

ЦИФРОВИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ЗСУВУ ФАЗ

© Іванців Р.Д., Марікуца У.Б., 2005

Розглянуто прилади, які використовують для вимірювання зсуву фаз. Визначено похибку вимірювання зсуву фаз величиною 3° для частоти 30 кГц при величині частоти квантування 100 мГц; запропонована структурна схема фазометра з помножувачем частоти на 36 та обчислено похибку вимірювання зсуву фаз величиною 3° для частоти 30 кГц з допомогою такого фазометра.

The devices used for measuring the phase shift have been reviewed. The measurement fault of the phase shift with the value 3° for the frequency 30 kHz at the quantization frequency value 100 mHz has been defined. The structural scheme of the phase meter with frequency multiplier for 36 has been suggested. Calculated phase shift measurement fault for 3 degrees value at 30 kHz.

Постановка проблеми та її актуальність. Зсув фази між двома гармонічними сигналами є важливим інформаційним параметром. Від точності визначення цього параметра залежить багато вихідних параметрів радіоелектронних пристроїв і систем.

Для визначення зсуву фази використовують аналогові і цифрові вимірювальні прилади. В роботі [1] розглянуто аналогові вимірювальні прилади для визначення фазового зсуву – фазові детектори. А також розглянуто фазові детектори, які найчастіше застосовують, розглянуто їхні похибки методу, і похибки, які можна реалізувати, використовуючи сучасну елементну базу. В роботах [1, 2] описано метод фазового детектування, в якому відсутня похибка методу за доволі високої швидкодії. Інформаційний сигнал виділяється за один період вимірювального сигналу. Для аналогових методів детектування це доволі висока швидкодія.

В роботі [3] описані цифрові методи вимірювання зсуву фаз, які вимірюють миттєве значення, середнє значення зсувів фаз за n періодів вимірювального сигналу. В цій роботі описана схема з мікропроцесором.

Всі розглянуті вище методи і прилади для оцінки зсуву фаз мають певні недоліки: велика залежність похибки від нестабільності амплітуди інформаційних сигналів, невелика швидкодія, апаратна складність при реалізації тощо. Ці наукові дослідження призначені для створення вбудованих систем аналізу. У вимірювальній частині вбудованих систем планується використовувати двоканальні фазовимірювальні системи, які мають багато переваг. Це великий динамічний діапазон вхідних інформаційних сигналів, достатньо висока точність і швидкодія. Велике значення мають також такі параметри, як можливість мікромініатюризації, ефективне комплексування вимірювальних елементів у вбудованих системах. У зв'язку з вищевикладеним розглянуті проблеми актуальні.

Зв'язок висвітленої проблеми із науковими завданнями. Наукові дослідження, розроблення, нових конфігурацій вбудованих систем аналізу для використання їх в народному господарстві виконується згідно з планом наукових робіт, які виконує кафедра САПР НУ “Львівська політехніка”, а саме:

1. Планом робіт з теми №5821–91 “Дослідження ознакового простору характеристик напівпровідникових інтегральних схем для задач контролю, аналізу і діагностики процесу виробництва”, реєстраційний номер 0193V040268, замовник – Концерн “Родон”, м. Івано-Франківськ.

2. Програмою виконання Міжнародного європейського проекту REASON – Research and Training Action for System On Chip Design (#IST-2000-30193), співвиконавцями якого є науковий колектив кафедри “Системи автоматизованого проектування”, термін виконання з 1 січня 2002 р. по 31 грудня 2004 р.

Аналіз досліджень. Відомі методи і прилади для оцінки зсуву фаз розроблені переважно для універсального застосування. Найчастіше у відомих методах не виділяють всі недоліки, які можуть негативно впливати на результати роботи вбудованих аналізуючих систем.

Виділення невирішених частин проблеми. Основними невирішеними частинами проблеми фазовимірювальної техніки є залежність результату вимірювань від нестабільності амплітуди інформаційних сигналів, невелика швидкодія, апаратна складність при реалізації, складність мікромініатюризації, невирішені проблеми комплексування в складі вбудованих аналізуючих систем.

