

## ВСТУП

Роль фазових та частотних вимірювань і перетворень радіосигналів є визначальною для теорії радіовимірювань та радіовимірювальних приладів, що обумовлено високими метрологічними характеристиками і інформаційною ємністю таких параметрів, як кут фазового зсуву (КФЗ) -  $\varphi$  та частота сигналу -  $f$ . Завдяки цьому, частотні та фазові вимірювання завжди використовувались в наукових дослідженнях різних галузей науки і техніки, де первинний інформаційний параметр стараються перевести в частоту або фазу електричного сигналу, які забезпечують найвищий рівень точності вимірювань у порівнянні із амплітудними методами. Особливо широко такі перетворення застосовуються в оптичних та радіовимірюваннях, де тепер забезпечений найвищий рівень еталонної бази і передача розмірів еталонів до вимірюваного параметра забезпечує найвищу точність вимірювань.

В той же час, не зважаючи на високий рівень розвитку техніки вимірювань частоти (група Ч) і кута фазового зсуву (група Ф), є досить широке коло вимірювальних задач, коли вказані методи і прилади не в змозі забезпечити вимірювання параметрів радіосигналів, або ж рівень точності не відповідає вимогам.

Найбільш загальним критерієм таких вимірювань є вимірювання  $\varphi(t) > 2\pi$  (для групи Ф) і  $d\varphi(t)/dt = f(t) < 1/T_{\text{вим}}$  (для групи Ч), але, для поняття КФЗ діапазон значень  $\varphi \in (360^\circ (2\pi))$ , а виміряти частоту сигналу  $f_0$  за час менший періоду  $T_0 = 1/f_0$  неможливо.

Найбільш характерним прикладом вимірювань фази коли  $\varphi > 2\pi$  є інтерференційні та радіолокаційні вимірювання. Для частоти це проявляється при формуванні фазочастотних параметрів радіосигналів.

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 [69,125,126,131,157,258].

Значний вклад в розвиток окремих питань фазових вимірювань внесли: О.А-Б.Ахмадов, І.Я.Білінський, І.К.Бондаренко, І.М.Вішенчук, Ю.Б.Гімпілевич, А.С.Глінченко, М.С.Жилін, С.С.Кузнецький, Е.В.Нечаєв, С.П.Панько, О.П.Похилюк, С.І.П'ятін, П.Т.Смірнов, В.Я.Суп'ян, А.М.Фіштейн, А.І.Фендріков, С.В.Чепурних та інші [40-42,62,78,128,141,142,162,246,256].

В області вимірювання параметрів сигналів із частотною модуляцією потрібно відзначити роботи А.С.Віницького, А.В.Зеньковича, Ю.Ф.Павленко, О.І.Колбасіна, в області теорії сигналів - Л.Є.Варакіна, Л.А.Залманзона, І.В.Кузьміна, Х.Хармута [30,32,63,67,68,84,129,247,248].

Наряду із роботами по класичній фазометрії та вимірюванню частоти багато робіт стосувались розробок вимірювальних приладів та систем, які вимірюють  $\varphi \gg 2\pi$  (кумулятивних фазометрів), а також трансформації фазових співвідношень в подібних системах. Найбільш вагомими результатами були представлені в дисертаційних роботах В.П.Кашлева, Ю.В.Куца, С.М.Горбатюка, а також у роботах Ю.О.Скрипника, О.П.Яненко, С.М.Маєвського, В.Г.Баженова, В.І.Гупалова, В.П.Майко, В.П.Коронкевича, В.А.Ханова, В.В.Календіна, Ж.Желкобаєва та інших [13,46,59-62,76,77,79,81,87,88,100-102,143 та інш.].

Але всі ці роботи лише констатували факт вимірювання фазових зсувів більше  $2\pi$  в конкретних системах, як правило оптичних, і відсутність загальної теорії з нового наукового напрямку фазочастотних вимірювань і перетворень радіосигналів (ФЧВ і ПР) є актуальною проблемою на сучасному етапі розвитку радіовимірювальної техніки.

Введення поняття повного фазового зсуву (ПФЗ)  $\Psi(t)$  та його похідних  $d\Psi(t)/dt$ , як головного параметра радіосигналів і розробка методів та засобів вимірювання, перетворення і формування фазочастотних параметрів радіосигналів відкриває принципово нові можливості в теорії радіовимірювань і теорії сигналів. Лише завдяки розробці теорії ФЧВ і ПР стане можливим здійснювати такі унікальні

операції як: синтез сітки когерентно-фазових частот; трансформація фазових співвідношень “без похибок”; формування “згорнутих” ЧМ сигналів; здійснення зовнішньої ЧМ радіосигналів; регулювання індексу модуляції та девіації частоти аж до повного зняття ЧМ; вимірювання параметрів ЧМ сигналів прямими методами; компенсація та імітація Доплерівського зсуву радіосигналів; формування ортогональних функцій трансверсії; кодове розділення сигналів на одній секвенті; побудова компенсаційних ортогональних фазометрів і калібраторів фазових зсувів і т.п., для яких відсутні відповідні поняття в рамках класичної фазометрії та методів вимірювання і формування частоти радіосигналів.

