

ОЦІНЮВАННЯ ВИПАДКОВОЇ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ЧАСОВОГО ІНТЕРВАЛУ

В.Д. Погребенник, М.І. Паламар,
Р.В. Політило*

Національний університет
«Львівська політехніка»

вул. С.Бандери, 790013, м.Львів, Україна,
E-mail: vpoohreb@gmail.com
E-mail: polirom@gmail.com

*Тернопільський національний
Технічний університет ім. І. Пулюя
вул. Руська, 56, м. Тернопіль, Україна
E-mail: palamar.m.i@gmail.com

*Виконано аналіз випадкової похибки
вимірювання часових параметрів імпульсних
сигналів та дано рекомендації
щодо її мінімізації.*

Вступ. Вимірювання часових параметрів сигналів широко використовують у вимірювальній техніці для отримання інформації про різні фізичні величини, зокрема, в радіо- та гідролокації, при визначенні напрямку і швидкості потоків та течій, концентрації розчинів, у неруйнівному контролі, фізичному експерименті та наукових дослідженнях.

Методи вимірювання часових інтервалів. Найпоширенішим є метод послідовного підрахунку [1], суть якого полягає у виділенні моментів початку і кінця часового зсуву τ_x і в квантуванні тривалості часового інтервалу τ'_x еталонною тривалістю, рівною періоду зразкової частоти T_{ob} , з одночасним кодуванням для подання результату вимірювання у заданій системі числення. Його недоліком є недостатня завадостійкість.

Один із можливих шляхів підвищення завадостійкості вимірювань полягає у покращенні відношення сигнал/завада з допомогою фільтрації досліджуваного сигналу, що передбачає встановлення різних фільтрів перед формувальним пороговим пристроєм. Застосовують вибіркові резонансні фільтри [2], частота налагодження яких автоматично змінюється залежно від параметрів інформаційного сигналу.

Однак такий метод бажано використовувати для випадку періодичних вхідних сигналів. При вимірюванні часових параметрів поодиноких імпульсів він практично неприйнятний.

Інший шлях підвищення завадостійкості – усереднення отриманих послідовно в часі результатів вимірювання окремих часових сигналів.

Тоді середньоквадратичне значення похибки зменшується в \sqrt{n} разів, якщо коефіцієнтами кореляції похибок окремих вимірювань можна захтувати. Цей метод має обмеження, оскільки збільшується час вимірювання, прийнятний тільки для періодичними сигналів і зростає динамічна похибка.

Достатньо ефективним є метод паралельного усереднення, оснований на паралельному визначення тривалості часових інтервалів на n рівнях інформаційного сигналу і використанні як кінцевого результату середнього із n проміжних результатів [2]. Але його реалізація значно утруднена під час вимірювання малих часових зсувів між сигналами з кругими фронтами.

Методи вимірювання часових зсувів, що ґрунтуються на розширенні часових інтервалів [3 – 6], дозволяють зменшити відносну похибку квантування, однак мають низьку завадозахищеність.

Відомі методи вимірювання часових параметрів сигналів [1 – 6], зокрема, послідовного підрахунку, паралельного і послідовного усереднення мають низькі точність і завадостійкість. Для їх підвищення запропоновано нові методи [7 – 10], що використовують інтегрування сигналів, які задають часові зсуви. При цьому враховують не кілька точок на фронтах сигналів, як у відомих методах усереднення, а цілі ділянки (фронти) інформаційних сигналів.

Подальше підвищення точності перетворення часового зсуву досягається так. Другий нормований сигнал затримують на час, який не перевищує тривалості плоскої вершини первого сигналу і інтервалу часу між сигналами. Наприклад, отриману в результаті інтегрування різниці первого і другого сигналів, перетворюють в інтервал часу і з отриманого значення інтервалу обчислюють інтервал, який дорівнює затримці другого сигналу.

Збільшення часу інтегрування внаслідок затримки між сигналами дає змогу значно підвищити завадостійкість і точність вимірювання часових параметрів імпульсних сигналів.

Мета роботи – оцінювання випадкової похиби вимірювання часового інтервалу.

Аналіз випадкової похиби. Встановивши взаємоз'язок дисперсії вихідного сигналу пристрою з його параметрами і характеристиками шумового процесу, можна сформулювати вимоги до допустимого відношення сигнал/шум на вході вимірювального перетворювача, а відповідно, визначити найменше значення вимірюваного параметру, під час вимірювання якого не буде перевищено задану похибку.

