ВСТУП

Основою і водночас рушієм науково-технічного прогресу є здобутки, одержані в результаті постійного розширення сфери наукових досліджень, ускладнення та вдосконалення технологічних процесів сучасного виробництва. При цьому збільшується номенклатура величин, які потрібно вимірювати для вивчення властивостей досліджуваних об’єктів, а також підвищуються вимоги до якості контролю. Важливе місце у колі таких задач належить дослідженню реакції фізичних об’єктів на проходження змінного струму – прикладне вимірювання імітансу. Основними перевагами такого контролю є висока інформативність, неруйнівна дія випробувальних сигналів на досліджуваний об’єкт, простота реалізації, придатність до повної автоматизації вимірювального процесу та оперативність одержання результатів [5, 31, 52, 59, 65, 70, 103, 151].

Застосування імітансного контролю для розв’язання прикладних задач потребує розроблення методичного та апаратного забезпечення. Методичне забезпечення полягає у створенні для досліджуваного об’єкта адекватного електричного аналога у вигляді деякого пасивного електричного кола і встановленні зв’язку між параметрами імітансу та властивостями об’єкта. Апаратне забезпечення є інструментом для одержання достовірної інформації про значення імітансу (елементів еквівалентної схеми заміщення), на основі яких дослідник, користуючись відомими залежностями, може визначати первинні параметри об’єкта, що становлять мету дослідження [41, 66, 70, 98, 103].

Особливістю прикладного вимірювання імітансу є те, що цінна інформація про властивості досліджуваних фізичних об’єктів міститься не просто у значенні імітансу, а у характері його змін у часі, які часто спричиняють (стимулюють) сторонні впливи [31, 46]. Для вивчення внутрішньої структури фізичних об’єктів успішно застосовують імітансну томографію, яка передбачає вимірювання просторового розподілу імітансу [41, 46, 98, 144, 146]. Спектр прикладних задач значно розширюється, якщо є можливість контролювати залежність імітансу від частотних або енергетичних параметрів сигналів стороннього впливу [5, 66, 129].

Труднощі у вирішенні питань апаратного забезпечення прикладних задач пов'язані із широкою номенклатурою і різноманітністю природи досліджуваних фізичних об'єктів, що зумовлює вузьку орієнтацію засобів вимірювання імітансу і неодмінно позначається на вимогах до їхніх характеристик. Відомо, що вимірювачі імітансу традиційно створювалися для контролю параметрів пасивних R, L, C елементів електричних схем. Розвиток таких приладів проходив у напряму розширення діапазонів, підвищення точності та урізноманітнення інтерпретації результатів вимірювання імітансу як двовимірного вектора [16, 37, 63]. Для сучасних вимірювачів імітансу характерним є широке використання мікропроцесорних комплектів із спеціалізованим програмним забезпеченням, розвинених засобів оброблення, візуалізації та зберігання результатів вимірювання, що зумовлює високі ціни (тисячі – десятки тисяч доларів), масогабаритні показники (кілька десятків кілограмів), значну споживану потужність – понад 100 ВА [75, 164].

Залежно від змісту та складності тієї чи іншої задачі прикладного вимірювання імітансу використовувалися такі підходи до створення апаратного забезпечення:

- прикладну задачу можна розв'язати за допомогою серійних вимірювачів імітансу, однак функціональна надлишковість переважно у вигляді набору контрольованих величин, діапазонів вимірювання, точності спричиняють складність та надлишковість масогабаритних показників, підвищують споживану потужність, ціну. Це ускладнювало процес вимірювання поза лабораторними умовами;
- прикладна задача потребує деяких додаткових пристроїв і дооснащення серійних вимірювачів імітансу. Недоліки попереднього пункту повністю зберігаються.

Для конкретної прикладної задачі створювалися спеціалізовані вимірювачі імітансу, однак відсутність всебічного аналізу, недостатнє пророблення теоретичних питань не давали змоги ефективно використовувати можливості сучасної елементної бази.

Специфіка вимог до характеристик ЗВІ, орієнтованих на розв'язання різних прикладних задач, належність цих задач до різних сфер, зокрема і до неелектротехнічних, спричиняють необхідність створення методології проектування спеціалізованих засобів вимірювання імітансу, орієнтованих на ефективне розв'язання згаданих задач у реальних (виробничих) умовах. Разом з тим для поширення імітансного

контролю на нові сфери, відбору найінформативніших параметрів, виявлення найсприятливіших умов захищеності до впливу дестабілізаційних факторів при створенні відповідного методичного забезпечення виникає потреба у побудові багатоцільових вимірювачів, придатних для вимірювання імітансу нелінійних нестаціонарних багатополюсних об'єктів із складними схемами заміщення [2, 31, 65].

