

УДК 621.3

МЕТРОЛОГІЧНА ПЕРЕВІРКА СИСТЕМ ЗБИРАННЯ ДАНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТОМОГРАФІЧНИХ СИСТЕМ

© Дорожовець Михайло, Волкова Юлія, 2012

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра інформаційно-вимірювальних технологій,
вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна
dorozhovets@polynet.lviv.ua, jul4ik-volkova@rambler.ru

Розглянуто основні схеми вимірювання в електричній томографії.

Рассмотрено основные схемы измерений в электрической томографии.

In the article the main measurement diagrams in electrical tomography systems are overviewed.

1. Вступ. Електрична томографія – метод отримання внутрішньої структури досліджуваного об'єкта при зовнішньому збудженні об'єкта струмом (як постійним, так і змінним), і вимірювання зовнішніх міжелектродних потенціалів або навпаки – у разі збудження напругою і вимірювання струму. Знаючи прикладені струми і зареєстровані потенціали, знаходять просторовий розподіл електричної провідності всередині об'єкта. Оскільки різні ділянки об'єкта досліджень мають різні властивості (опір, провідність, діелектричну проникність, імпеданс), знання просторового розподілу цих властивостей дає змогу реконструювати (відтворити) внутрішню структуру досліджуваного об'єкта. Першими вирішенням проблем імпедансної томографії почали займатися англійські університети Оксфорда і Шеффільда, дослідження яких відрізнялися способом зондування об'єкта досліджень і визначенням реакції на це збудження [1, 4].

Загалом вимірювальна томографічна система (далі – ВТС) складається з трьох основних частин (рис.1): 1 – системи збуджувальних і вимірювальних електродів; 2 – системи збирання вимірювальних даних; 3 – програмної частини разом з комп'ютерними засобами.

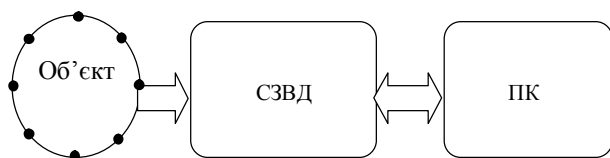


Рис. 1. Структурна схема томографічної системи:
СЗВД – система збирання вимірювальних даних,
ПК – персональний комп'ютер

Система збуджувальних та вимірювальних електродів забезпечує належне електричне збудження

об'єкта та можливість вимірювання реакції об'єкта на це збудження.

Система збирання вимірювальних даних забезпечує формування збуджувальних сигналів та вимірювання з необхідною точністю вихідних електричних сигналів.

Програмне забезпечення забезпечує відтворення (реконструкцію) образу просторового розподілу електричних властивостей всередині об'єкта за результатами вимірювань зовнішніх величин.

2. Огляд вимірювальних схем та апаратної частини електричних томографічних систем. Загалом система збирання вимірювальних даних (далі – СЗВД) складається з мультиплексора і демультіплексора, інструментального підсилювача (ІП), аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) і буфера пам'яті (буфера).

Для вимірювання реакції об'єкта на збудження загалом можна використати дві методики збирання вимірювальних даних [4]: послідовне (рис. 2, а, в) та паралельне (рис. 2, б, г). Під час послідовного вимірювання інформація збирається по чергові з кожної пари вільних електродів для кожного ракурсу збудження. При паралельних вимірюваннях вимірювальна інформація збирається відразу зі всіх вільних пар електродів для кожного ракурсу збудження.

При проходженні повного циклу зміни ракурсів збудження кожен результат вимірювання отримують двічі: перший раз під час вимірювання з боку j -ї пари електродів при збудженні зі сторони i -ї, а другий – при вимірюванні з боку i -ї та збудженні з боку j -ї. Результат вимірювання – це середнє з пари отриманих результатів [3].

Кожна зі згаданих вище складових має певні номінальні й фактичні метрологічні характеристики,

