

Надійшла до редакції
9.11.2012 р.

УДК 621.317

І.В. ГУЛА, І.В. ТРОЦИШИН, О.П. ВОЙТЮК

Хмельницький національний університет

СУЧАСНІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ФАЗОВИХ ЗСУВІВ ТА МОЖЛИВІ ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ЗА РАХУНОК НАДЛИШКОВОСТІ

Проаналізовані методи вимірювання фазових зсувів сигналів. На основі аналізу розглянутих методів запропоновано підвищення точності вимірювання фазових зсувів сигналів на частотах понад 300кГц за допомогою використання методу коінциденції.

Ключові слова: метод коінциденції, фаза сигналу, період сигналу.

The methods of measuring the phase shift signals. Based on the analysis of these methods are proposed to improve the accuracy of measurement of phase shifts of signals at frequencies exceeding 300kHz by using the method kointsedentsiyi.

Мета роботи. Дослідити методи вимірювання фази на даний момент часу, показати їхні переваги та недоліки, запропонувати можливі шляхи підвищення точності вимірювання фази на високих частотах.

Проблеми дослідження.

Досить багато вчених працювало і працює тепер в області фазовимірювальної техніки як в СНД, так і в Україні. Найбільш вагомий вклад в її розвиток внесли колективи під керівництвом: С.М. Маєвського (КПІ) - в галузі компенсаційних вимірювачів та калібраторів фази; Ю.О.Скрипника - в галузі дослідження фазометрів періодичного порівняння; Е.Д. Колтика, С.А.Кравченко - в галузі метрологічного забезпечення; М.К. Чмиха - в галузі створення цифрових фазометрів прямого перетворення. Суттєвий вплив на розвиток фазових методів і їх застосування в радіотехнічних системах справили роботи Ю.М. Казарінова, Є.І. Кінкулькіна, В.Б. Пестрякова, В.В. Цветнова, а також роботи по загальній теорії фазових та частотних вимірювань В.Б.Дудикевича, Ш.Ю. Ісмаїлова, С.В. Кулікова, П.П. Орнатського, Е.К. Шахнова, Б.І. Швецького, В.М. Шляндіна, Г.П. Шликова та інших.

Значний вклад в розвиток окремих питань фазових вимірювань внесли: О.А-Б. Ахмадов, І.Я. Білінський, І.К. Бондаренко, І.М. Вішенчук, Ю.Б. Гімплівіч, А.С. Глінченко, М.С. Жилін, С.С. Кузнецкий, Е.В. Нечаев, С.П. Панько, О.П. Похилук, С.І. Пятін, П.Т. Смірнов, В.Я. Суп'ян, А.М. Фіштейн, А.І. Фендріков, С.В. Чепурних та інші [2].

Усі відомі методи та засоби вимірювання фазових зсувів сигналів не можуть у повній мірі задовольнити сучасний рівень вимог, що висувуються перед спеціалізованими вимірювачами фазових зсувів сигналів, у першу чергу.

Основними вимогами до таких вимірювачів є:

- мала похибка вимірювання (менше 1%);
- висока швидкість вимірювання;
- широкий динамічний діапазон вимірювальної величини ;
- простота апаратурної реалізації;
- підвищена завадостійкість;
- можливість досягнення високого ступеню інтеграції складових вимірювача.

Основний розділ.

Аналіз класичних методів вимірювання фазових зсувів сигналів

По схемі побудови розрізняють аналогові та цифрові вимірювачі фазового зсуву сигналів. Для вимірювання в області низьких частот використовують фазометри без перетворення частоти. При вимірюванні в діапазоні високих частот застосовують гетеродинні чи стробоскопічні перетворювачі частоти, які дозволяють розширити частотний діапазон вимірювальних сигналів.

Для негармонічних сигналів замість ФС використовують затримку по часу між сигналами ΔT і її вимірювання.

Аналогові фазометри

Серед аналогових фазометрів розрізняють: осцилографічні методи вимірювання ФС; компенсаційні фазометри; стрілочні фазометри, які, в свою чергу, ділять на кореляційні фазометри і тригерні фазометри. Крім того, розроблені оптимальні алгоритми оцінки ФС в умовах дії на вимірювальний сигнал шумових завад.

Осцилографічні методи вимірювання

В залежності від виду розгортки осцилографа розрізняють три метода вимірювання ФС: метод

лінійної розгортки; метод синусоїдальної розгортки; метод кругової розгортки.