Постановка задачі. Основна задача виконуваних досліджень – це дослідження відомих методів оцінки зсуву фаз і їхнє вдосконалення для можливості їхнього ефективного використання у вбудованих аналізуючих системах. Важливими параметрами є можливість мікромініатюризації і комплексування в складі вбудованих систем. Важливим показником для фазовимірювальної системи є такий показник, як досягнення високої точності за рахунок багатократного масштабування залишкового інтервалу і оцінка його без додаткових апаратних витрат.

Основний матеріал. В цифрових фазометрах вимірюється інтервал часу між двома подіями – переходом напруги опорного і вимірювального сигналів через нульовий рівень. Кількість імпульсів сигналу квантування f_0 буде такою

$$N = t_x : t_0 = t_x \cdot f_0,$$

де t_x – інтервал часу (зсув фази), с; f_0 – частота квантування, Гц.

Для вираження зсуву фаз в градусах треба зробити таке перетворення

$$\varphi = \frac{t_x \cdot 360^\circ}{T} = \frac{N \cdot 360}{f_0 \cdot T},$$

де T – період частоти сигналу, для якого визначаємо зсув фаз.

З вищевикладеного очевидно, що для вираження зсуву фаз в градусах необхідно вимірювати також T . Виміряти T нескладно, але і непросто за допомогою вимірювальних засобів виконати дію ділення. В одному з цифрових фазометрів для реалізації дії ділення застосовується мікропроцесор [3].

Розглянемо похибки, які мають цифрові фазометри, що базуються на вимірюванні інтервалів часу методом квантування зразковою частотою f_0 . Похибка визначення інтервалу таким способом становить

$$\delta_1 = \delta_{f_0} \pm 1,$$

де δ_{f_0} – похибка, яка характеризує відхилення частоти f_0 від її розрахункового значення; ± 1 –

одиниця дискретності, її величина $\Delta t = \frac{1}{f_0}$.

Визначимо похибку вимірювання зсуву фаз величиною 3° для частоти 30кГц, якщо частота квантування 100 мГц. Стабільність частоти зразкового генератора становить $\delta_0 = 10^{-6}$ або $\delta_0 = 10^{-4} \%$.

В нашому випадку треба виміряти два інтервали Δt_1 – пропорційний до $\Delta \varphi$, Δt_2 – дорівнює періоду вимірювального сигналу

$$\Delta t_1 = \frac{1}{f_b} \cdot \Delta \varphi = \frac{33,33 \cdot 10^{-6} \cdot 3}{360} = 0,27775 \text{ мкс} = 278 \text{ нс.}$$

$$\Delta t_2 = \frac{1}{f_b} = \frac{1}{30 \cdot 10^3} = 33,33 \cdot 10^{-6} \text{ с} = 33,33 \text{ мкс.}$$

При вимірюванні обох інтервалів, при квантуванні їх сигналом з частотою 100 мГц (10 нс) можемо отримати такі результати: $N_1' = 26$, $N_1'' = 27$, $N_1''' = 28$, і $N_2' = 3332$, $N_2'' = 3333$, $N_2''' = 3334$. Тут індекс ('', ''') показує, які значення можуть бути одержані при вимірюванні інтервалів часу цифровим методом за рахунок похибки дискретності.

Обчислимо похибку визначення зсуву фаз при такому розкладі: $N_1 = 26$ (менше значення), $N_2 = 33,34$ мкс (більше значення).

$$\Delta \varphi = \frac{26 \cdot 330 \cdot 10^{-8}}{33,34 \cdot 10^{-6}} = 2,807^\circ.$$

Загальна похибка вимірювань зсуву фази становить

$$\delta = \frac{3 - 2,807}{3} \cdot 100\% = 6,43\%.$$

У такому разі враховувати стабільність частоти зразкового генератора ($\delta_0 = 10^{-4}\%$) немає змісту, тому що вона значно менша.

Такий результат з похибкою 6,43 % можна отримати тільки для фазометра з мікропроцесором, який не внесе додаткової похибки у формування результату. Отже, можна зробити перший висновок – одержати високу точність за один вимірювальний цикл дуже складно. Можна зробити усереднення результату за 10 або 100 циклів вимірювання, тоді похибка вимірювання і формування результату значно зменшиться, при некогерентності сигналів $\sigma = \frac{\sigma_1}{\sqrt{n}}$,

де n – кількість циклів вимірювань. Але одночасово ми втрачаємо в швидкодії. Це означає, що миттєву зміну ми побачимо з великим запізненням або не побачимо взагалі, якщо ця зміна була знаковмінна.