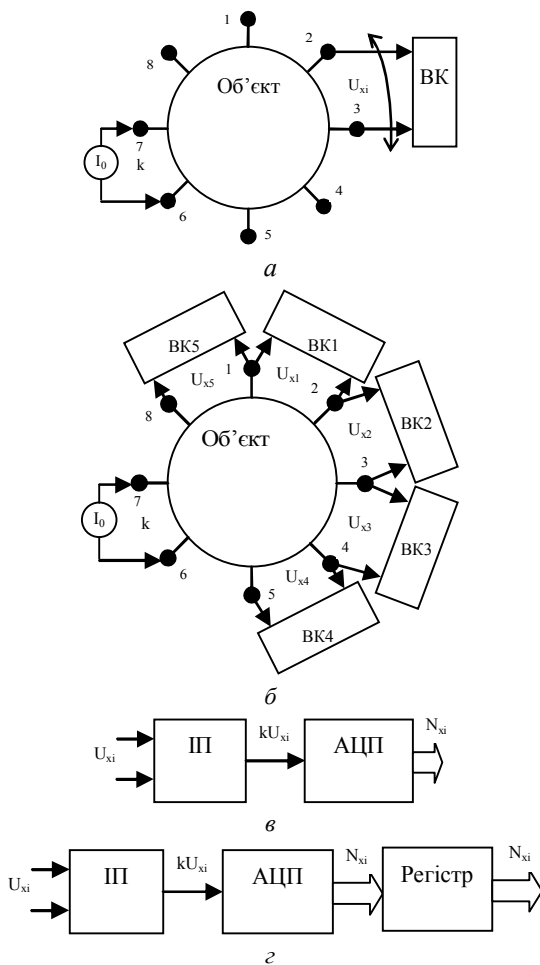


Рис.2. Блок-схеми послідовного (а) та паралельного (б) вимірювання напруг та вимірювальних каналів послідовної (в) та паралельної (г) систем

різниця між якими разом із додатковими впливами і завадами спричинює загальну похибку вимірювання вимірювальної електричної топографічної системи.

3. Засади метрологічної перевірки ВТС. Щоб бути впевненим у реконструйованому образі, треба мати характеристики оцінок точності ВТС, а це, своєю чергою, вимагає проведення її метрологічної перевірки.

Сьогодні не існує усталеної методики метрологічної перевірки ВТС. Це пов'язано з декількома причинами, серед яких:

- досить новий і складний різновид засобів вимірювальної техніки;
- на результат реконструкції безпосередньо впливають не лише інструментальні чинники, а й неточність розташування електродів на об'єкті, їх взаємодія з дослідним середовищем;

- принципова неможливість отримати вимірювальні дані системою збирання вимірювальних даних однооментно і обмеження кількості даних;
- недосконалість алгоритму реконструкції і його програмної реалізації, що проявляється у радикальному підсиленні неточностей у результатах вимірювань.

Метою роботи є формування засад метрологічної перевірки ВТС.

Загалом у метрологічній практиці існує два види метрологічної перевірки вимірювальних систем: поелементний і комплексний [6].

Під час поелементної метрологічної перевірки необхідно окремо перевіряти канал збудження об'єкта – джерело струму і демультимплексор, канал вимірювання – мультимплексор, ІП, АЦП, а також програму реконструкції образу. У такому разі характеристики похибок системи визначають розрахунково.

Зручнішою, але важчою в реалізації є комплексна перевірка. Для цього слід створити зразковий об'єкт з такою самою структурою, як і в реальному об'єкта, з можливістю фізичного моделювання зміни провідності. Структуру об'єкта можна реалізувати з сітки опорів, ємностей чи індуктивностей [5, 6].

4. Засади метрологічної перевірки ВТС на основі еталонного об'єкта. Еталонний об'єкт – це штучно створена сітка з електричних елементів (резисторів, ємностей, індуктивностей), яка за структурою відповідає застосованій у реконструйованому алгоритмі апроксимації досліджуваного середовища, має таку саму конфігурацію зовнішніх збуджувальних і вимірювальних електродів (рис. 4) [5].

У загальному випадку це було б найкращим вирішенням проблеми метрологічної перевірки, яка би здійснювалась так:

- задають просторовий розподіл u_{el} зад (x, y) електричних величин;
- на основі апроксимації (зазвичай методом скінченних елементів) знаходять еквівалентні значення параметрів електричної схеми (R_j , L_j , C_j) еталонного об'єкта;
- на еталонному об'єкті встановлюють обчислені значення параметрів (із заданою точністю);
- еталонний об'єкт під'єднують до схеми збирання вимірювальних даних і реєструють всі результати вимірювань;

– на основі цих результатів за відповідного програмного забезпечення відтворюють образ $\gamma_{\text{ел.рек}}(x,y)$ просторового розподілу величини;

– визначають похибку як різницю реконструйованого $\gamma_{\text{ел.рек}}(x,y)$ і заданого $\gamma_{\text{ел.зад}}(x,y)$ образів:

$$\Delta\gamma_{\text{ел}}(x,y) = \gamma_{\text{ел.рек}}(x,y) - \gamma_{\text{ел.зад}}(x,y);$$

– знаходять характеристики похибки відтворення (середню, середньоквадратичне відхилення, максимальну, мінімальну) і порівнюють їх з допустимими.