При використанні лінійного методу розгортки похибка вимірювання визначається не лінійністю розгортки осцилографа, впливом фазових характеристик каналів. Сумарна відносна похибка вимірювання зазвичай складає $\pm 10^\circ$. При використанні методу синусоїдальної розгортки сумарна відносна похибка дещо зменшується.

Метод кругової розгортки є більш точним, ніж метод синусоїдальної розгортки. Крім того, отримують прямий відлік фазового кута з зазначенням знаку.

Компенсаційні методи вимірювання

Компенсаційні методи вимірювання складаються в компенсації наявного значення ФС між напругами. Для компенсації застосовують градуйований фазообертач і індикатор нуля фазового зсуву. Результат вимірювання ФС зчитують з шкали градуйованого фазообертача.

В якості індикатора нульового фазового зсуву між напругами може бути застосований, наприклад, осцилограф в режимі синусоїдальної розгортки. Недоліком даного методу є невисока точність вимірювання[3].

Схема однопівперіодного тригерного фазометра приведена на рис.1.

Тригерним фазометрам притаманні наступні недоліки: фазометр має велику похибку із-за уходу нульової лінії, похибка Δf може досягати значення $1.5^\circ - 3.0^\circ$.

Дещо кращу точність має двухпівперіодний тригерний фазометр, схема якого приведена на рис.2:

Даний фазометр дозволяє виключити вплив парних гармонік вхідного сигналу на результат вимірювання ФС, а також мертву зону $\Delta f_{МЗ}$, ухід нульової лінії також не вносить похибок в результат вимірювання.

Недоліком тригерних фазометрів є невисока точність вимірювання фазового зсуву сигналів с похибкою $1.5^\circ - 3^\circ$ на частотах до 1 МГц.

Тригерні фазометри

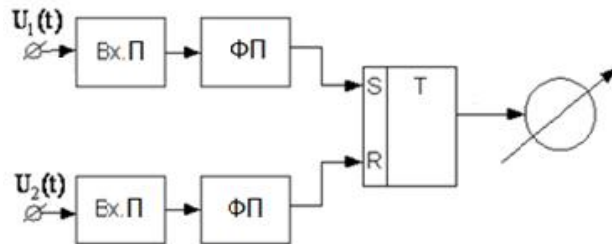


Рис. 1. Структурна схема однопівперіодного тригерного фазометра, тут: Вх.П – вхідний пристрій, ФП – формуючий пристрій

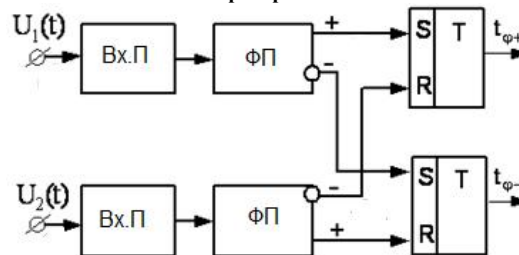


Рис. 2. Структурна схема двухпівперіодного тригерного фазометра: Вх.П – вхідний пристрій, ФП – формуючий пристрій

Кореляційний фазометр

Структурна схема кореляційного фазометра приведена на рис.3:

Кореляційним методам вимірювання фазових зсувів сигналів притаманні наступні недоліки: необхідність виконання великої кількості арифметичних операцій, наявність нелінійних елементів (перемножувач), залежність показників від амплітуди вхідних сигналів U_{m1} і U_{m2} . Перевагою даного фазометра є висока завадостійкість і можливість роботи при малих відношеннях сигнал/шум.



Рис. 3. Структурна схема кореляційного фазометра

Оптимальні фазометри

Задачу створення завадостійких фазометрів, які працюють в широкому діапазоні відношень сигнал/шум, можна вирішити на основі оптимальних методів, які забезпечують мінімальну похибку при дії флуктуаційних завад.

Для оптимальної оцінки ФС отримана структурна схема ортогонального фазометра, приведена на рис. 4.

На виході фазометра формується оцінка ФС гармонічного опорного сигналу по формулі:

$$f = \arctg \left(\frac{Q}{I} \right), \quad (1)$$

де $I = \int_0^{T_i} S(t) \cdot \cos(\omega_0 t) \cdot dt$, $Q = \int_0^{T_i} S(t) \cdot \sin(\omega_0 t) \cdot dt$ – синфазна і квадратурна складова вхідного сигналу.

