

УДК 621.317.73

**Р.О. Проців**Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра автоматики і телемеханіки**СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ  
ЧАСТОТНИХ АНАЛІЗАТОРІВ ІМІТАНСУ**

© Проців Р.О., 2001

**Проведено порівняльний аналіз придатності існуючих методів побудови вимірювачів імітансу в широкому частотному діапазоні.**

**The comparative analysis of availability of existing methods of immitance meters construction in a wide frequency range is carried out.**

Велика різноманітність та зростання складності наукових та виробничих задач вимагають розширення номенклатури величин, що несуть інформацію про властивості досліджуваного чи контрольованого об'єкта і процесів, що в ньому відбуваються. Одними з таких величин є параметри електричних кіл – еквівалентних схем заміщення широкого класу об'єктів, що працюють чи проявляють свої властивості на змінному струмі. Проходження електричного струму через такий об'єкт еквівалентне проходженню струму через деякий пасивний багатоелементний двополюсник, параметри елементів якого відповідають параметрам об'єкта і є цінним джерелом інформації про його властивості. Необхідність визначення параметрів схем заміщення у вигляді багатоелементних двополюсників виникає при вирішенні дослідницьких та практичних задач в багатьох галузях науки та техніки. Задачі умовно поділяють на чотири великі групи:

1. Задачі в наукових дослідженнях.
2. Контроль параметрів елементів і пристроїв у процесі їх роботи чи виробництва.
3. Перетворення вихідних величин давачів у системах контролю і управління.
4. Медична діагностика.

В основі розв'язання цих задач лежать так звані імпедансні методи, що базуються на аналізі реакції досліджуваних об'єктів на проходження електричного струму. Задача визначення елементів еквівалентних схем заміщення передбачає вимірювання імітансів досліджуваних об'єктів в діапазоні частот і розв'язання рівнянь, що поєднують вимірні величини з шуканими параметрами [1]. Швидкими темпами розвиваються і необхідні для цього засоби вимірювань – частотні аналізатори імітансу (ЧАІ). При цьому до таких проблемно-орієнтованих вимірювальних приладів ставляться специфічні вимоги, виконання яких дозволяє краще вивчати внутрішню структуру та властивості досліджуваних об'єктів. Найбільш характерними серед згаданих вимог є такі:

1. Зміна функціональних можливостей, яка дозволяла б адаптуватися до особливостей вимірювання параметрів досліджуваного об'єкта: програмна зміна частоти і рівня тестового сигналу, зміна режиму вимірювань.
2. Надання широких можливостей для обробки, зберігання і подання інформації у формі, зручній для сприйняття чи подальшої обробки.

3. Забезпечення високих метрологічних характеристик. Можливість підвищення точності за рахунок швидкодії і навпаки.
4. Простота і невисока вартість вимірювальних засобів.

Визначення параметрів схем заміщення (моделей) досліджуваних об'єктів пов'язане з аналізом інформації про дійсну та уявну складові їх імітансу. Широка номенклатура методів та засобів, що існують в техніці вимірювання імітансу, вимагає систематизованого підходу до вирішення питання про їх застосування при створенні ЧАІ, а також відповідності вимогам, що ставляться до аналізаторів.

Всебічний аналіз відповідності існуючих принципів побудови засобів вимірювання імітансу вищезгаданим вимогам дозволив зробити висновок, що з усього спектра підходів до вимірювання імітансу найперспективнішими видаються два: метод прямого перетворення та автокомпенсаційний метод.

Використання для побудови ЧАІ методу прямого перетворення зумовлене вимогами високої швидкодії [2]. В таких пристроях аналізована величина зазнає трьох основних вимірювальних перетворень: векторне перетворення, перетворення вектор-скаляр, аналого-цифрове перетворення. Як векторні перетворювачі найбільш доцільно використовувати схеми на базі операційних підсилювачів (ОП), оскільки вони забезпечують високу чутливість та завадостійкість. Однак, незважаючи на певні переваги, цим схемам властиві характерні недоліки. В роботі [2] показано, що похибки перетворення активних і реактивних складових таких перетворювачів залежать від значень самих складових, частоти тестового сигналу, а також від параметрів ОП (коефіцієнт і частота одиничного підсилення). Дослідження, що проводились в тій самій роботі, показали, що на частотах 10 кГц і вище похибки перетворення досягають недопустимо високих значень, що вказує на непридатність схем активних перетворювачів для вимірювань на високих частотах.