У праці [10] отримано вирази для випадкової похиби вимірювання часових зсувів для методів послідовного підрахунку та інтегрування, які охарактеризовано середньоквадратичним відхиленням вихідного сигналу.

Для стаціонарних і ергодичних процесів $\eta_1(t)$ і $\eta_2(t)$ інформативні параметри вхідних сигналів аналізованого пристрою можна подати у вигляді суміші корисних параметрів $\bar{U}_1(t)$ і $\bar{U}_2(t - \tau_x)$ з шумовими процесами $\eta_1(t)$ і $\eta_2(t)$

$$U_1(t) = \bar{U}_1(t) + \eta_1(t); \\ U_2(t) = \bar{U}_2(t - \tau_x) + \eta_2(t). \quad (1)$$

Середньоквадратичну похибку σ_τ вимірювального перетворювача пов'язано з середньоквадратичним значенням завад на входах ВЧЗ σ_{η_1} і σ_{η_2} формулою

$$\sigma_\tau = \frac{U_0}{|U_{on}|} \cdot \sqrt{\tau_0 t_0 (\sigma_{\eta_1}^2 + \sigma_{\eta_2}^2 + 2r\sigma_{\eta_1}\sigma_{\eta_2})}, \quad (2)$$

де r – коефіцієнт кореляції; U_0 – амплітуда сигналу; $|U_{on}|$ – опорна напруга; τ_0 – інтервал кореляції завади; t_0 – час інтегрування.

Якщо характеристики флюктуаційних завад випадкових процесів $\eta_1(t)$ і $\eta_2(t)$

однакові, то $\sigma_{\eta_1} = \sigma_{\eta_2} = \sigma_\eta$ і вираз (2) набуде вигляду

$$\sigma_\tau = \frac{\sqrt{2}\sigma_\eta}{|U_{on}|} \cdot \sqrt{\tau_0 t_0 (1+r)}. \quad (3)$$

Для трапецоїдних сигналів крутизна фронтів визначається залежністю

$$\gamma = \frac{U_0}{t_f} \quad \text{i} \quad t_0 = t_f + t_x, \quad (4)$$

Підставляючи формулу (2) в (1), знаходимо:

$$\sigma_\tau = \frac{\sqrt{2}\sigma_\eta}{\gamma} \cdot \frac{\sqrt{\tau_0 (1+r)(t_f + t_x)}}{t_f}. \quad (5)$$

Розглянемо два найпоширеніших випадки: $r=1$ і $r=0$. У першому середньоквадратична похибка вимірювального перетворювача визначається за допомогою залежності

$$\sigma_\tau = \frac{2\sigma_\eta}{\gamma} \cdot \frac{\sqrt{\tau_0 / t_f (1 + t_x / t_f)}}{t_f}, \quad (6)$$

а при $r=0$ отримаємо

$$\sigma_\tau = \frac{\sqrt{2}\sigma_\eta}{\gamma} \cdot \sqrt{\frac{\tau_0}{t_f} \left(1 + \frac{t_x}{t_f}\right)}. \quad (7)$$

При вимірюванні часових зсувів за методом послідовного підрахунку середньоквадратичне значення похибки

$$\sigma_{\tau_0} = \frac{\sqrt{2}\sigma_\eta}{\gamma}. \quad (8)$$

Порівняно з часом інтегрування випадкові процеси $\eta_1(t)$ і $\eta_2(t)$ достатньо високочастотні, інтервал їх кореляції τ_0 набагато менший часу t .

Відповідно, випадкова похибка методу інтегрування зменшується в

$K = \frac{t_f}{\sqrt{\tau_0 (t_f + t_x)}}$ разів порівняно з методом послідовного підрахунку.

Вираз (7) для коротких часових зсувів має вигляд

$$\sigma_{\tau_0} = \frac{\sqrt{2}\sigma_\eta}{\gamma} \cdot \sqrt{\frac{\tau_0}{t_f}}. \quad (9)$$

Досліджено випадкову похибку пристрою для вимірювання часових зсувів.