Цікавий варіант побудови фазометра з помножувачем, який використовується в контурі формування частоти квантування [3]. Частота квантування формується з вимірювального сигналу множенням його частоти на 3600. Нескладно розрахувати чутливість такого фазометра, яка буде становити $0,1^\circ$:

$$f_0 = n f_x = \frac{1}{T_0}; \quad T_0 = \frac{1}{n f_x}; \quad N_x = n \varphi_x / 360.$$

Якщо $n = 3600$, то N_x буде виражатися у десятих частках градуса.

Фазометр з помножувачем частоти на 3600 має такий недолік. У разі зміни частоти f_x перехідний процес для досягнення правильного результату може тривати десятки періодів, тому що помножувач частоти має певну інерційність. Крім того, частотний діапазон фазометра буде обмежений частотним діапазоном помножувача частоти.

Розглянемо структурну схему фазометра з помножувачем частоти на 36, що дає змогу усунути деякі недоліки.

1. Зменшується затримка, яка викликана перехідними процесами в помножувачі частоти.
2. Легше побудувати помножувач, коефіцієнт множення якого на два порядки менший.

Розглянемо особливість запропонованого технічного рішення. Структурна схема фазометра з помножувачем частоти на 36 наведена на рис.1.

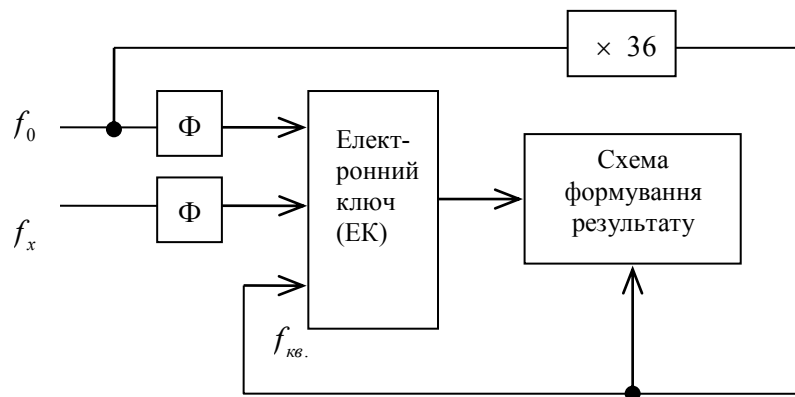


Рис. 1. Структурна схема фазометра з помножувачем частоти на 36

Розглянемо діаграму роботи такого фазометра, яка наведена на рис. 2.

- а) – імпульс t_x , який пропорційний до $\Delta\varphi_i$;
- б) – імпульс частоти квантування f_0 ;
- в) – імпульси Δt_1 і Δt_2 , Δt_1 – це інтервал часу від переднього фронту імпульсу t_x до першого імпульсу квантування, який збігається в часі з імпульсом t_x ; Δt_2 – це інтервал часу від останнього імпульсу квантування, який збігається в часі з імпульсом t_x до заднього фронту імпульсу t_x ;
- г) – імпульс, який відповідає за тривалістю Δt_1 , формується відразу після закінчення імпульсу Δt_2 ;
- д) – Δt_3 -імпульс, який за тривалістю дорівнює $\Delta t_1 + \Delta t_2$;
- е) – t'_x - це імпульс з тривалістю $t'_x = 10(\Delta t_1 + \Delta t_2)$;
- ж) – з) $\Delta t'_1$ і $\Delta t'_2$ – виділення імпульсів незбіжності в новому циклі вимірювання. 1,2,3,4,5 часові моменти на діаграмах а, в, г, д.

