
ОГЛЯДИ

УДК 620.179; 621.3.09; 621.317

ОСОБЛИВОСТІ АМПЛІТУДНИХ І ФАЗОВИХ ВИМІРЮВАНЬ В ЗАВДАННЯХ ДІАГНОСТИКИ СТАНУ ПРОСТОРОВО РОЗВИНЕНИХ ОБ'ЄКТІВ

Шарпан О. Б., д.т.н., професор

*Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна*

Вступ

В умовах розвитку суспільства значна роль належить пристроям і системам, здатним отримати інформацію про параметри, які характеризують структуру, пошаровий склад і функціональний стан об'єктів різної фізичної природи: технічних, природних і біологічних [1-9 і інш.]. Такими об'єктами є, зокрема, компоненти систем зв'язку і передавання інформації [2, 3], багатопозиційних радіотехнічних та енергетичних комплексів [3-6], підземні структури з неоднорідностями [7], низка біологічних органів і систем [8, 9]. Особливостями таких об'єктів є те, що у них відбуваються процеси, розвинені у часі і просторі, їх входи і виходи просторово не сумісні, а параметри передавання у прямому і зворотному напрямках є різними.

Незважаючи на різну природу зазначених об'єктів, є ознаки, які об'єднують їх з точки зору визначення стану і режиму функціонування, загальних особливостей і актуальних завдань оцінювання. Так, є низка однакових показників, що характеризують параметри, структуру і стан таких досліджуваних об'єктів (ДО); насамперед, це час і швидкість поширення та зміни амплітудних, часових і спектральних характеристик сигналів. Для отримання цих показників застосовуються методи амплітудно-частотних, фазочастотних і спектральних вимірювань, які добре розвинені у технічній діагностиці [10, 11]; адаптація цих методів щодо завдань фізіологічних досліджень дозволяє розробити нові діагностичні методики [8, 9]. Невзаємність і багатопозиційність потребує розроблення принципово нової методології визначення параметрів і стану, оскільки для забезпечення точних часових і фазових вимірювань існує проблема формування сигналів порівняння (сигналів опорної фази) у просторово рознесених пунктах. Кількість таких пунктів може становити від двох (при визначенні параметрів передавання кабельних каналів систем зв'язку [2, 3]) до десятків і навіть сотень при створенні багатопозиційних радіотехнічних систем [4-6]. Оскільки визначення параметрів, зазвичай, має відбуватись у процесі функціонування ДО за призначенням, вимірювання необхідно виконувати швидко (у реаль-

ному масштабі часу), неруйнівними методами, досить часто в умовах завад і артефактів підвищеного рівня та у значному динамічному діапазоні амплітуд сигналів. Вимоги визначення часових і частотних параметрів та роздільної здатності структури і складу ДО з підвищеною точністю обумовлюють потребу у виконанні широкосмугових вимірювань.

Метою статті є розгляд особливостей і набутого досвіду розроблення нових методів та швидкодіючих широкосмугових просторово розвинених систем імпульсних амплітудних і фазових вимірювань і пульсової спектрометрії, здатних забезпечити отримання з підвищеною точністю часових і частотних параметрів просторово розвинених невзаємних динамічних об'єктів різної фізичної природи.

1. Особливості вимірювання параметрів частотних і часових характеристик невзаємних об'єктів, як трактів передавання сигналів

Розглянемо особливості отримання параметрів просторово розвинених об'єктів у разі визначення їх функціонального стану. Основну увагу приділимо таким значимим об'єктам: широкосмуговим технічним об'єктам (каналам передавання), функціональний стан яких визначається параметрами частотних характеристик (ЧХ) коефіцієнта передавання сигналів; природним і біологічним об'єктам, структура і стан яких визначається параметрами ЧХ електричного імпедансу; судинній системі, як тракту передавання хвилі тиску. Особливості вимірювань в цих випадках обумовлюються тим, що такі об'єкти слід розглядати як невзаємні просторово розвинені, досить часто – багатопозиційні. У деяких із них, до того ж, наявне зміщення частоти вихідного сигналу відносно вхідного.

Для оцінки частотних спотворень і часу проходження сигналів в трактах передавання широко використовуються методи, що засновані на визначенні параметрів амплітудно-частотних і фазочастотних характеристик (АЧХ і ФЧХ) [1-3, 10, 11]. Особливу вагу має оцінка різних параметрів ФЧХ (нахилу лінійної частини до осі частот, нелінійності, групового і фазового часу поширення, дисперсії) і їх вплив на процес передавання. Важливо також, щоб кожний із прийнятих параметрів мав просту фізичну інтерпретацію.

Розглянемо відомий формальний вираз для ФЧХ $\Psi(\omega)$ ДО як суму нелінійної $\psi_n(\omega)$, лінійної $\tau_0 \cdot \omega$ і сталої $(\varphi_0 + 2\pi n)$ складових

$$\Psi(\omega) = \psi_n(\omega) + \tau_0 \cdot \omega + (\varphi_0 + 2\pi n); \quad \varphi_0 \leq 2\pi, \quad (1)$$

де ω – кутова частота, n – ціле число, φ_0 – залишок сталої складової ФЧХ.

Параметр τ_0 має розмірність часу, характеризує лінійну складову ФЧХ

і залежить від способу її визначення. Будемо шукати таке визначення τ_0 , яке відповідає оцінці $\tau_0 = T_i$ часу поширення сигналу в ДО за максимумом кореляції між вхідним $s_1(t)$ і вихідним $s_2(t)$ сигналами. В частотній області, враховуючи теорему Релея, воно відповідає умові

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} S_1^2(\omega) K(\omega) \cos [\Psi(\omega) - T\omega] d\omega = \max_{T, \varphi_0, n}, \quad (2)$$

де $S_1(\omega)$ і $K(\omega)$ – частотні залежності модуля спектральної функції вхідного сигналу і модуля коефіцієнта передавання ДО.

Якщо $\varphi_0 \neq 0$, то для даного смужно прозорого об'єкта оцінка часу T_2 поширення сигналу відрізняється від оцінки часу T_1 поширення обвідної, що необхідно враховувати. Для визначення T_2 слід максимізувати вираз (2) лише по T , вважаючи (і забезпечуючи) $\varphi_0 = 0$; у разі визначення часу поширення обвідної T_1 необхідно додатково встановлювати таке значення φ_0 , за якого інтеграл (2) досягає максимуму максимуму.

Аналіз рівняння (2) дозволяє зробити висновок, що час поширення сигналу і міра його спотворень у ДО залежить також і від АЧХ ДО та спектральних характеристик самого сигналу. Для їх визначення принципово необхідно знати нерівномірність АЧХ і нелінійність ФЧХ в усій робочій смузі частот ДО, а для виключення залежності від АЧХ сигналу під час вимірювань доцільно використовувати зондувальний сигнал з рівномірним амплітудним спектром (АС) ($S_1(\omega) = const$) у цій смузі частот.

Після знаходження прямої, що апроксимує лінійну складову (нахил) ФЧХ (відповідно з одним із вказаних вище визначень), оцінка часу поширення сигналу (або його обвідної) обчислюється за формулою $T = \Delta\psi/\Delta\omega$, де $\Delta\psi$ – приріст лінійної складової ФЧХ в межах робочої смуги частот ($\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$) ДО.

У разі отримання АЧХ і ФЧХ просторово розвинених взаємних об'єктів з рознесеними входом і виходом використовується тривіальний режим вимірювань, за якого вимірювальний сигнал проходить через досліджуваний об'єкт двічі у прямому і зворотному напрямку і фактично вимірювання виконується в одному пункті [11]. Проблема виникає під час дослідженні параметрів просторово розвинених **невзаємних** об'єктів, вхід і вихід яких неможливо звести в один пункт.

У разі невзаємності трактів передавання сигналів та при значної нелінійності ФЧХ оцінку фазових спотворень сигналів, зазвичай, здійснюють за частотною залежністю групового часу запізнювання (ГЧЗ) $T_z(\omega) = d\Psi(\omega)/d\omega = T + \tau_n(\omega)$, [2, 3, 10]. В цьому сенсі слід зазначити таке. Стала T ГЧЗ, яка характеризує час поширення сигналу, зазвичай, не

може бути використана для нормування характеристик ДО, оскільки вона вимірюється із значною похибкою внаслідок вузькосмуговості вимірювальних сигналів. Нелінійність ГЧЗ $\tau_n(\omega)$, яка є основним параметром ФЧХ для оцінки і нормування фазових спотворень сигналів у каналах зв'язку, не завжди може задовольнити сучасні вимоги щодо визначення стану каналів зв'язку, оскільки: а) під час отримання ГЧЗ втрачається інформація про значення φ_0 ; б) у разі нормування рівня фазових спотворень за відхиленнями ГЧЗ необхідно визначати не лише відхилення ГЧЗ від лінійного закону, а й частоту його „коливальності” в діапазоні частот прозорості ДО; в) у разі обчислення нелінійності ФЧХ за інтегруванням характеристики ГЧЗ виникає накопичення похибки. Отже, у загальному випадку оцінювати час поширення сигналу можна лише за максимумом інтегралу (2), що потребує прямого визначення параметрів ФЧХ. У разі просторового розвинення і невзаємності ДО це вимагає створення особливих умов вимірювань з формуванням сигналу опорної фази на виході ДО.