На рис. 1 подано графік залежностей параметра K за різних відношень часового

зсуву до тривалості фронту сигналу τ_x/t_f у діапазоні $\tau_x/t_f = 10^{-1} - 1$ за різних відношень коефіцієнтів кореляції до тривалості фронту сигналу τ_0/t_f від 10^{-3} до 10^2 .

На рис. 2 подано графік залежностей параметра K за різних відношень часового зсуву до тривалості фронту сигналу τ_x/t_f у діапазоні $\tau_x/t_f = 10^{-2} - 10^{-1}$ за різних відношень коефіцієнтів кореляції до тривалості фронту сигналу τ_0/t_f від 10^{-3} до 10^2 .

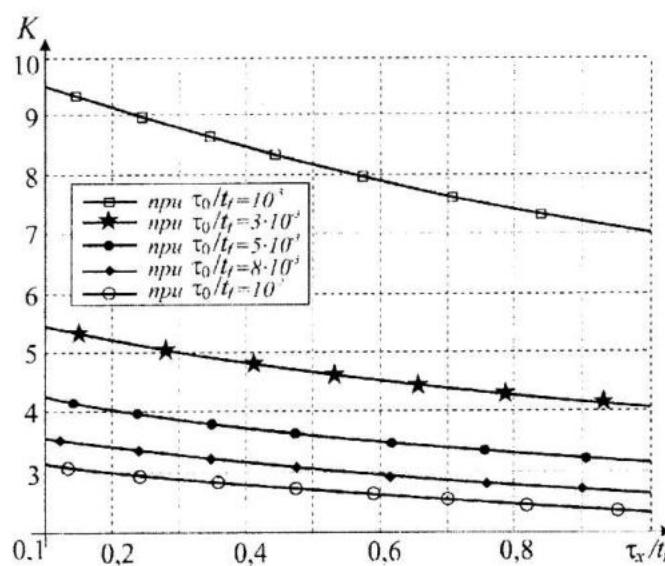


Рис. 1. Залежність коефіцієнта K від відношення часового зсуву до тривалості фронту сигналу τ_x/t_f за різних відношень коефіцієнтів кореляції до тривалості фронту сигналу τ_0/t_f

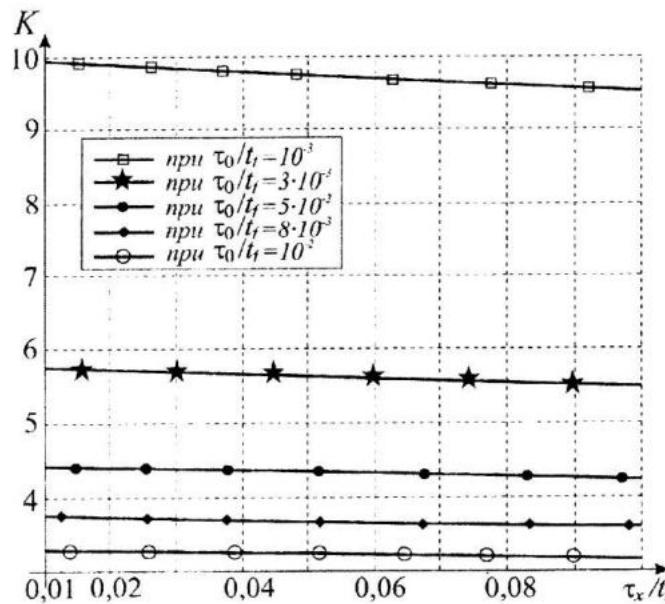


Рис. 2. Залежність коефіцієнта K від відношення часового зсуву до тривалості фронту сигналу τ_x/t_f за різних відношень коефіцієнтів кореляції до тривалості фронту сигналу τ_0/t_f