У разі надходження на схему формування результату (СФР) сигналів t_x і f_0 виділяють і запам'ятовують два інтервали – Δt_1 і Δt_2 , інтервал часу t_x , який зменшений на величину $(\Delta t_1 + \Delta t_2)$, має цілу кількість періодів частоти квантування f_0 і їхня кількість більша на одиницю. Щоб результат був достовірний, треба один імпульс частоти квантування ліквідувати. Така задача не є складною і легко реалізується для цифрової та імпульсної техніки. Цілу кількість періодів частоти квантування f_0 в інтервалі $t_x - (\Delta t_1 + \Delta t_2)$ відраховуємо без помилок. Інформація про точніше значення зсуву фаз є у величині інтервалу $\Delta t_3 = \Delta t_1 + \Delta t_2$ (рис.2, діаграма д)). Далі нам потрібно масштабувати інтервал Δt_3 . Для запам'ятовування і додавання інтервалів часу добре використати точні джерела струму або напруги. Інтервал часу $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$ перетворюються в пропорційну до їхньої тривалості амплітуду.

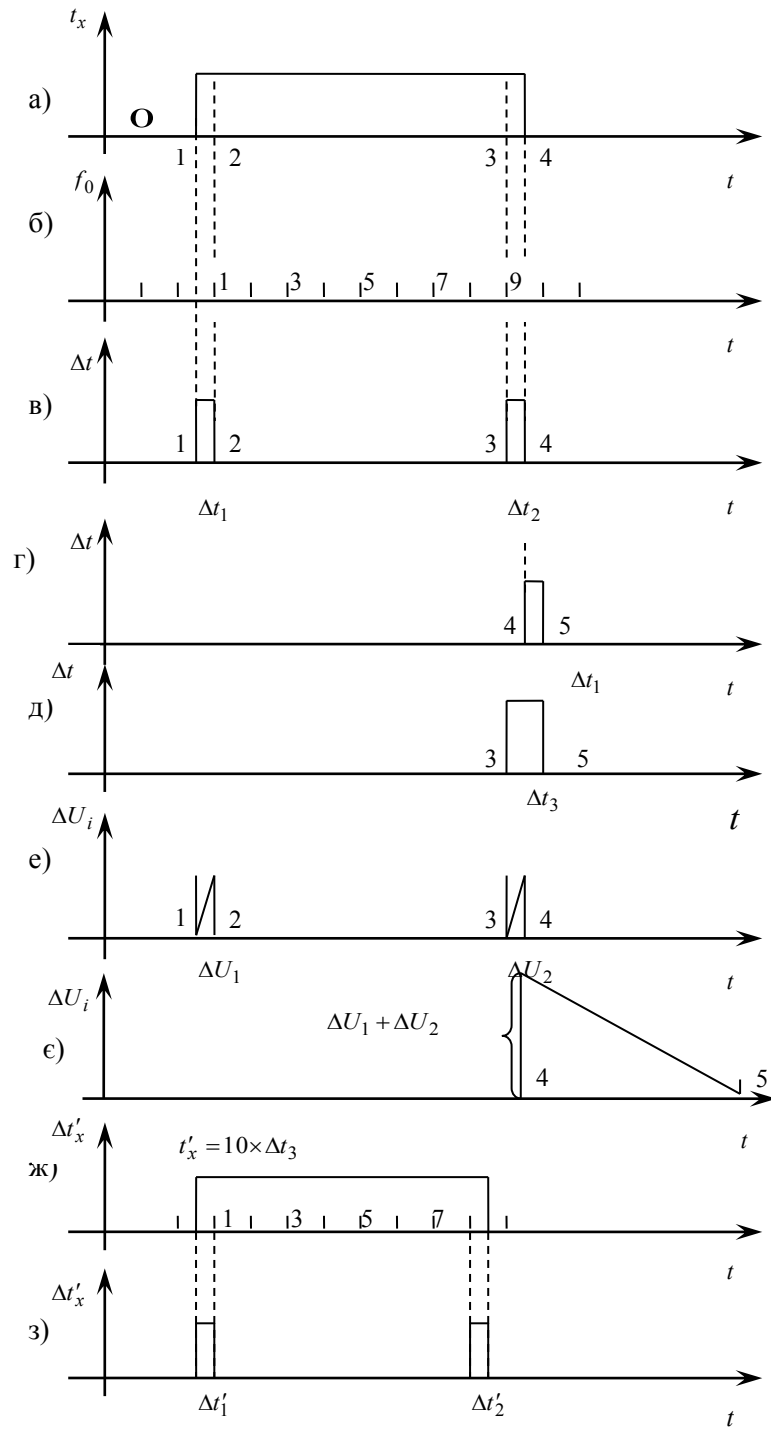


Рис. 2. Диаграмма работы фазометра

$$\Delta U_i = K \Delta t_i$$

При відтворенні з напруги в інтервал часу достатньо розгортаючий параметр (струм чи напругу) взяти в 10 раз меншим і інтервал часу збільшиться в 10 разів.

Далі цикл вимірювання повторюється і інформація записується в молодший десятковий розряд. Кількість таких розрядів визначається тільки інструментальними похибками перетворення інтервал часу – напруга і напруга – інтервал часу.

Оскільки в фазометрі використано помножувач тільки на 36, то і перехідні процеси будуть значно менші і обмеження за частотним діапазоном будуть також меншими.

Визначимо похибку вимірювання зсуву фаз величиною 3° для частоти 30 кГц за допомогою фазометра з помножувачем на 36. Нам необхідно виконати квантування інтервалу, який дорівнює

$$\Delta t_1 = \frac{1}{f_b} \cdot \Delta \varphi = \frac{33,33 \cdot 10^{-6} \cdot 3}{360} = 0,2777(7) \text{ мкс} = 277,7(7) \text{ нс.}$$

Частота квантування у такому разі буде $30 \cdot 1000 \cdot 36 = 1080$ кГц. У такому разі період частоти квантування більший від інтервалу, який нам треба виміряти.