2. Пряме швидке вимірювання параметрів АЧХ і ФЧХ просторово розвинених невзаємних об'єктів за спектрометрією вимірювального і копії тестового сигналів

Аналіз показує, що за сукупністю вимог швидкого неруйнівного визначення стану просторових об'єктів за параметрами ЧХ найбільш прийнятними є методи, що ґрунтуються на використанні спектральних розкладів широкосмугових сигналів [12, 13]. Для прямого визначення параметрів ФЧХ просторово розвинених невзаємних об'єктів запропоновано *модифікований метод спектрометрії* [13-18], узагальнена структурна схема реалізації якого представлена на рис. 1 [17].

Суть методу полягає у порівнянні параметрів спектрів (амплітудного і фазового) вимірювального сигналу на виході ДО з однойменними параметрами спектрів опорного сигналу, який є копією тестового зондувального сигналу. Опорний сигнал формується на виході ДО, де й виконуються вимірювання. Точне визначення параметрів можливе у разі ідентичності об'єктів спектрів тестового і копії тестового сигналів і різних варіантах частотної і фазової (часової) синхронізації зондувального (тестового), копії зондувального і вихідного вимірювального сигналів.

Спектральні функції вхідного тестового сигналу $s_1(t)$, вихідного вимірювального $s_2(t-\tau_0)$ і копії тестового $s_{1K}(t)$ сигналів відповідно становлять:

$$\check{S}_1(\omega) = F[s_1(t)] ; \check{S}_2(\omega) = F[s_2(t - \tau_0)] ; \check{S}_{1K}(\omega) = F[s_{1K}(t)] \quad (3)$$

де τ_0 – час поширення сигналу в ДО, а функціонал $F[s_i(t)]$ означає функцію спектрального перетворення i -го сигналу.

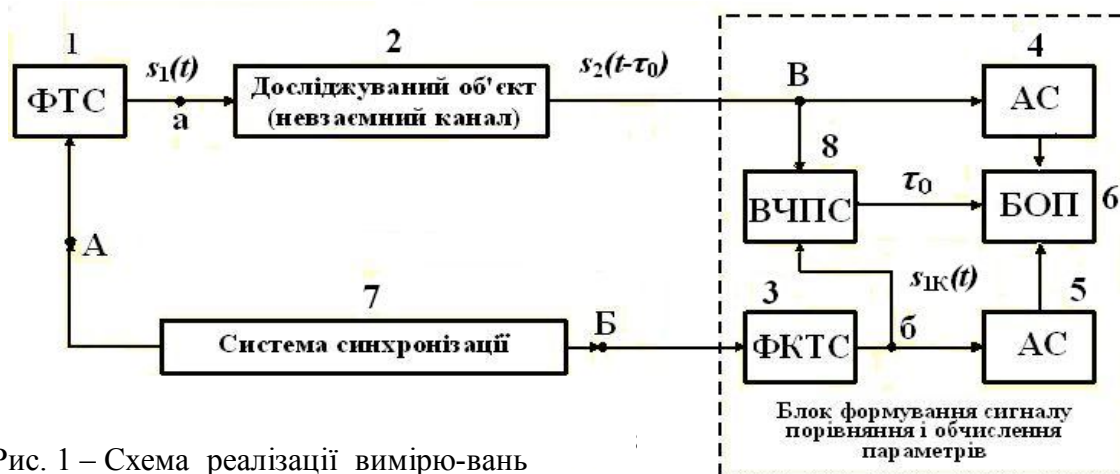
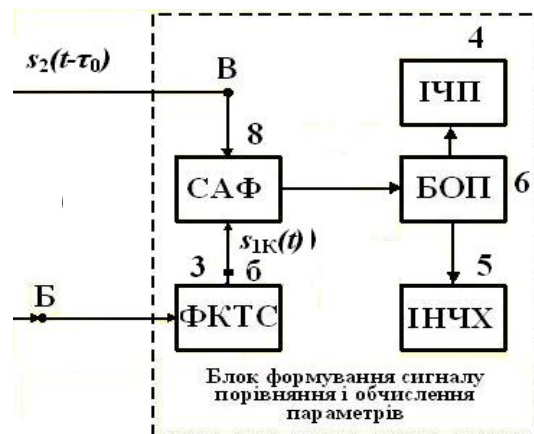


Рис. 1 – Схема реалізації вимірювань модифікованим методом спектрометрії: а) у разі спектрометрії сигналів; б) у разі селективної ампліфазометрії сигналів

ФТС – формувач тестового сигналу, ФКТС – формувач копії тестового сигналу, АС – аналізатор спектра, БОП – блок обчислення параметрів, 7 – система часової (фазової) синхронізації джерел тестового і копії тестового сигналів, ВЧПС – вимірник часу поширення сигналу, САФ – селективний ампліфазометр, ІЧП – індикатор часу поширення сигналу, ІНЧХ – індикатор нелінійності частотної характеристики



У разі часової (фазової) синхронізації сигналів $s_1(t)$ і $s_{1K}(t)$ формувачів 1 і 3, що забезпечується системою синхронізації 7, їх спектральні функції $\check{S}_1(\omega)$ і $\check{S}_{1K}(\omega)$ співпадають і частотна залежність комплексного коефіцієнта передавання ДО визначається як

$$\check{K}(\omega) = \check{S}_2(\omega) / \check{S}_{1K}(\omega) \rightarrow \left\{ K_{ДО}(\omega); \Psi_{ДО}(\omega) \right\}, \quad (4)$$

З урахуванням виразу (4), АЧХ $K_{ДО}(\omega)$ отримується за обчисленням співвідношення

$$K_{\text{ДО}}(\omega) = S_2(\omega)/S_{1K}(\omega) = A_2(\omega)/A_{1K}(\omega), \quad (5)$$

а ФЧХ $\Psi_{\text{ДО}}(\omega)$ визначається як

$$\Psi_{\text{ДО}}(\omega) = \arg[\tilde{S}_2(\omega)] - \arg[\tilde{S}_{1K}(\omega)] - \omega\tau_0 = -\omega\tau_0 + \psi_{n2}(\omega) - \psi_{n1K}(\omega). \quad (6)$$

У виразах (5) і (6) маємо частотні залежності наступних параметрів: обвідних амплітудних спектрів вихідного сигналу $A_2(\omega)$ ДО і копії тестового сигналу $A_{1K}(\omega)$; лінійної частини ФЧХ $\omega\tau_0$; нелінійної частини ФЧХ $\psi_{n2}(\omega) - \psi_{n1K}(\omega)$; нелінійності фазового спектра (ФС) вихідного сигналу ДО $\psi_{n2}(\omega)$; нелінійності ФС сигналу формувача 3 $\psi_{n1K}(\omega)$. Параметр τ_0 характеризує нахил лінійної частини ФЧХ відносно осі частот, тобто час поширення сигналу у досліджуваному об'єкті.

Залежно від методу отримання фазових параметрів: спектрометрії – 1а) або фазометрії – 1б), методика вимірювань і реалізація вимірювальної системи різні.

За методикою спектрометрії обчислення параметрів спектральних функцій $\tilde{S}_2(\omega)$ і $\tilde{S}_{1K}(\omega)$ забезпечується аналізаторами спектра 4 і 5. Їх вихідні сигнали подаються на входи блока обчислення параметрів 6. В ньому забезпечується визначення параметрів частотних характеристик відповідно з виразами (5) і (6).

Параметри АЧХ отримуються за порівнянням амплітудних спектрів вимірювального і копії тестового сигналів відповідно з виразом (5). Режим вимірювань є тривіальним і не потребує додаткових пояснень.

Інша ситуація має місце у разі визначенні параметрів ФЧХ. Залежно від того, які параметри ФЧХ підлягають визначенню, необхідно забезпечувати різні умови синхронізації сигналів.

Визначення параметрів повної ФЧХ. В цьому режимі необхідно забезпечувати абсолютну часову синхронізацію вхідного тестового $s_1(t)$ $s_{1K}(t)$ і копії тестового $s_{1K}(t)$ сигналів, що здійснюється системою синхронізації 7. Для обчислення повної ФЧХ з урахуванням її лінійної частини $\omega\tau_0$ необхідно окремо визначити затримку τ_0 вихідного сигналу $s_2(t - \tau_0)$ відносно сигналу $s_{1K}(t)$. Це здійснюється вимірником часових інтервалів (таймером) 8. В такому режимі час τ_0 проходження сигналу в ДО вимірюється прямо без обчислення за параметрами ФЧХ. Нелінійна складова ФЧХ отримується за порівнянням нелінійних складових фазових спектрів сигналів $s_2(t - \tau_0)$ і $s_{1K}(t)$. Повна ФЧХ обчислюється алгебраїчним підсумовуванням лінійної і нелінійної складових відповідно із виразом (6).