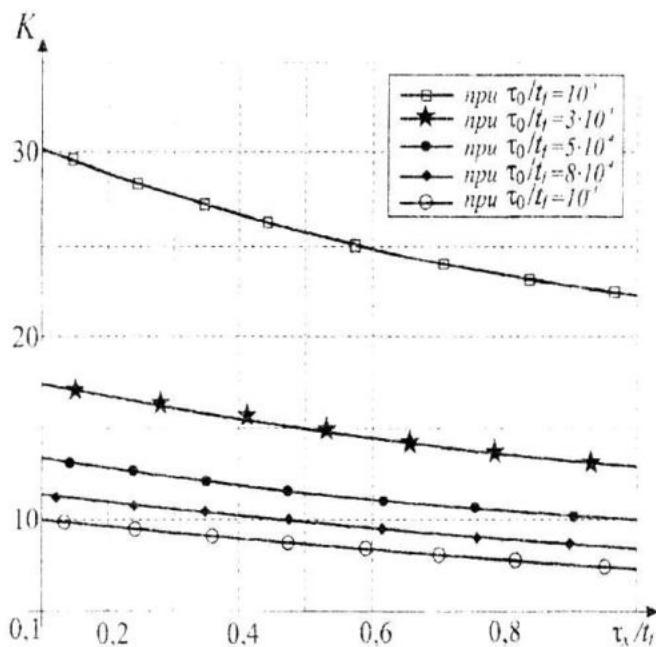


Рис. 3. Залежність коефіцієнта K від відношення часового зсуву до тривалості фронту сигналу $\tau_x/t_f = 10^{-1} - 1$ за різних відношень коефіцієнтів кореляції до тривалості фронту сигналу $\tau_0/t_f = 10^{-4} - 10^{-3}$

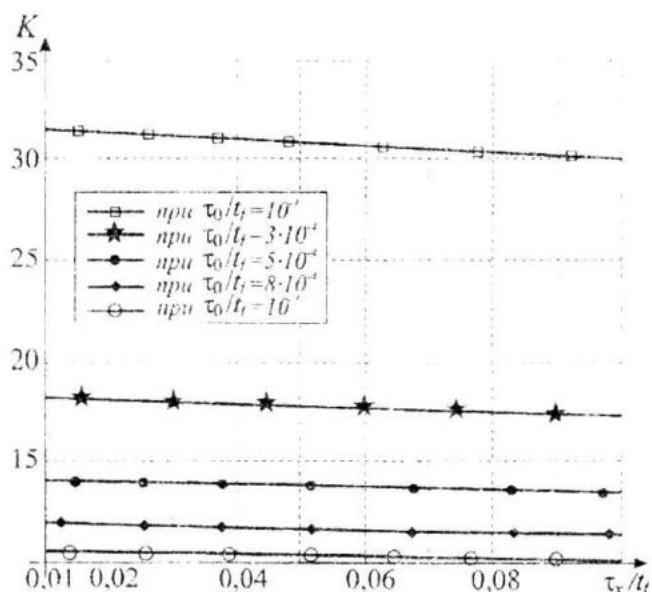


Рис. 4. Залежність коефіцієнта K від відношення часового зсуву до тривалості фронту сигналу $\tau_x/t_f = 10^{-2} - 10^{-1}$ за різних вільночленів коефіцієнтів кореляції до тривалості фронту сигналу $\tau_0/t_f = 10^{-4} - 10^{-3}$

Як бачимо з рис. 1, виграні у завадо-стійкості методу інтегрування у порівнянні з методом послідовного підрахунку (тобто коефіцієнт K) збільшується майже у 3 рази при змененні відношення коефіцієнта кореляції до тривалості фронту сигналу τ_0/t_f від 10^{-3} до 10^{-2} і досягає значення 9,5. При зростанні відношення часового зсуву до

тривалості фронту сигналу τ_x/t_f у діапазоні $\tau_x/t_f = 10^{-1} - 1$ коефіцієнт K зменшується приблизно на третину. При зменшенні відношення часового зсуву до тривалості фронту сигналу τ_x/t_f у діапазоні $\tau_x/t_f = 10^{-2} - 10^{-1}$ коефіцієнт K зростає майже у 10 разів (досягає значення 10) при відношенні коефіцієнта кореляції до тривалості фронту си-

гналу τ_0/t_f від 10^{-3} до 10^{-2} . При відношенні часового зсуву до тривалості фронту сигналу τ_x/t_f у діапазоні $\tau_x/t_f = 10^{-2} - 10^{-1}$ коефіцієнт K майже не змінюється.

На рис. 3 і 4 подано графіки залежностей параметра K за різних відношень часового зсуву до тривалості фронту сигналу τ_x/t_f у діапазоні $10^{-1} - 1$ (рис. 3), $10^{-2} - 10^{-1}$ (рис. 4), за різних відношень коефіцієнтів кореляції до тривалості фронту сигналу τ_0/t_f у діапазоні $10^{-4} - 10^{-3}$.