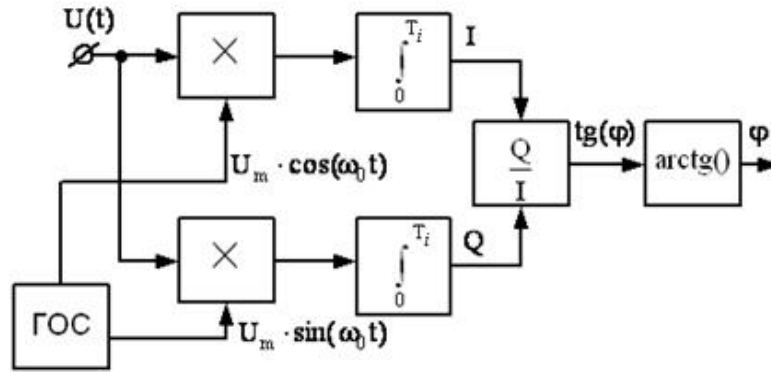


Рис.4. Структурна схема ортогонального фазометра: ГОС –генератор опорних сигналів

Похибка оцінки ФС залежить тільки від відношення щільності потужності завад до енергії сигналу. Сигнал може бути промодульований різними способами – по амплітуді або фазі (частоті), і якщо модуляція відома і відтворена в копії сигналу, то похибка результату вимірювання буде залежати тільки від енергії сигналу. Отже, сигнал може бути складним, (складатися з послідовності імпульсів (пачки) з різною формою огинаючої кожного імпульса і пачки в цілому,) або шумоподібним, (тобто складно модульованим по фазі; точність вимірювання фази від цього не зміниться, якщо закони модуляції відомі і відтворенні в копії). Шумоподібні сигнали часто застосовуються в радіонавігаційних системах з ціллю забезпечення високої завадозахищеності і скритності роботи.

Цифрові методи вимірювання зсуву фази

Цифрові фазометри з перетворенням фази в напругу

При використанні даного методу виконується проміжне перетворення фази в напругу, що знижує точність вимірювань. На даний час використовують безпосереднє перетворення фази сигналу в інтервали часу[1].

Цифрові фазометри з постійним часом вимірювання

Структурна схема ЦФ з постійним часом вимірювання приведена на рис. 6.

Основними перевагами ЦФ з постійним часом вимірювання є висока точність вимірювання ФС, обумовлена усередненням результатів вимірювань за велике число періодів вхідного вигнала; широкий частотний діапазон вимірювальних сигналів; великий динамічний діапазон по амплітуді вхідних сигналів без застосування різноманітних регулюючих засобів; висока часова стабільність приладу внаслідок відсутності в ньому різноманітних селективних кіл.

До недоліків слід віднести низьку завадо захищеність, понижену швидкодію та наявність низькочастотної похибки.

Цифрові фазометри з часом вимірювання кратним періоду сигналу

На рис.5 приведена структурна схема такого ЦФ, в відповідності з якою створений фазометр ФК2-35.

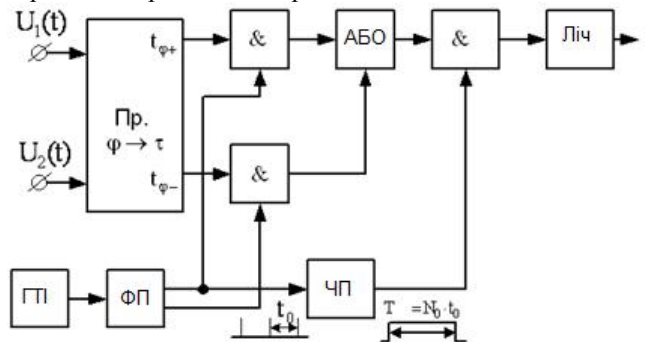


Рис. 5. Структурна схема ЦФ з постійним часом вимірювання: ГТІ – генератор тактових імпульсів, ФП – формуючий пристрій, ЧП- часозадаючий пристрій, ПР. – перетворювач