Перевагою такого режиму вимірювань є можливість роздільного одночасного визначення нелінійності ФЧХ (за порівнянням нелінійних скла-

дових ФС вимірювального сигналу і копії тестового) і прямого вимірювання часу поширення сигналу часовим методом. Але похибки вимірювань часу поширення можуть бути значними внаслідок розмитості вихідного сигналу від впливу частотних спотворень на його форму.

Визначення нелінійності ФЧХ. У разі визначення параметрів лише нелінійної складової ФЧХ немає потреби в часовій синхронізації сигналів $s_1(t)$ і $s_{1K}(t)$. Для цього потрібно забезпечувати ідентичність форм обвідних тестового зондувального $s_1(t)$ і копії тестового $s_{1K}(t)$ сигналів та часову синхронізацію (збіжність) „центрів тяжіння” вихідного $s_2(t-\tau_0)$ та копії тестового $s_{1K}(t)$ сигналів. Тому останній має бути затриманий у часі відносно зондувального сигналу на τ_0 , що може бути забезпечено запуском формувача 3 вихідним сигналом ДО (в системі рис. 1 вхід ФКТС 3 (точка ”Б”) переміщується на вихід ДО в точку ”В”).

Амплітудні і фазові вимірювання з використанням сигналів дискретних множин частот (ДМЧ) генераторів гармонік. Якщо використовуються вимірювальні сигнали з дискретними спектрами, для визначення параметрів ЧХ доцільно застосовувати *метод ампліфазометрії* з використанням селективних вимірників амплітуд і фаз. В цьому разі немає потреби у прямому вимірюванні часу поширення сигналу в ДО, тому що АЧХ і повна ФЧХ визначаються за гармоніками сигналів, що попадають у смугу прозорості ДО, а час поширення сигналу визначається опосередковано через значення τ_0 тангенса кута нахилу лінійної частини повної ФЧХ до осі частот.

Узагальнена структурна схема для цього режиму вимірювань відрізняється від схеми на рис. 1а у частині побудови блоку формування сигналу порівняння і обчислення параметрів (див. рис. 1б). Тут вимірник амплітуд і фаз (ампліфазометр) 8 виконує функції порівняння амплітуд і фаз однойменних частотних компонентів ДМЧ сигналів $s_2(t-\tau_0)$ і $s_{1K}(t)$. Результати вимірювань передаються в блок 6 обчислення параметрів, який забезпечує визначення нерівномірності АЧХ, нелінійності та нахилу лінійної ФЧХ, а їх індикація здійснюється блоками 4 і 5.

Особливості формування сигналів і роботи вимірювальних систем в цьому разі такі. Зондувальний і опорний сигнали формуються окремими генераторами ДМЧ, які розміщені у просторово рознесених пунктах. Для забезпечення когерентності однойменних компонентів їх сигналів запуск генераторів потрібно здійснювати сигналами з однаковим періодом слідування. Враховуючи потребу щодо фазування сигналів у широкій смузі частот, найбільш прийнятним є варіант формування тестового і опорного сигналів методом багаточастотного широкосмугового множення частоти і створення таким чином *спектральних розкладів* сигналів ДМЧ за допомо-

гою відеоімпульсних або радіоімпульсних генераторів гармонік.

Особливості і позитивні якості такого підходу такі. Оскільки використовується періодична послідовність відеоімпульсів, це забезпечує подолання обмежень щодо швидкодії поширених методики вимірювань з перебудовуванням частоти зондувального сигналу; інформація щодо АЧХ і ФЧХ досліджуваного об'єкта зосереджена у кожному імпульсі зондувального сигналу. Це також спрощує умови фазової синхронізації просторово рознесених джерел тестового 1 і копії тестового 3 сигналів, оскільки часова (фазова) синхронізація однойменних гармонік джерел у всій смузі частот забезпечується за умови контролю синфазності лише на одній або двох гармоніках [19]. У разі формування сигналів ДМЧ відносно носійної частоти вперше забезпечується можливість прямого вимірювання параметрів фазочастотної характеристики ДО, у яких відбувається зміщення частоти вихідного сигналу відносно частоти вхідного [18], наприклад, каналів передавання з несинхронним гетеродинним обладнанням. Додаткові можливості щодо підвищення швидкодії і точності вимірювань та розширення функціональних можливостей реєстрації параметрів АЧХ і ФЧХ і зручності одночасного спостереження їх на екрані індикаторів дає підхід, заснований на вимірюванні відносно двох опорних сигналів, які є копіями вхідного тестового сигналу [20-22].

Методичні похибки визначення параметрів у разі застосування модифікованого методу спектрометрії обумовлені неідентичністю АС і ФС просторово рознесених джерел тестового і копії тестового сигналів та похибками фазової синхронізації цих сигналів. Це передбачає формування широкосмугових сигналів з ідентичними спектральними характеристиками і створення відповідних систем фазової синхронізації просторово рознесених джерел цих сигналів. Швидкодійні релаксаційні генератори на тунельних діодах, лавинних транзисторах і діодах з накопиченням заряду забезпечують формування багаточастотних сигналів з високою ідентичністю спектрів, за якою похибки визначення нерівномірності АЧХ становлять частки дБ; нелінійності ФЧХ – одиниці і частки градусів [17]. Також розроблено нові системи фазової синхронізації просторово рознесених генераторів [23-28]. Показано, що похибки фазової синхронізації обумовлені, головним чином, електричною неузгодженістю вузлів розвиненого фідерного тракту систем синхронізації [29]. Для реальних значень модулів Γ коефіцієнту відбиття на стиках трактів, які становлять $\Gamma = 0.01-0.025$, потенційно досяжна точність фазової синхронізації на частоті синхросигналу становить $1-1.5^\circ$. У цьому разі точність визначення часу поширення сигналу становить одиниці і частки наносекунд [17].

3. Традиційна і просторова фазометрія в завданнях визначення динаміки фазової структури радіоімпульсних сигналів

Методи традиційної і просторової фазометрії використовуються під

час технічних та екологічних вимірювань, оскільки забезпечують можливість та високу точність визначення внутрішніх швидкоплинних процесів в різноманітних радіоелектронних і енергетичних засобах, просторових координат і контурів неоднорідностей та „плям” на забруднених територіях, координат джерел електромагнітного випромінювання та рухомих об'єктів, у разі створення радіоелектронних енергетичних засобів для фокусованого підсумовуванні в заданій точці простору потужностей багатьох окремих просторово рознесених джерел випромінювання [4-7].

Під час контролю стану швидкоплинних технологічних процесів особливістю фазових вимірювань є те, що потрібно визначати внутрішню фазову структуру радіоімпульсних сигналів, що передбачає періодичне багатократне вимірювання різниці фаз сигналів протягом тривалості імпульсу. Частота заповнення імпульсів, зазвичай, становить десятки-сотні МГц, тривалість – десятки і сотні мкс, а час звертання до сигналів у разі багатократних вимірювань не має перевищувати одиниці мкс. Також потрібно забезпечувати роздільну здатність вимірів $\leq 1^\circ$ в умовах амплітудного динамічного діапазону сигналів у десятки (40-60) дБ. З точки зору фазометрії така ситуація є надзвичайною, оскільки потрібно з високою точністю визначати миттєве значення різниці фаз протягом короткого проміжку часу, тривалість якого може становити одиниці періодів сигналу заповнення. Під час спостережень процесів в просторово розвинених системах і комплексах багатократні імпульсні вимірювання різниць фаз потрібно виконувати в просторово рознесених пунктах, кількість яких може становити від одиниць до десятків і сотень.

Отже, як і під час вимірювання параметрів ЧХ просторово розвинених об'єктів, в даних ситуаціях виникають аналогічні завдання фазометрії, а саме: 1) забезпечення фазованої розводки вузькосмугових чи широкосмугових сигналів у багато просторово рознесених пунктів (або створення систем єдиного часу); 2) створення багатоканальних фазовимірювальних систем для швидкого вимірювання різниць фаз радіоімпульсних сигналів у просторово рознесених пунктах.

Фазова розводка опорних сигналів може бути забезпечена відомими [4, 5 і ін.] і новими засобами фазової синхронізації [23-28]. Для завдань швидкодіючої радіоімпульсної фазометрії було запропоновано новий спосіб вимірювання різниці фаз [30], який дозволяє вирішити проблему створення низки швидкодіючих багатоканальних фазовимірювальних пристроїв підвищеного частотного і значного динамічного діапазонів, здатних забезпечити вимірювання миттєвої різниці фаз у сучасних фазових системах і комплексах спеціального призначення [31-33].