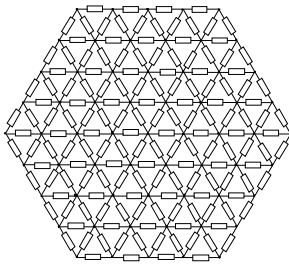


Рис. 4. Сітка резисторів, яка фізично моделює розподіл провідності реального об'єкта

Ця методика найкраща у тому розумінні, що вона відразу враховує всі складові похибки у їх сукупності: від апроксимації, від розташування електродів, від системи збирання вимірювальних даних, від алгоритму реконструкції.

5. Визначення складових похибки ВТС

Оцінювання похибки апроксимації. Цю складову методичної похибки відтворювання образу розподілу провідності можна оцінити розрахунковим методом. Для цього, безпосередньо задавши розподіл провідності $\gamma_{\text{зад}}(x,y)$, виконують її апроксимацію (переважно методом скінченних елементів) і отримують апроксимовані значення $\gamma_{\text{апр}}(x,y)$. Похибку визначають за виразом

$$\Delta_{\text{апр}}(g) = g_{\text{апр}} - g_{\text{зад}}. \quad (1)$$

Для експериментального оцінювання похибки апроксимації необхідно передбачити можливість зміни внутрішньої структури моделі на предмет збільшення в необхідну кількість разів кількість фізичних апроксимаційних елементів моделі

Оцінювання інструментальної похибки. Реконструктивний алгоритм може збільшити вплив похибок у сотні і навіть тисячі разів [3]. При цьому коефіцієнт підсилення залежить від кількості апроксимаційних елементів, і при їх збільшенні він дуже швидко зростає. Тому для оцінювання лише інструментальних похибок необхідно виключити вплив реконструктивного алгоритму. Для цього структура фізичної

моделі має повністю відтворювати спосіб апроксимації під час розв'язання польової задачі, завдяки чому похибка останньої не впливатиме.

Похибку інструментальних засобів системи оцінюють звичайним способом, як різницю між результатами вимірювань $U_{\text{вим}}$ електродних величин для заданого струму збудження та їх значеннями за встановлених заданих значень параметрів дискретної сітки еталонного об'єкта для заданого струму збудження

$$\Delta_{\text{інстр}} = \Delta_{\text{етал.об}} + \Delta_{\text{вим}}. \quad (2)$$

Оцінювання похибки алгоритму відтворення образу. В алгоритмі А відтворення образу провідності як вхідні використовують значення $U_{\text{розр}}$ електродних величин, отримані розв'язуванням прямої задачі за заданих значень параметрів моделі. За ними відтворюють образ провідності $g_{\text{розр}} = A(U_{\text{розр}})$. Похибку алгоритму відтворення визначають як різницю між відтвореними та заданими значеннями елементів моделі

$$\Delta_{\text{апр}} = g_{\text{рек.розр}} - g_{\text{апр}} = A(U_{\text{розр}}) - g_{\text{апр}}. \quad (3)$$

Оцінювання сумарної похибки

Тут мають на увазі сумісну дію похибок вимірювання засобів та алгоритму відтворювання образу. В алгоритмі реконструкції як вхідні використовують результати вимірювань електродних величин. Похибка у такому разі є різницею між відтвореними значеннями елементів [6].

$$\Delta_{\text{сум}} = g_{\text{рек}} - g_{\text{зад}}. \quad (4)$$

Створення такого еталонного об'єкта, який би передбачав можливість переналаштування його структури (кількості електродів) та параметрів електродів, є складним завданням [3, 4].

6. Використання одноканального імітатора опору як еталонного об'єкта у ВТС. Одним з можливих вирішень цієї проблеми може бути використання імітатора опору (індуктивності, ємності) [7].

Активний імітатор опору (АІО) – це схема, яка реалізує задане фіксоване співвідношення між напругою U та струмом I на її виході. Активну імітацію опору можна здійснити двома способами, а саме [7]:

– формуючи спад напруги на імітаторі пропорційно до струму, що протікає через нього;

– формуючи струм, що протікає через імітатор, пропорційно до спаду напруги на ньому.

Структурно АІО можна подати у вигляді з'єднання чотирьох вузлів, а саме вхідного перетворювача (ВП), масштабувального перетворювача (МП) та буферних елементів (Б1, Б2) (рис. 5) [7].

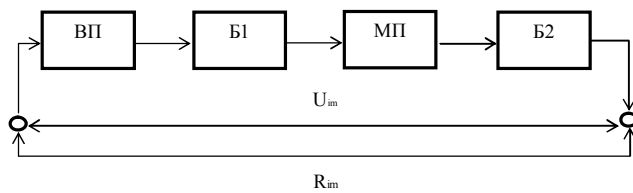


Рис. 5. Узагальнена структурна схема АІО

Розглянемо функціональне призначення кожного структурного вузла АІО. ВП сприймає енергетичну дію від вимірювального кола і приводить її до вигляду, зручного для подальшого перетворення. МП формує необхідне співвідношення між струмом, що протікає через імітатор, і спадом напруги на ньому. Б1 погоджує вихідний опір ВП з вхідним опором МП, а Б2 передає сигнал з МП на вихід імітатора. Характер з'єднань структурних вузлів між собою та їх будова визначають в остаточному результаті потенційні можливості АІО, тому доцільно розглянути можливі способи побудови АІО[7].