Основу перетворювача вектор-скаляр становлять фазочутливі детектори (ФЧД), які, своєю чергою, можуть бути реалізовані кількома способами: на основі аналогових помножувачів напруги, релейного типу, стробуючі, інтегруючі та ін. Джерелами похибок таких перетворювачів є паразитні фазові зсуви в інформаційних колах і колах управління та похибки взаємного впливу ортогональних складових. Принциповий недолік цього методу – обмежена точність, усувається застосуванням структурно-алгоритмічних методів покращання метрологічних характеристик. Ці методи передбачають як компенсацію похибок у межах окремих функціональних перетворювачів, так і алгоритмічну їх корекцію. Реалізація алгоритмічної корекції у вимірювачах з розімкненою структурою вимагає використання двох незалежних алгоритмів: алгоритму корекції похибок активних перетворювачів, алгоритму корекції паразитних фазових зсувів. Використання ефективних алгоритмів корекції частотних похибок активних перетворювачів дозволяє розширити їх частотний діапазон до 100-200 кГц. Алгоритм корекції фазових зсувів не тільки зменшує вплив паразитних фазових зсувів, але й підвищує швидкодію ФЧД.

Використання багаторозрядних швидкодіючих ЦАП дає змогу застосувати ітераційну корекцію похибок [3]. Вимірювальний процес при такому підході складається з двох етапів: перший – власне вимірювання, другий – ітераційна корекція похибок. Потенціальна точність вимірювання складових імітансу при використанні лінійного ЦАП визначається лише відхиленням коефіцієнтів передачі прямого каналу при зміні конфігурації вимірювальної схеми. У реальній схемі на похибки можуть впливати такі фактори, як

часова нестабільність елементів, нелінійність ЦАП, неточність фіксації моменту досягнення рівностей. Результати досліджень свідчать про доцільність застосування схеми ітераційної корекції до частот 500 кГц. На вищих частотах через взаємозв'язок каналів перетворення активної та реактивної складових різко збільшується кількість ітерацій.

Простота побудови та висока швидкодія дають змогу ефективно використовувати вищезгадані структури при побудові ЧАІ, особливо в діапазоні низьких частот. При збільшенні частоти тестового сигналу характеристики таких вимірювачів значно погіршуються.

Радикальним способом покращання характеристик засобів вимірювання є стабілізація їх реальної характеристики перетворення, яку ефективно реалізують в автокомпенсаційних структурах завдяки використанню цифрового від'ємного зворотного зв'язку. Застосування цього способу вимагає наявності стабільного зворотного перетворювача у складі швидкодіючих ЦАП, матричних помножувачів, паралельних суматорів і т. д. Охоплення стабільним зворотним зв'язком нестабільних вузлів прямого каналу (векторний перетворювач, перетворювач вектор-скаляр) шляхом подачі кодів вимірних складових через ЦАП у зворотному колі (на вхід вимірювальної схеми) передбачає створення так званих цифрових автокомпенсаційних вимірювачів імітансу (ЦАКВІ). В роботі [4] розглядається структура статичного ЦАКВІ, де показано, що результуючу похибку вимірювання спричиняють похибки зразкових мір, АЦП та ЦАП, а також похибка статизму. Позбутись похибки статизму дозволяють так звані астатичні ЦАКВІ [5], в яких після повного зрівноваження вимірювальної схеми точність вимірювання складових визначається лише стабільністю зворотного перетворювача і пасивних зразкових мір. Крім того, на точності вимірювання реактивної складової може позначатися девіація частоти тестового сигналу. Швидкодія двох координатних автокомпенсаційних вимірювачів імітансу залежить від вибраного алгоритму зрівноваження та тривалості перехідних процесів.