Метою монографії є спроба описати створення нового наукового напрямку в області радіовимірювальної техніки - теорії фазочастотних вимірювань і перетворень радіосигналів та показати розробку на її основі принципово нових методів та засобів вимірювання і формування параметрів радіосигналів для їх широкого застосування в наукових дослідженнях та створенні промислових зразків високоєфективних приладів і систем інформаційно-вимірювальної техніки.

Книга складається із вступу, семи глав, висновку, списку використаних джерел.

**В першій главі** розглянуті існуючі моделі вимірювальних сигналів, методи вимірювання та перетворення їх параметрів. Детально розглянуто часові та спектральні форми представлення сигналів від звичайного аналогового до цифрового. Окремо розглянуто методи формування, модуляції та перетворення сигналів в рамках класичних уявлень теорії сигналів. В той же час відмічено, що існуючі класичні моделі не в змозі адекватно відобразити реальні сигнали кінцевої тривалості, які називаються радіосигналами.

**В другій главі** приведені результати досліджень теоретичних основ фазочастотних вимірювань та перетворень радіосигналів, проаналізований стан проблеми та визначені напрямки досліджень, викладені основні поняття та визначення. На основі аналізу сучасного стану вимірювань  $\varphi$  і  $f$  та аналізу їх методів вимірювання, визначено неадекватність визначень та моделей реальних сигналів при практичних вимірюваннях. Запропоновано вважати єдиним адекватним параметром (адекватною моделлю) фазочастотних вимірювань  $\Psi$  (повний фазовий зсув),  $\Psi(t) = N_{\text{фм}}(t) + \varphi(t)$ , що є фундаментальним поняттям теорії ФЧВ і ПР. Розглянуті представлення ПФЗ на єдиній шкалі вимірів  $\Psi$ , де  $N_{\text{фм}}$  є ціла

частина,  $\varphi$  - дробова. Розроблена та приведена загальна класифікаційна таблиця методів теорії ФЧВ і ПР, що має два глобальні напрямки: вимірювання ПФЗ; формування розгортки  $\varphi(t)$  у часі (формування радіосигналів). Приведені та проаналізовані чотири можливі варіанти фазочастотних перетворювачів (трансвертерів), отримані вирази для оцінки спектральних характеристик модулів перетворення із входами  $A/A$ ,  $\#/A$ ,  $A/\#$ ,  $\#/\#$ .

***В третій главі*** проведено дослідження методів формування сигналів на основі фазочастотних перетворень. Розроблені методи формування ортогональних сигналів на основі трансвертера  $\#/\#$ . Запропонований загальний алгоритм формування функцій трансверсії та визначення їх секвентності. Розроблені та запропоновані структурні схеми простих трансвертерів дискретних та цифрових сигналів. Приведені результати моделювання та оцінки на ЕОМ спектральних та кореляційних характеристик функцій трансверсії. Вказані можливості створення складених сигналів на основі функцій трансверсії, які мають однакові секвенти, але є ортогональними. Запропоновані та розроблені алгоритми формування дискретної сітки секвент для частотних синтезаторів. Описані, запропоновані автором, загальні методи та алгоритми формування параметрів радіосигналів. Приведена класифікація методів фазочастотного синтезу. Розглянуті запропоновані автором методи здійснення зовнішньої ЧМ, приведена класифікація можливих методів, а також оцінка їх можливостей. Розглянутий метод формування “згорнутих” ЧМ сигналів, а також цифрові регулярні структури для їх здійснення. Проведено опис можливих варіантів побудови генераторів широкосмугових сигналів, частотночасових матриць, а також синтезаторів із “стрибаючою частотою”.