У загальному випадку значення відтворюваного опору АІО, з урахуванням коефіцієнтів перетворення його структурних вузлів, можна подати як [7]

$$R_{im} = k_{B1} \cdot m(N) \cdot k_{B2} \cdot R_n, \quad (5)$$

де k_{B1} , k_{B2} – коефіцієнти перетворення буферних елементів Б1, Б2; R_n – значення зразкового резистора.

Значення коефіцієнтів перетворення k_{B1} , k_{B2} залежать від конкретної схемної реалізації АІО. Аналіз варіантів реалізації АІО показав, що можна виділити три види імітаторів, котрі реалізують залежності відтворюваного опору від коду, а саме:

$$R_{im} = (1 + m(N)) \cdot R_n; \quad (6)$$

$$R_{im} = (1 - m(N)) \cdot R_n; \quad (7)$$

$$R_{im} = m(N) \cdot R_n. \quad (8)$$

Отже, у разі зміни $m(N)$ від 0 до 1 опір, що відтворюється АІО з функцією перетворення (6), змінюватиметься від R_n до $2R_n$, для структур з функцією перетворення (7) від R_n до 0 Ом, а для структур з функцією перетворення (8) від 0 Ом до R_n .

Для метрологічної перевірки ВТС можна використати одноканальні імітатори опору, але в цьому випадку також необхідний додатковий демультимплексор в колі еталонного об'єкта, а це, своєю чергою, спричинює додаткову похибку.

Одне з можливих вирішень цієї проблеми – використання багатоканального імітатора опору. В такому разі на основі апроксимації об'єкта, багаторазово розв'язавши пряму задачу, знаходять еквівалентні

міжелектродні опори (імпеданси), після цього на вході імітатора встановлюють потрібні значення опорів і проводять вимірювання, збирають дані, конструюють в образ і порівнюють реконструйоване значення із заданим. Спрощення схеми полягає в її гнучкості – можливості задавання різних опорів. Проблемою є те, що на сьогодні існують лише одноканальні імітатори опору. Тому слід виконати додаткові дослідження з метою створення багатоканальних АІО, придатних для метрологічної перевірки ВТС.

Висновки. Виконано огляд різних схем перевірки ВТС, на основі нього зроблено висновок про доцільність комплексної перевірки ВТС.

Розглянуто можливість використання одноканального імітатора опору для метрологічної перевірки ВТС.

Зроблено висновок, що одним з можливих вирішень проблеми метрологічної перевірки ВТС є використання багатоканальних імітаторів опору, що вимагає додаткових досліджень.

1. Dickin F.J., Zhao X.J., Abdullach M.Z., Waterfall R.C. *Tomographic Imaging of Industrial Process Equipment Using Electrical Impedance Sensors. Sensors: Technology, Systems and Applications*. Edited by K.T.V.Grattan Centre for Mesurement, Instrumentation and Applied Physics. Adam Higler, Bristole, Philadelphia and New York.1991. – P. 215–220.
2. Lidgley F.J., Zhu O.S., McLeod C.N., Brecon W.R. *electrode Current Determination from Programmable Voltage Sources. Electrical Impedance Tomography. Clinical Physics and Physiological Measurement*. Vol.13, Suppl.A, 1992. – P. 43–46.
3. Дорожовець М.М. *Томографічні вимірювання просторового розподілу фізичних величин (На прикладах електричної та акустичної томографії): дис... д-ра техн. наук. – Львів, 2001. – 335 с.*
4. Петровська І.Р. *Підвищення точності та швидкості вимірювання просторового розподілу питомої електричної провідності середовища томографічним методом: дис. канд. техн. наук. – Львів. – 2006. – 170 с.*
5. Дорожовець М.М., Пригородський А.Б. *Прямий та опосередкований методи відтворення провідності в електричній томографії // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2010. – № 71. – С. 3–7.*
6. Дорожовець М.М., Волкова Ю.Т. *Методи метрологічної перевірки вимірювальних електричних томографічних систем // Системи обробки інформації. – Харків – 2011. – № 6 (96). – С.113–116.*
7. Микійчук М. *Дослідження структур активних імітаторів опору як основи промислових калібраторів // Вимірювальна техніка та метрологія. – Львів, 2010. – № 71. – С. 33–38.*