Згадані вище структури можуть бути застосовані при побудові ЧАІ завдяки поєднанню в собі високої швидкодії та точності, а частотний діапазон вимірюваних сигналів може досягати 1МГц. Однак при збільшенні частоти тестового сигналу зростає час приведення вимірювальної схеми до стану рівноваги через залежність в загальному випадку одного параметра сигналу від відхилень іншого керованого параметра від положення рівноваги.

Використання як інформативного параметра модуля сигналу розбалансу вимірювальної схеми від регульованих параметрів передбачає створення ЦАКВІ екстремального типу [6]. Зрівноваження вимірювальної схеми, тобто процес знаходження компенсуючого вектора при деякому входному, здійснюється шляхом пошуку екстремуму функції двох змінних. В просторі керованих параметрів функція модуля сигналу розбалансу є параболоїдом і має єдиний мінімум, координати якого збігаються з рівноважними значеннями керованих параметрів. Інваріантність таких схем до фазових зсувів дозволяє пришвидшити процес зрівноваження вимірювальної схеми, особливо в діапазоні високих частот, що є передумовою успішного застосування ЦАКВІ екстремального типу при побудові ЧАІ. Побудова таких ЧАІ передбачає включення до їх складу нових структурних елементів – мікроконтролерів, що поряд з ускладненням побудови збільшує вартість таких пристроїв.

Задовольнити суперечливі вимоги простоти і високих метрологічних характеристик можна, застосовуючи автокомпенсаційні вимірювачі імітансу із одновимірною системою

зрівноваження [7]. Для автокомпенсаційних вимірювачів імітансу, які працюють на змінному струмі, одновимірна система означає приведення вимірювальної схеми до стану рівноваги на основі аналізу миттєвих значень сигналів. Зрівноважуючі дії формуються із застосуванням синхронної диференційної імпульсно-кодової модуляції. Термін входження автокомпенсатора у режим стеження обмежений четвертиною періоду тестового сигналу. Тривалість вимірювання даних автокомпенсаційних пристроїв детермінований і дорівнює одному періоду тестового сигналу, тобто збігається з потенціальною швидкодією вимірювачів імітансу з розімкненою структурою. Підвищення швидкодії досягається завдяки деякому зниженню точності через неповне зрівноваження вимірювальної схеми. Така властивість може бути успішно використана при побудові швидкодіючих ЧАІ, до яких ставляться помірні вимоги щодо точності вимірювальних перетворень.

На підставі огляду задач, що потребують визначення параметрів багатоелементних двополюсників, проаналізовано ступінь придатності існуючих методів та засобів вимірювання імітансу для побудови ЧАІ. Показано, що для забезпечення потрібної швидкодії таких пристроїв доцільно покласти в основу їх побудови метод прямого перетворення. Для забезпечення високої точності та завадостійкості раціональним є використання автокомпенсаційних методів.

1. Кнеллер В. Ю., Боровских Л. П. *Определение параметров многоэлементных двухполюсников.* - М., 1986. 2. Хома В. В. *Улучшение характеристик измерителей составляющих иммитанса для средств параметрического контроля полупроводниковых структур.* Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. - Львов, 1989. 3. *Итерационные методы повышения точности измерений / Алиев Т. М., Тер-Хачатуров А. А., Шехиханов А. М.* - М., 1986. 4. Гаврилюк М. О., Хома В. В. *Про спосіб структурної компенсації похибок вимірювання імітансу // Вісник ДУ "Львівська політехніка". 1998. Вип. 348. С. 24-30.* 5. Гаврилюк М. О., Проців Р. О., Хома В. В. *Цифровий автокомпенсаційний вимірювач складових імітансу // Вісник ДУ "Львівська політехніка". 1999. Вип. 354. С. 130-135.* 6. Проців Р. О. *Цифровий автокомпенсаційний вимірювач складових імітансу екстремального типу // Вісник ДУ "Львівська політехніка". 1998. Вип. 366. С. 154-159.* 7. Хома В. В. *Цифрові автокомпенсаційні вимірювачі імітансу із одновимірною системою зрівноваження // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. - 1998. - №3. - С. 70-75.*