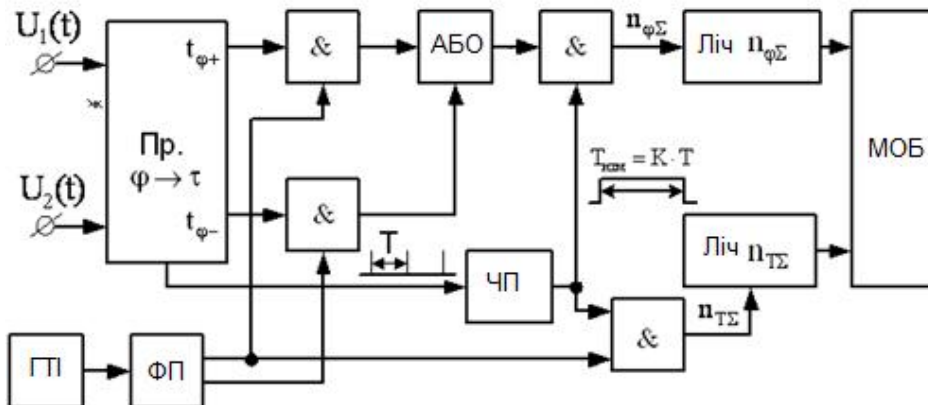


Рис.6. ЦФ з часом вимірювання кратним періоду: ГТІ – генератор тактових імпульсів, ФП – формуючий пристрій, ЧП- часозадаючий пристрій, МОБ – мікропроцесорний обчислювальний блок, ПР. – перетворювач

До недоліків ЦФ з часом вимірювання кратним періоду, відноситься необхідність виконання арифметичних операцій. До появи мікропроцесорних ВІС цей недолік стримував розвиток даних ЦФ. Перевагою даного типу фазометрів є висока швидкодія.

Для того щоб уникнути виконання операцій ділення при обчисленні f за формулою (2.26), розроблені ЦФ з постійним часом вимірювання. Дані ЦФ реалізуються на жорсткій логіці і не потребують використання мікропроцесорних ВІС.

Цифровий фазометр на основі принципу коінциденції

Метод співпадіння (коінциденції) оснований на використанні багатоканальної нерегулюємої міри (БНМ) і багатоканального нерегулюємого масштабного перетворення (БНМП) [1, ст. 25]. Наявність двох багатоканальних засобів визначає надлишковість методу.

Принцип роботи методу описано в [1]. Якщо частоти вхідних сигналів не являються кратними частоті опорного сигналу, тоді через деяких час (час вимірювання) відбувається часове співпадіння (коінциденція) перетинів ліній частот, тобто співпадіння їх нуль переходів (опорної частоти з вхідними сигналами), які несуть в собі інформацію про результати вимірювань і не мають в собі методичної складової похибки, яка залежить від часу вимірювань.

На рис. 7 показана класифікація методів вимірювання фази.



Рис.7. Класифікація методів вимірювання фазових зсувів сигналів

Висновок:

Шляхом аналізу існуючих технічних рішень виявлено, що аналогові фазометри не забезпечують достатньої швидкодії і точності (час вимірювання 3...4 сек, похибка не менше 1° для оптимального методу вимірювання) для вимірювання на середніх і високих частотах.

Цифрові фазометри значно покращують точність вимірювань але мають недолік, який пов'язаний з тим, що при зростанні частоти різко падає точність. Наприклад, на частоті 5 МГц похибка складає $3,51^\circ$ для фазометра 6500 фірми "Krohn-Hite" (США). Сучасний вітчизняний фазометр Ф5126 забезпечує похибку не менше $0,31^\circ$ при 150 МГц. Але така точність лише при стробоскопічному перетворенні.

Для підвищення точності вимірювання на високих частотах пропонується використовувати метод прямого вимірювання, що оснований на використанні принципу коінциденції. Теоретична точність для вимірювання фази цим методом складає $0,05^\circ$ на частоті 1 МГц.

Література

- Орнатский. П.П. Автоматические измерения и приборы (аналоговые и цифровые) 5-е изд., перераб. и доп. – К.; Вища шк. Головное изд-во, 1986. – 604 с.
- Чмых М.К. Цифровая фазометрия / М.К. Чмых. – М.: Радио и Связь, 1993. – 184с.
- Сапельников В.М. Проблемы воспроизведения смещаемых во времени электрических сигналов и их метрологическое обеспечение / Сапельников В.М., Кравченко С.А., Чмых М.К./ Изд-е Башкирск. гос. ун-та. – Уфа, 1999. – 200 с.

Надійшла до редакції
3.11.2012 р.