4. Амплітудна і фазова спектрометрія у завданнях імпедансометрії і імпедансної томографії біологічних і природних об'єктів

В останні десятиліття розвиваються методи визначення параметрів і стану технічних, природних і біологічних об'єктів за ЧХ електричного імпедансу [8, 9, 34, 35 і ін.]. Можливість визначення фізіологічного стану, пошарового складу та структури таких об'єктів ґрунтується на залежності параметрів комплексного електричного імпедансу (модуля, активної і реактивної складових) та часу (швидкості) проходження сигналу від цього стану. Структури об'єктів у своєму складі мають різні компоненти із різним ступенем провідності (провідники електроліти, діелектрики і напівпровідники). Їх електричний опір є комплексним з переважно ємнісною реактивністю і залежить від проходження процесів у об'єктах. Для провідності також характерні чітко визначені дисперсні властивості і залежність її параметрів від частоти. Тому значення провідності, її частотні властивості, динаміка параметрів у часі і просторі є ознаками, що дозволяють визначати фізичний та фізіологічний стан об'єктів, контролювати відхилення від норми, діагностувати різні патології.

Оскільки електричні характеристики мають високу залежність від частоти, бажано визначати імпеданс у всій смузі частот, зокрема з використанням методології широкосмугової спектрометрії. У разі дослідження біологічних об'єктів пропонують також застосовувати і тричастотний метод [36], який, на думку його прихильників, має таку ж інформативність, але спрощує процес визначення частотного розподілу імпедансу. Проте, як показано в [37], використання тричастотного методу має сенс лише під час дослідження однорідних об'єктів. У разі неоднорідних об'єктів для забезпечення високих швидкодії і достовірності отримання інформації доцільно використовувати методологію широкосмугової амплітудної і фазової спектрометрії.

За розподілом електропровідності можна отримати зображення структури і визначити осередки неоднорідностей. Наявність зв'язаних зарядів дозволяє отримувати зображення відносно діелектричної проникності. Метод базується на зміні траєкторій ліній провідності об'єктів залежно від провідності структур, що знаходяться на шляху проходження струму. Він запропонований у 70-80 роки 20-го століття і одержав назву методу *імпедансної томографії*, а у випадку дослідження біологічних структур – *томографії прикладених потенціалів* [34, 35].

Підвищена увага до цього методу томографії обумовлена тим, що створення відповідних систем і виконання діагностичних технологій потребує значно менших фінансових і матеріальних витрат порівняно з інши-

ми методами, практичною нешкідливістю для людей. При цьому зчитування даних може виконуватись досить швидко, що дозволяє застосовувати даний метод для дослідження динамічних змін внутрішнього стану об'єктів в реальному масштабі часу. Оскільки варіації питомої провідності різних об'єктів (насамперед біотканин), а також об'єктів у різному стані значно відрізняються, метод є досить чутливим, особливо щодо визначення стану гідратності.

Геофізична (природна) томографія відрізняється від біологічної як за масштабами фізичних явищ, так і за геометричними характеристиками сканування. Розміри об'єктів і відстані є значно більшими, просторове розрізнення образів коливається від сантиметрів до десятків метрів. Конструкції вимірювальних засобів мають забезпечувати можливість змінювання геометрії сканування. При реалізації методів відеомпульсної локації для досліджень використовуються мілісекундні імпульси, максимальна тривалість яких повинна бути в декілька разів менше тривалості часу приходу відбитого сигналу. Довжина окремих променів при цих дослідженнях може бути від 1 м до 1 км. Зареєстровані сигнали несуть інформацію про зміни амплітуди (внаслідок згасання), час і швидкість їх поширення. Можливі області застосувань такі: пошук підземних трубопроводів і інших комунікацій, виявлення порожнин, ослаблених зон перед вибоєм, обстеження ядерних реакторів і сховищ відпрацьованого ядерного палива, проведення картування в шахтах, визначення земельних шарів, розривних порушень, оцінка запасів води, нафти, газу.

Особливості досліджень таких природних і біологічних об'єктів при визначенні їх часових і частотних характеристик полягають у тому, що:

- а) *об'єкти є невзаємними*, оскільки вони мають неоднорідні структури, зазвичай, з нечітко визначеними звивистими межами, що призводить до багатопроменевості проходження сигналів; невзаємність також обумовлена і розтіканням струмів не лише за площиною (як це має місце, наприклад, у рентгенівській томографії), а й по об'єму; невзаємність проявляється також і в тому, що при наявності в об'єктах течій (наприклад струму крові в судинах, рідинних течій у підземних шарах) провідність за течією і в зворотному напрямку є різною;
- б) в багатьох випадках, особливо це характерно для біологічних структур, вони можуть виявляти *нелінійні властивості*, тому необхідно обмежувати рівні зондувальних струмів і забезпечувати відповідний пікфактор цих сигналів; крім того може відбуватись зміщення частоти вихідного сигналу відносно вхідного;
- в) наявність провідних і діелектричних неоднорідностей обумовлює необхідність визначення не лише модуля (або активної складової, як це має місце при „резистивній” томографії [37, 38]), а й *всіх складових комплексного імпедансу*; г) внаслідок ди-

сперсійних властивостей зазначених об'єктів визначення їх характеристик потрібно виконувати *в широкій смузі частот*.

Зазначені особливості зумовлюють необхідність подальшого розроблення засобів визначення **всіх параметрів** комплексного електричного імпедансу, розширення частотного діапазону, підвищення швидкодії і точності вимірювальних засобів. В цьому сенсі доцільно використовувати методи амплітудних і фазових вимірювань для отримання ЧХ модуля і аргументу імпедансу з наступним обчисленням всіх його параметрів. Це також, як і у випадках дослідження ЧХ просторово розвинених каналів зв'язку і визначення стану навколишнього середовища, вимагає створення у багатьох просторово рознесених пунктах синфазних опорних сигналів, відносно початкових фаз яких можна вимірювати фазові параметри сигналів імпедансометричної томографічної системи, зокрема ґрунтуючись на засадах просторово розвинених швидкісних амплітудних і фазових спектральних вимірювань.

5. Пульсова амплітудна і фазова спектрометрія

Для сучасного суспільства характерним є поширення багатьох захворювань, особливо серцево-судинної системи і насамперед – гіпертонічної хвороби та ішемічного захворювання серця. Не зважаючи на значні успіхи медицини, смертність від ішемічної хвороби серця значно зростає, помітно її омолодження. Тому виправданим є бажання виконувати заходи профілактики захворювань якомога раніше, що передбачає проведення моніторингових і скринінгових обстежень всього населення для виявлення проявів відхилень від нормального стану на ранніх стадіях (в стані *передхвороби*), та відстеження стану *здоров'я*.

Особливістю отримання діагностичних часових і частотних параметрів при визначенні функціонального стану людини є те, що зовнішні зондувальні сигнали використовувати, здебільшого, неможливо. Але серце саме формує пульсовий сигнал, який є майже періодичною функцією часу, що є підставою для використання методу періодичної пульсової спектрометрії для отримання частотних, спектральних і часових параметрів систем і органів організму безпосередньо при функціонуванні останніх.

Результати електричного моделювання ділянок судинних систем, аналізу залежності АЧХ і ФЧХ цих ділянок від показників судинного стану і реологічних властивостей крові та впливу змін АЧХ і ФЧХ на спектральні характеристики пульсових сигналів і форму пульсової хвилі, що одержані в працях [40-46], показують можливість оцінювати стан серцевої і судинної системи за змінами спектральних характеристик пульсових сигналів.

В цьому сенсі слід відмітити особливості отримання сигналів порівняння під час пульсової функціональної діагностики стану системи гемодинаміки. Традиційно у медичній діагностиці під час вимірювання за опорний сигнал обирається пульсограма сонної артерії. Але, як показано в

[43], внаслідок того, що фактично вимірювання здійснюються за порівнянням спектральних характеристик пульсових сигналів різних регіональних ділянок судинної системи, параметри ЧХ яких у загальному випадку є незалежними і можуть різноспрямовано змінюватись при зовнішніх і внутрішніх фізіологічних впливах [40], сигнал пульсу сонної артерії можна лише умовно вважати опорним. Інтерпретація стану судинних ділянок за станом ЧХ в цьому випадку ускладнена. Тому за сигнали порівняння слід обирати пульсові сигнали, що реєструються на початку ділянки судинної системи, яка досліджується. У разі оцінювання стану судинної системи за параметрами лише периферичної ПХ запропоновано використовувати такі параметри порівняння. Зміни АС слід оцінювати у відносних одиницях – до рівня першої гармоніки [41]. Для діагностичної оцінки стану гемодинаміки за фазовим спектром слід виконувати аналіз нелінійної складової ФС і отримувати *часові параметри фазового спектра* які еквівалентні відносному груповому або фазовому часу запізнювання [42]. У разі визначення параметрів тиску на основі запропонованого методу *пульсової просторової кореляційно-спектральної осцилометрії* [44] опорний сигнал порівняння одержується або вище від оклюзійної манжети, або із іншого органу.