Отже, створення приладів, які призначені для вимірювання імітансу за певних обмежень, зумовлених як специфічними зв'язками контрольованих фізичних величин із параметрами імітансу, так і особливими умовами експлуатації, – проблемно-орієнтованих засобів вимірювання імітансу (ЗВІ) – є актуальним науково-технічним завданням у галузі електровимірювальної техніки.

Розвиток теорії та принципів побудови проблемно-орієнтованих ЗВІ має особливе значення не лише для науки, але й для задоволення багатьох практичних потреб, насамперед у таких сферах, як контроль за перебігом технологічних процесів і якості матеріалів, медична діагностика, перетворення вихідних величин датчиків на системах контролю й управління. Для підтвердження важливості вказаних проблем згадаємо декілька таких застосувань.

Під час масового випуску виробів мікроелектроніки визначальну роль відіграє неперервний параметричний контроль напівпровідникових структур імітансними методами, який дає змогу оперативно виявляти причини браку і корегувати перебіг технологічного процесу. У результаті це збільшує процент виходу придатних виробів [5, 10, 11, 139]. Видобуток нафти, переробка нафтопродуктів та їх транспортування нафтопроводами передбачають поточний контроль за їх якістю. З цього огляду перспективним також є використання імітансного контролю, зокрема імпедансної томографії [40, 41].

Профілактика та успішне лікування серцево-судинних захворювань значною мірою залежать від своєчасного їх виявлення та точності діагностики. Важливе значення для вирішення цієї проблеми має реографія (імпедансна плетизмографія) – порівняно новий метод ранньої діагностики, який можна застосовувати не лише у великих медичних закладах, але і в звичайних поліклініках [82, 98, 154].

Важко переоцінити можливості, які відкриває використання ємнісних, резистивних та індуктивних датчиків під час контролю різних

неелектричних величин не лише у промисловості, але і у таких сферах, як біофізика, геологія, охорона довкілля тощо [2, 3, 9, 26, 48, 59, 66, 96, 166].

Історично склалося так, що першими і найпоширенішими об'єктами контролю на змінному струмі були електротехнічні пристрої: резистори, конденсатори і котушки індуктивності. Тому засоби вимірювання імітансу стали називати вимірювачами R, L, C-параметрів. У разі використання зондувальних гармонічних сигналів природно подавати імітанс двовимірною векторною величиною (як комплексний опір чи провідність). Це означає, що досліджувані об'єкти описуються двоелементними схемами заміщення, наприклад, таким набором скалярних параметрів, як R-C чи R-L.

Перші прилади для незалежного вимірювання двох складових імітансу – мости змінного струму з ручним зрівноважуванням – з'явилися понад сто років тому, і їх створення пов'язане із іменами таких видатних учених, як Максвелл, Хевісайд, Томсон. Теорію мостових методів було розроблено значно пізніше завдяки дослідженням таких учених, як М.О. Гаврилюк, Ф.Б. Гриневич, К.Б. Карандєєв, В.Ю. Кнеллер, А.Д. Нестеренко, А.І. Новик, Є.П. Соголовський, Б.Й. Швецький, Г.А. Штамбергер [21, 37, 63, 75, 88].

У 50–70-ті роки XX ст. почали автоматизувати трудомісткий процес зрівноваження мостів змінного струму. Складність цієї задачі зумовлена векторною природою та взаємозв'язком контурів зрівноваження, що проявляється у впливі регулювання одного параметра на зрівноважене значення іншого. Подальші зусилля вчених і розробників були спрямовані на створення цифрових автоматичних мостів змінного струму, зокрема із використанням мікропроцесорних пристроїв. Сучасні мости змінного струму – це високоточні автоматичні прилади, за допомогою яких вимірюють імітанс за двоелементною схемою заміщення у широкому діапазоні частот. Проте, незважаючи на повну автоматизацію вимірювального процесу, мости змінного струму мають обмежену швидкодію. Кращі зразки цифрових автоматичних мостів забезпечують лише до 10 відліків на секунду, що явно недостатньо для розв'язання багатьох прикладних задач [52, 64, 75, 87].