Як видно з графіків, коефіцієнт K також збільшується при зменшенні відношення коефіцієнта кореляції до тривалості фронту сигналу τ_0/t_f від 10^{-4} до 10^{-3} і досягає значення 30. Коефіцієнт K зменшується також на третину при зменшенні відношення часового зсуву до тривалості фронту сигналу τ_x/t_f у діапазоні $10^{-1} - 1$ (рис. 3).

При зменшенні відношення часового зсуву до тривалості фронту сигналу τ_x/t_f у діапазоні $\tau_x/t_f = 10^{-2} - 10^{-1}$ коефіцієнт K зростає майже у 10 разів (досягає значення 31,5) при відношенні коефіцієнта кореляції до тривалості фронту сигналу τ_0/t_f від 10^{-4} до 10^{-3} (рис. 4). При відношенні часового зсуву до тривалості фронту сигналу τ_x/t_f у діапазоні $\tau_x/t_f = 10^{-2} - 10^{-1}$ коефіцієнт K майже не змінюється.

Отже, інтегруальні часові вимірювальні перетворювачі доцільно використовувати при пологих фронтах інформаційних сигналів, а при крутих – слід надати перевагу перетворювачам, які реалізують метод послідовного підрахунку.

Для підвищення завадостійкості часових інтегрувальних вимірювальних перетворювачів тобто для отримання коефіцієнта K у межах від 10 до 30 потрібно вибирати їх параметри з огляду на такі рекомендації:

1) відношення коефіцієнта кореляції до тривалості фронту сигналу τ_0/t_f слід вибирати у діапазоні від 10^{-4} до 10^{-3} ;

2) значення відношення часового зсуву до тривалості фронту сигналу τ_x/t_f слід вибирати у діапазоні $\tau_x/t_f = 10^{-2} - 10^{-1}$.

Висновки. Виконано аналіз випадкової похибки вимірювання часових параметрів імпульсних сигналів та дано рекомендації щодо її мінімізації: коефіцієнт кореляції слід вибирати на три-чотири порядки меншим за тривалість фронту сигналу, а часовий зсув має бути на один-два

порядки меншим за тривалість фронту сигналу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мирский Г.Я. Измерение временных интервалов // Г.Я. Мирский. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 72 с.
2. Кирианаки Н.В. Цифровые измерения частотно-временных параметров сигналов // Н.В. Кирианаки, Р.М. Гайдучок. – Львов: Изд-во при Львов. гос. ун-те, изд. об'єд. "Выща школа", 1978. – 167 с.
3. Ермолов Р.С. Цифровые частотомеры // Р.С. Ермолов. – Л.: Энергия, 1973. – 153 с.
4. Ратхор Т.С. Цифровые измерения. Методы и схемотехника. – Москва, Техносфера, 2004. – 376 с.
5. А.с. № 508774 (СССР). Устройство для расширения временных интервалов / Коровин Р.В. – Опубл. в Б.И., 1976, № 12.
6. Денновецкий С.В. Наносекундная хронометрия // С.В. Денновецкий, С.М. Кокошкин, А.Н. Шкуро. Под. ред. В.П. Сигорского. – К.: Техніка, 1991. – 198 с.
7. А.с. № 970305 (СССР), МКИ³ G01F 10/04. Способ преобразования временного сдвига между двумя сигналами и устройство для его осуществления / Р.М. Гайдучок, В.Д. Погребенник. – Опубл. 30.10.1982. Бюл. № 40.
8. Нат. України № 11443, МКВ G01F 10/04. Способ вимірювання часового зсуву між двома сигналами та пристрій для його реалізації / В.Д. Погребенник, П.М. Сопрунюк. – Опубл. 25.12.1996. Бюл. № 4.
9. Погребенник В.Д. Метод підвищення точності та завадостійкості вимірювання часових зсувів між двома ультразвуковими сигналами / В.Д. Погребенник, Р. В. Політило // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН України, 2010. – Вып. 13. – С. 85 – 90.
10. Погребенник В.Д. Завадостійкі методи і засоби вимірювання часових параметрів імпульсних сигналів // Відбір та обробка інформації. – Львів, 2001. – № 15. – С. 132 – 141.