Основні результати досліджень

Швидке визначення стану серця, судин і вегетативної нервової системи за амплітудним спектром коротких реалізацій пульсового сигналу. У цьому разі використовується інформація, що міститься в амплітудному спектрі відносно невеликих за тривалістю (коротких) реалізацій квазіперіодичного сигналу пульсової хвилі (ПХ), зареєстрованих як з центральних артерій, так і на периферії [41, 47, 48]. Під "короткою" розуміється реалізація пульсового сигналу, тривалість якої є суттєво меншою, ніж загальноприйнята базова вибірка у 100 і більше кардіоциклів. Верифікація цих положень здійснювалась шляхом експериментального дослідження залежності параметрів АС дії фізіологічних тестових впливів різного характеру. Виконувались також досліди у реанімаційному відділенні лікарні з метою визначення дії лікарських засобів для післяопераційного знеболення [46]. Доведено, що за проявом окремих складових, ступенем і характером розмитості АС можна визначати рівень і характер аритмії, вплив дихальної і повільних хвиль, тобто в реальному масштабі часу відстежувати стан і динаміку вегетативного гомеостазу, визначати стан „хвороби” і „передхвороби”. Слідкуючи за рівнями та зміною співвідношень амплітуд окремих трансформант АС, можна спостерігати за станом серцевого та судинного компонентів системи гемодинаміки. Спектральний аналіз дає інтегральну характеристику сигналу обраної реалізації незалежно від форми ПХ, що знижує втрати інформації і розширює можливості діагностики.

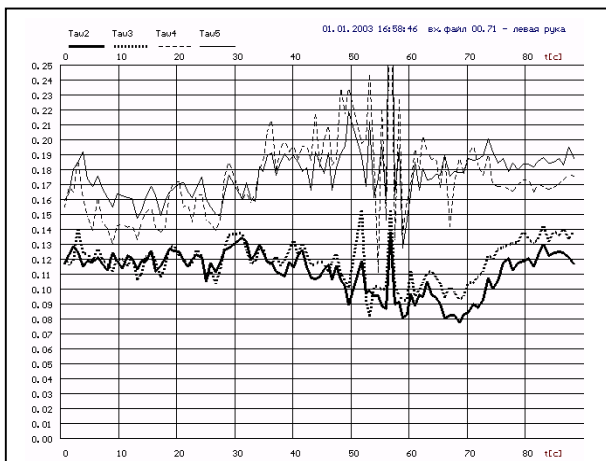


Рис. 2 – Тест на затримку дихання

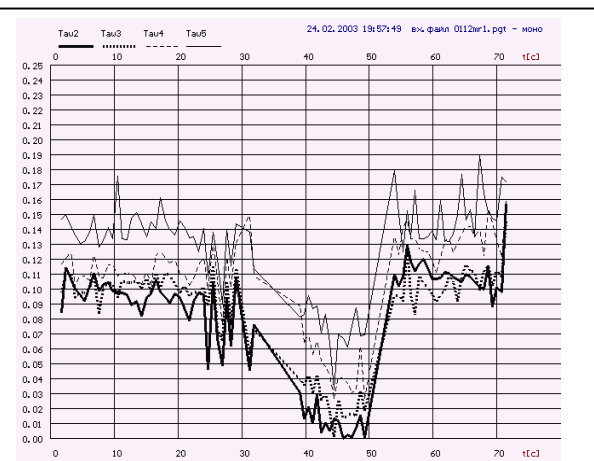


Рис. 3 – Тест на зміни положення руки з навантажем

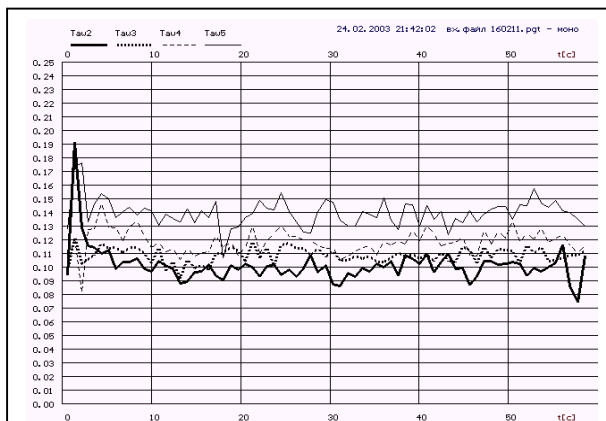


Рис. 4а – До куріння

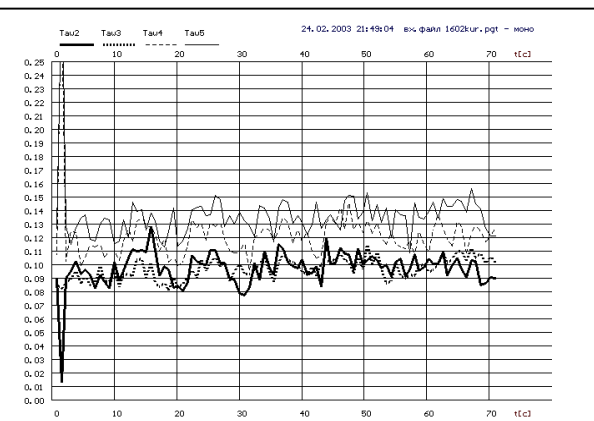


Рис. 4б – Після куріння

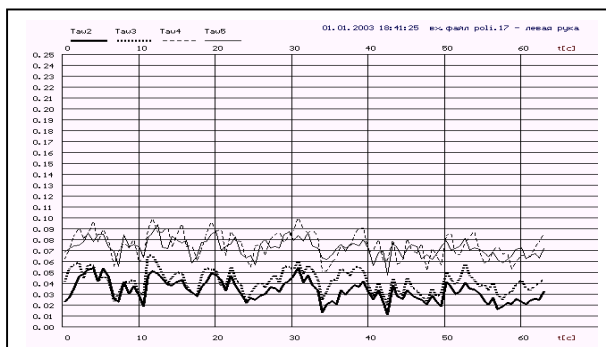


Рис. 5а – Ліва рука

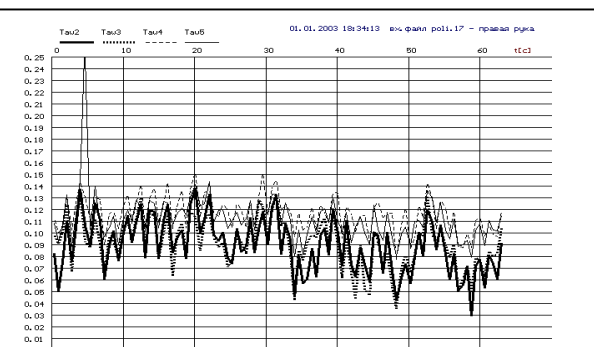


Рис. 5б – Права рука

Визначення стану серця, судин і вегетативної нервової системи методом фазової пульсової спектрометрії [42]. Для контролю фізіологічного стану запропоновано використовувати новий для гемодинаміки часовий параметр τ_r ФС. Він має розмірність часу і визначається аналогічно груповому ($\tau_{rГ}$) або фазовому ($\tau_{rФ}$) часу запізнювання як $\tau_r = \Delta\varphi_r / \Delta\omega_r$, де $\Delta\varphi_r$ – приріст фазового спектра на ділянці частотного діапазону $\Delta\omega_r$.

На рис. 2-6 наведені приклади, що ілюструють результати досліджень, які одержані за допомогою розробленої двоканальної системи фотоплетизмографії „Пульс-Ф” [48]. Пульсові хвилі реєструвалися з пальців рук. На рисунках показано змінюваність $\tau_{r\phi}$ за чотирма гармоніками пульсового сигналу (2-ї, 3-ї, 4-ї і 5-ї у разі визначення їх початкових фаз відносно фази 1-ї гармоніки). На горизонтальній шкалі відкладено час у секундах; ціна одної поділки відповідає проміжку у 10 секунд. Вертикальна шкала показує значення величини τ_r ; ціна поділки становить 0,01 секунди. Інтерпретація зв'язку між змінами параметрів ФС периферичних пульсограм і змінами стану системи гемодинаміки заснована на результатах аналізу ФЧХ ділянки судинної системи, одержаних в [40].