У фазометрі з помножувачем на 36 є три десяткові розряди, які мають “вагу” сотні, десятки і одиниці градусів зсуву фаз. Після коми є також розряди, які відображають одну десяту, одну соту і одну тисячну градуса. Скільки розрядів можна використовувати для відображення інформації? Це визначається похибкою схеми формування результату, в якій відбувається “розтягування” залишкових інтервалів. Якщо така похибка є не більшою за 0,1 %, то в нашому випадку результат вимірювання буде $3,000^\circ$ і абсолютна похибка буде становити $\pm 0,003^\circ$. Отже, аналіз показує, що для зсувів фаз величиною одиниці градусів вища точність відображення вимірювальної інформації, ніж три десяткові розряди після коми, не має змісту, тому що величина похибки має в молодшому розряді доволі велику вагу. В нашому випадку достатньо обмежитися двома десятковими розрядами після коми. Загальноприйнятим вважають такий стан, коли похибка не більша від ваги молодшого розряду декади. В нашому випадку – результат вимірювання достатньо подати так – “3,00”. Кількість розрядів, які можна формувати і відобразити, може визначати схема формування результату на основі аналізу величини зсуву фаз і похибки “розтягування”. Отже, фазометр з комбінованою схемою перетворення і вимірювання дає точніший результат. Результат вимірювання з урахуванням похибки буде становити: $3,00^\circ \pm 0,1\% \pm 0,005^\circ \pm 0,005^\circ$ – це похибка дискретності, яка становить 0,5 одиниці дискретності наймолодшого розряду.

Розглянутий фазометр з помножувачем на 36 має ряд переваг, які вже розглядалися, і результат вимірювання в такому фазометрі формується з вищою точністю.

Висновки. Розглянуто прилади, які використовують для вимірювання зсуву фаз. Визначено похибку вимірювання зсуву фаз величиною 3° для частоти 30кГц при величині частоти квантування 100 мГц. Запропонована структурна схема фазометра з помножувачем частоти на 36 та визначено похибку вимірювання зсуву фаз величиною 3° для частоти 30 кГц з допомогою такого фазометра.

1. Іванців Р.-А. Д., Марікуца У.Б. Антонюк М.П. Підвищення точності фазового детектування // Вісник НУ “Львівська політехніка”, Львів, 2004. 2. А.С.1298841 СССР // Фазовый детектор / Иванцев Р.-А. Д., Романюк С.Ф., Сакаль В.М. // Бюллетень изобретений, 1987, № 11. 3. Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы. – К., 1986.