***В четвертій главі*** приведені результати дослідження методів вимірювання повних фазових зсувів радіосигналів. Запропонований метод вимірювання  $\Psi(t)$  який полягає у незалежних вимірюваннях ФЦ і  $\varphi(t)$  із наступним “зшиванням” показів. Наведена класифікація методів та засобів вимірювання ПФЗ. Згідно введеного комплексного критерію (швидкість лічби ФЦ; швидкодія обробки одиничного вимірювання, складність апаратурної реалізації) проведено оптимізацію методів та засобів вимірювання ПФЗ. Встановлено, що найбільш ефективним є запропонований автором спосіб вимірювання ПФЗ, який полягає у незалежних: лічбі ФЦ, вимірюванню КФЗ і наступним їх “зшиванням” результатів обох вимірювань. Визначено допустиму швидкість реверсивного лічби ФЦ при квадратурному

керуванні лічильником ФЦ, запропоновані декілька типів лічильників. Проведені дослідження та розробка фазочастотних методів вимірювання параметрів частотно-модульованих сигналів на основі, розробленої автором, моделі представлення кутової модуляції (ФМ, ЧМ). Пропонується її параметри (індекс модуляції, девіацію) вимірювати методами прямих вимірювань, використовуючи поняття ПФЗ, який може значно перевищувати  $2\pi$ . Показано, що параметри ЧМ вимірюються кумулятивним фазометром безпосередньо (прямі вимірювання), що забезпечує найвищий рівень точності. Розглянуті, проаналізовані, запропоновані автором методи вимірювання девіації та індексу модуляції ЧМС, приведена класифікація фазочастотних методів вимірювання параметрів ЧМС. Розглянуті особливості вимірювання ПФЗ в оптоелектричних та механічних системах, для потреб інтерферометрії, торсіометрії та інших галузей. Розроблено та запропоновано нові методи вимірювання частоти та її динамічних параметрів при дослідженнях високостабільних генераторів.

***В п'ятій главі*** досліджені методи і засоби підвищення точності та швидкодії вимірювання повного фазового зсуву. На основі розгляду прямого методу перетворення фазового зсуву в цифровий код, розглянуті питання перетворення КФЗ у відносний часовий інтервал та методи лічби кількості ФЦ. Встановлено, що головним вузлом сучасного вимірювача ПФЗ, який і визначає всі технічні характеристики та похибки вимірювання, є запропонований автором узагальнений блок попередньої обробки та імпульсного кодування інформації (БПО та ІКІ), як складової частини вимірювача ПФЗ. Виявлені та проаналізовані механізми виникнення методичних та інструментальних похибок перетворення КФЗ у відносний часовий інтервал, які виникають у перетворювачі  $\varphi \rightarrow \tau$ , і викликані перехідним процесом в тригерах-подільниках та вимірювальних тригерах при їх синхронізації, а також похибки, які виникають внаслідок зміни часу затримки розповсюдження сигналів в каналах перетворення. Встановлено також наявність додаткових похибок перетворення, що вносяться класичними ключовими фазовими детекторами (тригерними та схемами із перекриттям), які дозволяють вимірювати лише приріст КФЗ, а не його абсолютне значення, а також наведені структури фазових детекторів, запропонованих автором, які вільні від даної похибки.

Проведено дослідження методів та засобів побудови пристроїв лічби ФЦ, і за критерієм узгодження інформаційного потоку

вимірюваних ПФЗ вхідних сигналів із допустимою швидкістю обробки технічної реалізації при достатній простоті, розроблені та запропоновані автором нові методи та засоби реверсивної лічби ФЦ із квадратурним та неквадратурним керуванням, які мають досить просту реалізацію. Розроблені та запропоновані методи та засоби підвищення завадостійкості до широкосмугових завад вимірювачів ПФЗ, наведені схеми виключення хибних нуль-переходів, які унеможливають роботу лічильників ФЦ, а також наведені функціональні схеми підсилювачів-обмежувачів пристроїв захисту від широкосмугових завад та квадратурних розщиплювачів прямокутних імпульсів. Другим найважливішим вузлом БПО та ІКІ, який визначає похибку перетворення ФЗ в кількість імпульсів є часо-імпульсний перетворювач(ЧІП). Запропонований новий підхід до розгляду похибок ЧІП реальних пристроїв із урахуванням специфіки їх інструментальних похибок, який дозволив провести їх аналіз і виробити нові методи побудови ЧІП із підвищеними метрологічними характеристиками.

Запропоновано та розроблено новий клас ЧІП синхронного типу, в яких відсутня похибка деформації мірила, а також проведена їх класифікація за наступними ознаками: тип квантуемого пристрою; кількість каналів перетворення; кількість фаз квантуючих імпульсів; метод об'єднання результатів. В основу ЧІП синхронного типу покладено структурні методи підвищення розрізняючої спроможності перетворювачів без їх істотного ускладнення та втрати швидкодії. Запропоновані та розроблені універсальні алгоритми побудови багатofазних та багатоканальних ЧІП, які дозволяють зменшити похибку дискретності та збільшити розрізняючу спроможність в  $N$  разів ( $N=2k$ ,  $k=1,2,\dots,n$ ), за рахунок підвищення еквівалентної частоти квантування  $f_{кв.екв} = Nf_{кв}$ , не ускладнюючи при цьому практичну реалізацію, і мають регулярну структуру. Досліджені методи і засоби підвищення точності та швидкодії БПО і ІКІ, запропоновані шляхи реалізації швидкодуючих перетворювачів  $\varphi \rightarrow \tau$ , наведені структурні та функціональні схеми перетворювачів в котрих відсутні методичні, та зведені до мінімуму інструментальні похибки перетворення  $\varphi \rightarrow \tau$ .