Рис. 2 характеризує залежність $\tau_{r\phi}$ у під час тесту на затримку дихання. Проміжок часу від 0-ї до 25-ї секунди характеризує вихідне становище до тестування. В період з 25-ї до 70-ї секунди виконувалась затримка дихання (на вдиху). З 70-ї секунди дихання відновлювалося. На рис. 3 наведені результати тесту на зміну положення руки, що утримує вагу в 0.5 кілограма, із горизонтального у вертикальне (вгору) і назад. До 25-ї секунди рука з вагою знаходилась у горизонтальному стані, лежачи на столі. З 25-ї до 50-ї секунди вона знаходилась у вертикальному стані, зігнутою у ліктьовому суглобі, а з 50-ї секунди була знов переведена у горизонтальний стан. На рис. 4а і 4б наведені результати тесту на куріння.

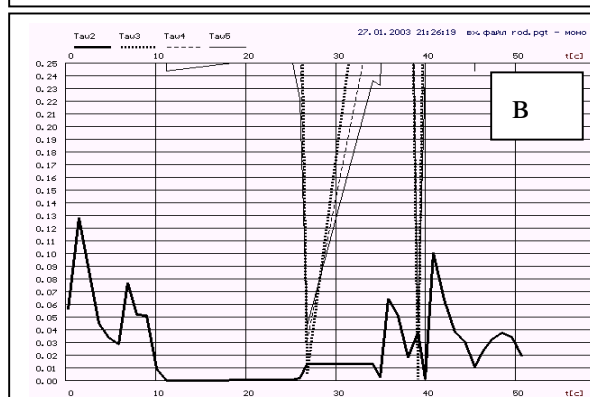
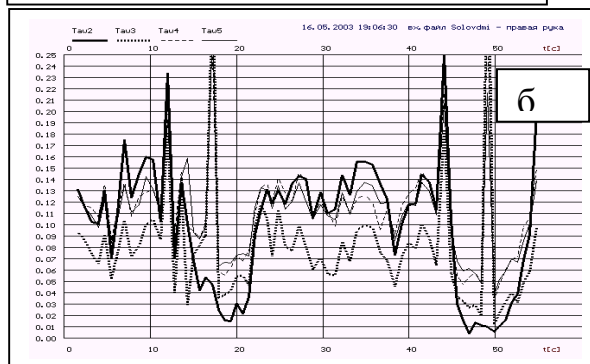
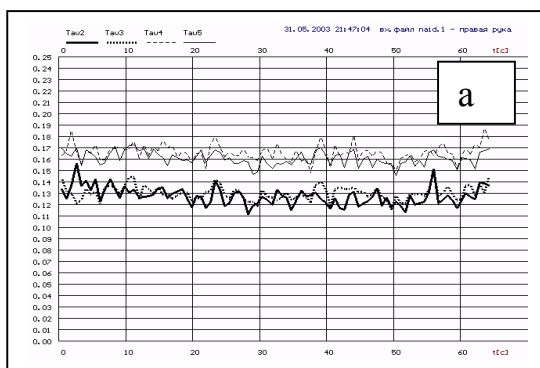
На всіх рисунках добре помітні зміни величин $\tau_{r\phi}$ на різних гармоніках у різні проміжки часу. Вони характеризують перехідні процеси у системі гемодинаміки у ділянках частотного діапазону. Видно також ступінь визначеності і характер аритмії, що спостерігається на рівнях відхилення і характері варіабельності характеристик τ_r . Рівень τ_r характеризує крутість ФЧХ і значення характеристичної частоти судинної системи ω_p [40].

На рис. 5 показано відмінність судинних систем кінцівок. Це проявляється у відмінному характері коливальних складових, різних рівнях параметрів τ_r і їх співвідношень на різних гармоніках. Радикально відмінним є характер параметрів у разі навантаження однієї кінцівки; під час тестування характер динаміки τ_r лівої руки майже не змінився, в той час як динаміка змін τ_r правої кінцівки визначена радикально (вона показана на рис. 3).

На рис. 6 наведені характерні приклади різновидів часової динаміки параметрів τ_r (фрактали спектрів) різних людей у спокійному стані. Вони характеризують можливості визначення різновидів (кластерів) станів напруженості ВНС і ССС. а рис. 6а змінюваність τ_r простежується слабо, що характеризує значну напруженість ВНС. На рис. 6б навпаки простежується дуже мінлива динаміка параметрів τ_r у спортсмена (пауерліфтинг). На рис. 6в наведені характеристики τ_r людини у стані передхвороби. Простежується нетипова варіабельність τ_r без визначеності періодичності коливальних складових (надзвичайно сильна аритмія); на рисунку простежується лише крива $\tau_{r\phi_2}$ для 2-ї гармоніки, а рівні $\tau_{r\phi}$ для інших гармонік виходять за межі типового поля визначеності $\tau_{r\phi}$. Це свідчить про надзвичайно високу аномальну крутість ФЧХ судинної системи.

Просторова кореляційно-спектральна ампліфазова осцилометрія. Для завадостійкого вимірювання артеріального тиску (АТ) в умовах дії завад і артефактів запропоновано принципово новий підхід до визначення АТ і розроблено новий метод просторової кореляційно-спектральної осцилометрії [44]. Він полягає у процедурі кореляційно-спектрального порівняння двох просторово рознесених пульсових сигналів. Критерії визначення моментів часу, в які тиск в манжеті відповідає параметрам АТ, ґрунтується на аналізі змін параметрів нормованої взаємкореляційної функції (ВКФ) $b(\tau) = cov[S_1(t), S_2(t - \tau)] / (\sigma_1 \sigma_2)$, де $S_1(t)$, $S_2(t)$ – основний вимірювальний і опорний пульсові сигнали; σ_1 , σ_2 – середньоквадратичні відхилення цих сигналів; τ – інтервал їх кореляції.

Для підвищення точності і достовірності визначення параметрів АТ запропоновано використовувати також інші нові критерії зв'язку просторово рознесених пульсових сигналів [49-50]. Ці критерії отримуються за аналі-



а – стабільний ритм;
 б – дуже мінлива динаміка $\tau_{r\phi}$ у спортсмена;
 в – стан передхвороби

Рис. 6 – Фрактали $\tau_{r\phi}$

зом зміни у часі автокореляційної функції (АКФ) вимірювального і опорного сигналів, бічних максимумів АКФ і ВКФ (які є наслідком майже періодичної форми пульсових сигналів), дійсної і уявної частин взаємного спектра сигналів основного і опорного каналів, лінійності зв'язку сигналів за допомогою функції когерентності, залежності ЧХ уявного кола передачі між точками реєстрації рознесених вимірювального і опорного сигналів.

6. Приклади створення і застосування діагностичних систем ампліфазометрії і ампліфазової спектрометрії

На основі методології просторових амплітудних і фазових вимірювань створено ряд нових засобів, які були використані для діагностики стану об'єктів різної фізичної природи.

1. За результатами досліджень, що описані у працях [12-22], створено системи для прямого роздільного визначення параметрів АЧХ, нерівномірності і повного приросту лінійної частини ФЧХ невзаємних кабельних каналів зв'язку (в тому числі з несинхронними гетеродинним обладнанням) довжиною до 25 кілометрів зі смугою частот 30% відносно центральної робочої частоти, які забезпечують визначення часу поширення широкосмугового сигналу з похибкою не більше 5 нс, амплітудні і фазові спотворення сигналів з похибками не більше 0.5 дБ і 1-2° відповідно.

2. За результатами досліджень, що описані у працях [19-29], створено системи фазової синхронізації просторово рознесених джерел гармонічних та багаточастотних сигналів для вимірювальних систем з просторовим рознесенням пунктів фазування на відстані до 25 (75) км і похибкою фазування контрольних сигналів не більше 1.5°.

3. Створено системи для визначення фазової структури коротких радіоімпульсних сигналів (одиниці мкс) [51]. Частота заповнення радіоімпульсів – фіксована метрового діапазону; тривалість імпульсів – 50-100 мкс; досліджувані імпульси можуть бути одиничними і періодично повторюваними; час звертання до сигналу – 1 мкс; кількість вимірів протягом імпульсу не менше 10; розрізняльна здатність вимірів – 0.3 - 0.5°; похибка вимірів $\leq \pm 1.2^\circ$.

4. Створено комплекс апаратури для забезпечення вимірювання різниць фаз радіоімпульсних сигналів проміжної частоти в діапазоні 1...16 МГц з похибками вимірювань різниці фаз не більше 1.5° при часі звертання системи до сигналу для одержання вимірювальної інформації не більше 1 мкс [52, 53]. Сукупно із просторово розвиненими системами фазової синхронізації [19-29] цей комплекс забезпечує можливість вимірювання різниць фаз сигналів у багатьох пунктах, просторово рознесених на відстані у одиниці і десятки кілометрів; кількість таких пунктів може становити десятки і сотні.

5. Створено засоби визначення частотних залежностей параметрів (модуля, активної і реактивної складових) комплексного електричного імпе-

дансу біологічних тканин і органів для діагностики стану біогідратності. Діапазон вимірюваних параметрів – 5...2000 Ом, частотний діапазон (фіксовані частоти): 20, 100, 250, 500 кГц [54-55]. Ідеологія вимірювань може бути використана для створення імпедансних томографів.

