліджуваний вимірювальний канал, відносно опорного безперервного сигналу у точках перетину сигналу нульового рівня та в точках перетину сигналу екстремальних значень.

Аналогічно формуються сигнали на входах та виході другого ключового пристрою. У цьому випадку тривалість сформованих імпульсів відповідає абсолютним значенням НЧП сигналу, що пройшов через досліджуваний вимірювальний канал з компенсатором.

Як вимірювальний канал було досліджено підсилювальний пристрій із частотою зрізу $f_g = 1$ МГц, який є елементом активної матриці з m -входів та n -виходів. Дослідження проведено для випадку $\frac{f_g}{f_0} = 1$ з початковою фазою $\varphi_0 = 0$.

Аналіз тривалості імпульсів на виході ключового пристрою (рис. 6) показує, що застосування компенсатора дозволяє зменшити вплив нестационарної часової похибки.

Виграш при цьому для похибки $\gamma_{t1}^0 = \frac{\Delta t_{nc1}^0}{T_0}$ складає 3,5 рази, для похибки $\gamma_{t1}^{ext} = \frac{\Delta t_{nc1}^{ext}}{T_0} - 22,6$

раз, а для похибки $\gamma_{t2}^0 = \frac{\Delta t_{nc2}^0}{T_0} - 36$ разів, при частоті вхідного сигналу $f_0 = 1$ МГц і початковій фазі $\varphi_0 = 0$.

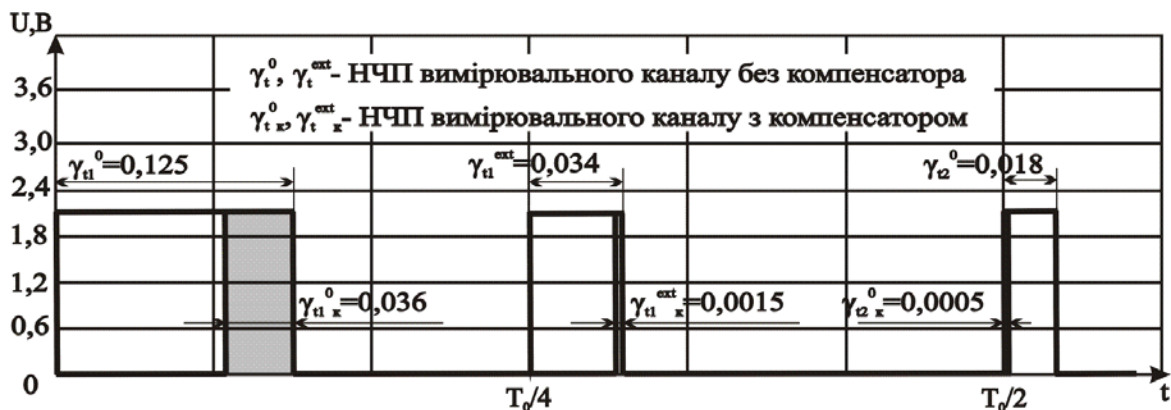


Рис. 6. Результати експериментальних досліджень

Порівняльний аналіз прогнозу дії компенсатора у вимірювальному каналі (рис. 4) з результатами експериментальних досліджень (рис. 6) показує практично збіг результатів

прогнозу та експерименту. Вплив паразитних ємностей, відхилення характеристик активних елементів та розкид параметрів пасивних елементів вимірювального каналу та компенсатора призводить до розбіжності сталих часу τ_1 і τ_2 . У розглянутому випадку відношення $\frac{\tau_2}{\tau_1}$ дорівнює 0,87 (рис. 3). Ретельніший підбір елементів та налаштування дозволить покращити отримані результати.

Висновки

Нормована нестационарна часова похибка в момент часу $t=0$ складає $\gamma_{t1}^0 = 0,125$, в $t = T_0 / 4$ складає $\gamma_{t1}^{ext} = 0,034$, а в момент часу $t = T_0 / 2$ складає $\gamma_{t2}^0 = 0,018$ при початковій фазі вхідного сигналу $\varphi_0 = 0$.

Застосування компенсатора НЧП дозволяє зменшити нестационарну часову похибку і покращити тим самим динамічні властивості вимірювального каналу. Виграш при цьому для похибки γ_{t1}^0 складає 3,5 рази, для похибки γ_{t1}^{ext} – 22,6 разів, для похибки γ_{t2}^0 – 36 разів при частоті вхідного сигналу $f_0 = 1$ МГц і початковій фазі сигналу $\varphi_0 = 0$.

Ретельніший підбір елементів компенсатора та налаштування дозволить покращити отримані результати.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы. – Киев.: Вища школа, 1980. – 560 с.
2. Рудик В.Д., Гончар С.Ф. Нестационарні похибки вимірювачів часових зсувів // Вісник ВПІ. – 2005. – № 5. – С. 143 – 148.
3. Фазометр: Деклараційний патент на корисну модель № 17394. Україна, G 01 R 25/00 / В.Д. Рудик, С.Ф. Гончар. – Бюл. № 9, 15.09.2006.

Рудик Вадим Данилович – доцент кафедри радіотехніки,

Гончар Сергій Феодосійович – здобувач кафедри телекомунікаційні системи та телебачення.
Вінницький національний технічний університет