Проведено дослідження методичної похибки, викликані некратністю часу вимірювання періоду вхідних сигналів для узагальненого алгоритму  $M$ -фазного формування фазових інтервалів,  $N$ -канального задавання часу вимірювання фазометрів із постійним часом вимірювання, яку називають низькочастотною. На основі отриманих статистичних характеристик похибок вироблені рекомендації та наведена структурна схема фазометра який дозволяє

зменшити її в  $M^2N^2$  разів.

Всі запропоновані та розроблені методи багатофазної та багатоканальної побудови ЧІП інваріантні до елементної бази і мають регулярну структуру, що дозволило розробити універсальні базові модулі(вузли) багатофазних, багатоканальних ЧІП, які дозволяють досягнути  $f_{кв.екв}$  в  $N$  разів більшої ніж гранична робоча частота елементної бази. На основі проведених досліджень розроблені практичні рекомендації з вибору та побудови перетворювачів  $\Phi \rightarrow \tau$  та ЧІП, які дозволяють створити на їх основі БПІ і ІКІ із потрібними параметрами.

***В шостій главі*** розроблені методи та засоби метрологічного забезпечення вимірювань фазочастотних параметрів радіосигналів, а також засоби автоматизації вимірювань та метрологічної атестації вимірювальних приладів та систем. Описані структурні схеми калібраторів приростів фазових зсувів, які використовують електронні методи формування електричних коливань. Найбільш ефективними є, запропоновані автором, цифрові структури для задавання дискретних значень приростів КФЗ на основі лічильників Джонсона із комутаторами в опорному та задавальному каналах, а також на арифметичному суматорі. Для усунення інструментальних похибок, які виникають в каналах комутації та самій конструкції калібраторів запропоновано ввести в обидва канали тригери синхронізації, які усувають похибки викликані зміною “електричної довжини” каналів.

Запропоновані та розроблені нові методи та засоби задавання ПФЗ в радіо та оптичному діапазонах, які використовують методи лазерної фазометрії та інтерферометрії. В їх основі лежить використання просторової компоненти математичного виразу для повної фази електромагнітної хвилі. Описані пристрої для задавання та регулювання ПФЗ, які використовують лінійне переміщення акустооптичного модулятора вздовж напрямку ультразвукової хвилі, а також амплітудного модулятора, який переміщують вздовж напрямку лазерного випромінення, що дозволяє задавати  $\Phi$  через відомий із

високою точністю параметр  $l$ . Запропонована структурна схема фазового компаратора лінійно-кутових переміщень, яка використовує метод “фазового кільця” для прив’язування зразкових засобів вимірювання ( $L$  -лінійного переміщення,  $\alpha$  - площинного кутового зсуву,  $\Phi$  - КФЗ радіосигналу) і створенні на їх основі універсальної повірочної схеми лінійних, кутових та фазових вимірювань.

Приведені результати розробки фазочастотних методів формування радіосигналів із каліброваними параметрами, які базуються на двох напрямках: створення генераторів із калібною зовнішньою ЧМ; використання ЧМ генератора із фазочастотним вимірювачем  $f_\delta$  та  $m$ . Обґрунтовано та запропоновано один із методів побудови автоматизованих вимірювальних комплексів, згідно якому, вимірювальні перетворювачі ПФЗ вмонтовуються безпосередньо в канал ЕОМ, у вигляді агрегатуємих блоків давачів-перетворювачів із своїми вмонтованими інтерфейсами. Розглянуті також питання побудови автоматизації вимірювань в стандарті КАМАК.

**Сьома глава** присвячена практичним застосуванням методів фазочастотних вимірювань і перетворень радіосигналів в наукових дослідженнях, вимірювальній техніці та системах зв'язку.

Приведені результати розробки та експериментальних досліджень виконаних автором та під його керівництвом, направлених на впровадження результатів дослідницької роботи у вимірювальні прилади та системи зв'язку. Основні характеристики деяких вимірювальних приладів та систем передачі інформації, створених на основі досягнутих результатів приведені в розділах 7 глави.