6. Створено засоби визначення стану серцево-судинної системи і напруженості вегетативної нервової системи (стану стресу) за параметрами АС коротких реалізацій сигналу пульсової хвилі (система „Пульс-1.0) [47], за параметрами ФС сигналу пульсової хвилі (система „Пульс-Ф”) [48]. Робочий діапазон хвиль первинних вимірювальних перетворювачів – інфрачервоний (~ 800 нм). Кількість вимірювальних каналів – 2. Смуга частот пульсового сигналу – 0.04...40 Гц. Частота дискретизації від 50 до 500 Гц.

7. Верифіковано ідеологію достовірного визначення параметрів артеріального тиску в несприятливих умовах дії завад і артефактів на основі нових амплітудно-часових і частотних критеріїв визначення параметрів тиску [44, 49-50]. Вперше неінвазивно був визначений АТ в екстремальних умовах ходьби з навантаженням до 475 Вт [45], де в експерименті пристрій продемонстрував працездатність в 79% вимірювань в умовах, коли застосування інших неінвазивних методів взагалі неможливо.

Висновки

Завдання підвищення точності і швидкодії одержання часових і частотних параметрів під час визначення структури, складу та функціонального стану просторово розвинених динамічних об'єктів різної фізичної природи вирішуються розробленням нових методів та просторово розвинених систем швидкісної ширококугової ампліфазометрії, амплітудної і фазової спектрометрії. Ефективність розроблених методів та засобів підтверджена реалізацією на їх основі вимірювально-діагностичних технологій і систем оцінювання стану технічних і біологічних об'єктів, які пройшли успішні випробовування і впроваджені у практику діагностичних досліджень.

Розроблені основи побудови вимірювальних систем підвищеної точності й достовірності можуть і надалі використовуватись під час розробки нових засобів визначення місцезнаходження нерухомих і рухомих об'єктів, характеристик трактів передачі сигналів, стану навколишнього середовища, структури і пошарового складу об'єктів, створення сучасних радіоелектронних енергетичних комплексів тощо.

Література

1. Скрипник Ю.О., Головка Д.Б. Методи і засоби частотно-дисперсійного аналізу речовин та матеріалів. Фізичні основи. – К.: ФАДА, ЛТД, 2000. – 200 с.
2. Бакланов И.Г. Тестирование и диагностика систем связи. – М.: Эко-Трендз, 2001. – 264 с.
3. Кириллов В.И. Многоканальные системы передачи: Учебник. – М.: Новое знание, 2002. – 751 с.
4. Многопозиционные радиотехнические системы / В.С. Кондратьев, А.Ф. Котов, Л.Н. Марков / Под ред. В.В. Цветнова. – М.: Радио и связь, 1986. – 264 с.

5. Есин С.В., Каганов В.И. Системы автоматического фазирования в передающих ФАР и устройствах сложения мощности СВЧ сигналов // Зарубежная радиоэлектроника. – 1986. – № 8. – С. 39–48.
6. Литовкин В. Накануне Ванкувера Россия предлагает США совместный эксперимент с плазменным оружием // Известия. – 1993. – № 61(23916). – С. 1-2.
7. Ли Т. Применение переходных электромагнитных процессов в электроразведке // ТИИЭР. – 1979. – Т. 67, № 7. – С. 47-53.
8. Корженевский А.В. Бесконтактная томография электропроводящих сред квазистатическим переменным электрическим полем // Радиотехника и электроника. – 2004. – Т.49, № 6. – С. 761-766.
9. Гуляев Ю.В. Физические поля и излучения человека: новые методы ранней медицинской диагностики // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2000. – № 12. – С. 3-10.
10. Вимірювання різниці фаз у радіоелектроніці / М.Т. Бова, В.О. Гойжевський, С.М. Маєвський, В.В. Молебний –К.: Вища школа, 1972. – 232 с.
11. Баженов В.Г. Исследование и разработка методов и аппаратуры для автоматического измерения фазового времени задержки сигналов в линии связи: Дис... канд. техн. наук: 05.11.05 – К., 1981. – 237 с.
12. Гойжевский В.А., Трилис В.Г., Шарпан О.Б. Исследование группового времени задержки тракта с помощью многочастотного сигнала // Вестник КПИ. Сер. Радиотехники и электроакустики. – 1975. – №12. – С. 146-147.
13. Гойжевский В.А., Дворский В.Я., Трилис В.Г., Шарпан О.Б. Исследование линейных четырехполюсников с помощью дискретного множества частот // Радиотехнические измерения в физических исследованиях. – М.: Наука. – 1977. – С. 57-59.
14. Способ измерения параметров фазочастотной характеристики четырехполюсника: А.с. 435491 СССР, МКИ G 01r 29/00. / В.А. Гойжевский, В.Г. Трилис, О.Б. Шарпан (СССР). – №1789694/10-10; Заявлено 29.05.72; Опубл. 05.07.74, Бюл. № 25. – 2 с.
15. Измеритель параметров фазочастотной характеристики четырехполюсника: А.с. 516970 СССР, МКИ G 01r 25/00. / В.А. Гойжевский, В.Г. Трилис, О.Б. Шарпан (СССР). – № 2083641/21; Заявлено 10.12.74; Опубл. 05.06.76, Бюл. № 21. – 3 с.
16. Измеритель параметров фазочастотной характеристики четырехполюсника: А.с. 573777 СССР, МКИ G 01r 29/00. / В.А. Гойжевский, А.Ф. Левина, Н.И. Маглеванная, В.А. Разборский, В.Г. Трилис, О.Б. Шарпан (СССР). – № 2353804/21; Заявлено 26.04.76; Опубл. 25.09.77, Бюл. № 35. – 3 с.
17. Шарпан О.Б. Дослідження частотних і часових характеристик протяжних невзаємних об'єктів модифікованим методом спектрометрії // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2005. – № 2 (31). – Том 1. – С. 144–149.
18. Измеритель параметров амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик четырехполюсников: А.с. 678686 СССР, МКИ H 04 B 3/46. / В.А. Гойжевский, В.Г. Трилис, О.Б. Шарпан (СССР). – № 2560095/18-09; Заявлено 26.12.77; Опубл. 05.08.79, Бюл. 29. – 2 с.
19. Шарпан О. Б., Маглеванная Н. И. Фазирование многочастотных сигналов пространственно разнесенных генераторов гармоник // Радиоэлектроника (Изв. высш. учеб. заведений). – 1983. – Т. 26, № 9. – С. 62–64.
20. Измеритель параметров фазочастотной характеристики четырехполюсника: А.с. 1002983 СССР, МКИ G 01 R 27/28. / В.Я. Дворский, О.Б. Шарпан (СССР). – № 3339789/18-21; Заявлено 28.09.81; Опубл. 07.03.83, Бюл. № 9. – 3 с.
21. Измеритель параметров фазочастотной характеристики четырехполюсника: А.с. 1190306 СССР, МКИ G 01 R 27/28. / В.Я. Дворский, О.Б. Шарпан (СССР). – № 3629536/24-21; Заявлено 27.07.83; Опубл. 07.01.85, Бюл. № 41. – 4 с.