З метою підвищення швидкодії та спрощення апаратурної реалізації розробляли автокомпенсаційні вимірювачі імітансу, особливістю яких є те, що вимірювальна схема зрівноважується регулюванням напруг чи струмів за незмінних значень параметрів пасивних елементів.

Оскільки стабільність активних величин, які набувають якості міри, менша, автокомпенсаційні пристрої дещо поступаються за точністю мостовим аналогам. Ці пристрої аналізують Ф.Б. Гриневич, Т.М. Алієв, В.М. Шляндін, А.М. Мелік-Шахназаров, Ю.О. Скрипник, П.М. Таланчук та їхні учні [3, 59, 79].

Подальше збільшення швидкодії можливе у разі застосування вимірювачів імітансу із розімкненою структурою. Побудова таких пристроїв стала можливою завдяки широкому використанню у вимірювальному каналі операційних підсилювачів. Упродовж 80-х років XX ст. у Національному університеті "Львівська політехніка" під керівництвом М.О. Гаврилюка та Є.П. Соголовського виконано низку розробок та впроваджено у серійне виробництво 5 взірців вимірювачів імітансу різного класу та призначення, в основу яких покладено метод прямого перетворення [10, 16–18, 22].

Розширення номенклатури об'єктів контролю та ускладнення дослідницьких задач показали, що двовимірне подання імітансу часто не забезпечує потрібної інформативності. Тому для розв'язання прикладних задач створювали вимірювальні установки на основі наявних універсальних вимірювачів імітансу з певним їх доопрацюванням та використанням деяких додаткових пристроїв. Однак різноманітність досліджуваних об'єктів, їх належність до різних галузей науки і техніки, за даними науково-технічної літератури, приводили до значної ізольованості при вирішенні питань апаратного забезпечення.

Відсутність загальної платформи під час побудови засобів вимірювання не давала змоги ефективно реалізовувати можливості імітансних методів контролю. З одного боку, значні метрологічні та функціональні можливості вимірювачів імітансу виявлялися незатребуваними, а з іншого – не повністю задовольнялися потреби прикладних задач, насамперед, із швидкодії, діапазону робочих частот, стійкості до впливу дестабілізувальних факторів. Тому питання створення проблемно-орієнтованих ЗВІ насамперед потребує розгляду його як самостійної проблеми, із єдиних позицій для, здавалося б, зовсім різних прикладних задач, безвідносно до природи досліджуваних об'єктів. Це має відбуватися на основі всебічного аналізу та переосмислення значного досвіду, накопиченого у процесі розвитку універсальних вимірювачів імітансу, з урахуванням загальних тенденцій розвитку електровимірю-

вальних приладів, нових можливостей, які відкриваються з використанням сучасних методів та пристроїв оброблення сигналів.

Оцінюючи загальний стан проблем, пов'язаних із створенням ЗВІ для розв'язання прикладних задач, слід вказати на значні досягнення в окремих напрямах імітансної метрології, наприклад, у створенні частотних аналізаторів імітансу, призначених для вимірювання параметрів багатоелементних двополюсників, а також для розв'язання загальнішої задачі – визначення параметрів імітансу багатополюсних об'єктів [1, 2, 7, 66, 70].

Достатньо вивченими можна вважати питання цифрового синтезу гармонічних квадратурних сигналів [4, 80, 92, 135], використання операційних підсилювачів для покращання характеристик вимірювальних перетворювачів [12, 53], розроблення деяких структурно-алгоритмічних методів підвищення точності вимірювачів імітансу [58, 78, 129], створення загальних підходів до проектування автоврівноважувальних структур [3, 7].

Разом з тим не повною мірою опрацьовано такі проблеми, як переведення вимірювальної операції "вектор-скалярного" перетворення на цифрову форму, розроблення нових ефективних алгоритмів зрівноваження на основі різницевих методів, використання засобів обчислювальної техніки не лише для створення зручного інтерфейсу з користувачем, але і безпосередньо у процесі вимірювання імітансу. В результаті реалізації перерахованих заходів можна очікувати підвищення швидкодії, точності та гнучкості вимірювальних каналів проблемно-орієнтованих ЗВІ. Для проектування вимірювачів імітансу важливо створити методологію структурно-параметричного синтезу як окремих вимірювальних перетворювачів із заданими характеристиками, так і засобів вимірювання загалом, яка б за простотою і доступністю стала придатною для застосування в інженерній практиці.