-
22. Измеритель параметров фазочастотной характеристики четырехполюсника: А.с. 1241157 СССР, МКИ G 01 R 27/28 . / В.Я. Дворский, О.Б. Шарпан (СССР). – № 3717618/24-21; Заявлено 02.04.84; Оpubл. 30.06.86, Бюл. № 24. – 4 с.
23. Устройство для взаимного фазирования: А.с. 1172051 СССР, МКИ H 04 L 7/08. / О. Б. Шарпан (СССР). – № 3494292/18-09; Заявлено 29.09.82; Оpubл. 07.08.85, Бюл. 29. – 3 с.
24. Устройство взаимного фазирования: А.с. 1288908 СССР, МКИ H 03 L 7/00. / А. Ф. Левина, Н. И. Маглеванная, О. Б. Шарпан (СССР). – № 3900525/24-09; Заявлено 23.05.85; Оpubл. 07.02.87, Бюл. 5. – 3 с.
25. Устройство фазирования сигналов в пространственно разнесенных пунктах: А.с. 1322489 СССР, МКИ H 04 L 7/08. / О. Б. Шарпан (СССР). – № 3924931/24-09; Заявлено 10.07.85; Оpubл. 07.07.87, Бюл. 25. – 3 с.
26. Устройство взаимного фазирования: А.с. 1748250 СССР, МКИ H 03 L 7/00. / В. Э. Синанов, О. Б. Шарпан. – № 4837111/09; Заявлено 08.06.90; Оpubл. 15.07.92, Бюл. 26. – 4 с.
27. Левина А. Ф., Маглеванная Н. И., Разборский В. А., Шарпан О. Б. Система фазирования многочастотных сигналов // Техника средств связи. Сер. РТ. – М.: –1984. – Вып. 1. –С. 58-61.
28. Синанов В. Э., Шарпан О. Б. Система пространственного фазирования с невязными фазостабильными линиями связи // Вестник КПИ. Сер. Радиотехники. – 1990. – № 27. – С. 65-67.
29. Левина А.Ф., Шарпан О.Б. Погрешности фидерной части системы взаимного фазирования // Измерение параметров радиотехнических сигналов и цепей. – Красноярск: СО АН СССР. – 1977. – С. 76-79.
30. Способ измерения разности фаз: А.с. 1273833 СССР, МКИ G 01 R 25/00. / В. Я. Дворский, О. Б. Шарпан (СССР). – № 3781952/24-21; Заявлено 16.08.84; Оpubл. 30.11.86, Бюл. № 44. – 3 с.
31. Измеритель разности фаз: А.с. 1200197 СССР, МКИ G 01 R 25/00. / В.Я. Дворский, О.Б. Шарпан (СССР). – № 3782096/24-21; Заявл. 16.04.84; Оpubл. 23.12.85, Бюл. № 47. – 4 с.
32. Дворский В.Я., Кусов Г.А., Левина А.Ф., Маглеванная Н.И., Очков Д.С., Рукунов В.Н., Шарпан О.Б. Радиоимпульсный фазометр // Приборы и техника эксперимента. – 1987. – № 1. – С.232.
33. Дворский В.Я., Кусов Г.А., Левина А.Ф., Маглеванная Н.И., Очков Д.С., Рукунов В.Н. Шарпан О.Б. Многоканальный радиоимпульсный фазометр // Приборы и техника эксперимента. – 1988. – № 2. – С. 213.
34. Пеккер Я.С., Бразовский К.С., Усов В.Ю., Плотников М.П., Уманский О.С. Электроимпедансная томография. – Томск: Из-во НТЛ, 2004. – 192.
35. Барбер Дж., Тристан М., Лич М., Уэбб С., Хилл К., Бентли Р. Физика визуализации изображений в медицине/ Под ред. С. Уэбба / Пер. с англ. под ред. Л.В. Бабина и А.П. Сарвазяна. – М.: Мир, 1991. – Т. 2. – 408 с.
36. Jossinet J, Trillaud C. Imaging the complex impedance in electrical impedance tomography // Clin. Phys. Physiol. Meas. – 1992. –Vol. 13. – P. 47–50.
37. Шарпан О. Б., Безякіна Д. В. Оцінка впливу неоднорідності біотканини на чутливість частотного розподілу комплексного електричного імпедансу // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2005. – № 6. – С. 14-18.
38. Дорожковець М.М. Томографічні вимірювання просторового розподілу фізичних величин: Автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.11.04; 05.11.05 / Національний ун-т „Львівська політехніка”, Львів. – 2001. – 40 с.
-

39. Дудикевич Т.В. Реконструкция розподілу питомої електричної провідності для технічних та біомедичних вимірів: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.11.05 / Національний ун-т „Львівська політехніка”. – Львів, 1997. – 19 с.
40. Шарпан О. Б. Влияние частотных характеристик сосудистой системы на амплитудный и фазовый спектры пульсовых сигналов // *Электроника и связь*. – 2002. – № 14. – С. 83-87.
41. Шарпан О. Б. Дослідження залежності амплітудного спектра пульсового сигналу від стану системи гемодинаміки // *Наукові вісті НТУУ “КПІ”*. – 2004. – № 1. – С. 110-117.
42. Шарпан О. Б. Диагностическая чувствительность фазового спектра пульсового сигнала // *Электроника и связь*. – 2003. – № 18. – С. 91-95.
43. Мосійчук В. С., Шарпан О. Б. Методи непрямого вимірювання біосигналів та фізичних величин на підставі релаксаційних процесів / В. С. Мосійчук, О. Б. Шарпан // *Теоретична електротехніка*. – 2009. – Вип. 60. – С. 132–138.
44. Зудов О. Н., Шарпан О. Б. Перешкодостійкий кореляційний спосіб вимірювання тиску крові // *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. – 2000. – № 5. – С. 5-7.
45. Шарпан О. Б., Яценко А. Г., Зудов О. М., Магльована Н. І., Самуйленко В. Є. Завадостійке неінвазивне вимірювання артеріального тиску під час ергометричної проби // *Электроника и связь*. – 2001. – №10. – С.15-16.
46. Шарпан О. Б., Магльована Н. І., Бондар М. В., Грушовський І. Т., Грушовська В. М., Лісний І. І. Дослідження можливості використання спектрального аналізу пульсової хвилі для оцінки стану функціональної активності вегетативної нервової системи // *Біль, знеболювання, інтенсивна терапія*. – 2004. – № 2-Д. – С. 526-528.
47. Шарпан О. Б., Гусева О. В., Жиляков А. О., Магльована Н. І. Система для дослідження гемодинаміки за амплітудним спектром пульсової хвилі // *Вісник НТУУ „КПІ”. Серія ПРИЛАДОБУДУВАННЯ*. –2004. –Вип. 27. – С. 158-162.
48. Шарпан О.Б., Гусева О.В., Магльована Н.І., Рибін О.І. Програмно-вимірювальна фотоплетизмографічна система пульсової спектрометрії // *Вісник Вінницького національного технічного університету*. – 2007. № 5.– С. 34-40.
49. Патент UA 58228 А України, МПК 7 А61 В5/00. Спосіб вимірювання кров'яного тиску / О. Б. Шарпан, О. М. Зудов, О. П. Мітров (Україна). – № 2002108678; Заявл. 31.10.2002; Опубл. 15.07.2003, Бюл. № 6.–4 с.
50. Патент UA 58229 А України, МПК 7 А61 В5/00. Спосіб вимірювання кров'яного тиску / О. П. Мітров, О. Б. Шарпан, О. М. Зудов (Україна). – № 20021008679; Заявл. 31.10.2002; Опубл. 15.07.2003, Бюл. № 7. – 4 с.
51. Гойжевский В. А., Дворский В.Я., Огородничук Л.Д., Маглеванная Н.И., Падун Н.И., Шарпан О.Б. Радиоимпульсный фазометр // *Приборы и техника эксперимента*. – 1982. – № 3. – С. 241.
52. Дворский В.Я., Кусов Г.А., Левина А.Ф., Маглеванная Н.И., Очков Д.С., Рукунов В.Н., Шарпан О.Б. Радиоимпульсный фазометр // *Приборы и техника эксперимента*. – 1987. – № 1. – С.232.
53. Дворский В.Я., Кусов Г.А., Левина А.Ф., Маглеванная Н.И., Очков Д.С., Рукунов В.Н. Шарпан О.Б. Многоканальный радиоимпульсный фазометр // *Приборы и техника эксперимента*. – 1988. – № 2. – С. 213
54. Дворский В.Я., Синанов В. Э., Шарпан О.Б., Ярошенко В.Т. Измеритель параметров электрического импеданса биологических тканей и органов // *Радиоэлектроника (Изв. высш. учеб. заведений)*. – 1998. – № 7. –С. 75-77.
55. Шарпан О., Зудов О., Магльована Н., Павлов О., Сінанов В. Мікропроцесорний монітор комплексного електричного біоімпедансу // *Труди 5-ї Міжнар. НТК „Досвід*

розробки і застосування САПР в мікроелектроніці”. – Львів: – 1999. – С. 192-193.

Шарпан О. Б. Особливості амплітудних і фазових вимірювань в завданнях діагностики стану просторово розвинених об’єктів. Розглянуто особливості розроблення нових методів та швидкодіючих широкопосмугових просторово розвинених систем імпульсних амплітудних і фазових вимірювань і пульсової спектрометрії, здатних забезпечити отримання з підвищеною точністю часових і частотних параметрів просторово розвинених динамічних об’єктів різної фізичної природи. Надано відомості про практичну реалізацію таких систем і їх технічні характеристики.

Ключові слова: вимірювання, фазові, амплітудні, діагностика

Шарпан О. Б. Особенности амплитудных и фазовых измерений в задачах диагностики состояния пространственно развитых объектов. Рассмотрены особенности разработки новых методов и быстродействующих широкополосных пространственно развитых систем импульсных амплитудных и фазовых измерений и пульсовой спектрометрии, способных обеспечить получение с повышенной точностью временных и частотных параметров пространственно развитых динамических объектов различной физической природы. Представлены сведения о практической реализации таких систем и их технических характеристиках.

Ключевые слова: измерения, фазовые, амплитудные, диагностика.

Sharpan O. B. Singularities of amplitude and phase measuring in problems of a spatially distributed object diagnostics. Singularities of development of new methods and the fast broadband space diversity systems of impulse amplitude and phase measuring and spectrometry, capable to measure temporary and frequency parameters of spatially distributed dynamic objects of various physical nature are considered. Information about practical embodying such systems and their technical features are presented.

Keywords: measurement, phase, amplitude, diagnostics.