

УДК 621.3

Ю.Т. Волкова<sup>1</sup>, М.М. Дорожовець<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна<sup>2</sup>Ряшівська політехніка, Ряшів, Польща

## МЕТОДИ МЕТРОЛОГІЧНОЇ ПЕРЕВІРКИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТОМОГРАФІЧНИХ СИСТЕМ

У статті розглядається структура вимірювальних електричних томографічних систем і методи її перевірки. Розглянуто основні складові метрологічної перевірки і оцінювання складових похибок електричних томографічних систем, а також методики метрологічної перевірки вимірювальних електричних томографічних систем.

**Ключові слова:** метрологічна перевірка, електрична томографічна система, похибка.

### Вступ

Електричну томографію використовують для знаходження просторового розподілу провідності, діелектричної проникливості, комплексної провідності, магнітної проникливості та інших пов'язаних з ними величин всередині об'єкта за результатами вимірювань зовнішніх електричних величин [1].

Електрична томографія – метод отримання двичі тривимірної структури досліджуваного об'єкта при прикладанні ззовні до об'єкта струму (як постійного, так і змінного), а на поверхні реєструються міжелектродні потенціали, або навпаки – прикладається напруга, а вимірюється струм. Знаючи значення прикладених струмів і зареєстрованих потенціалів, розв'язуючи так звану обернену задачу, 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 електричну 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.

Одним із найважливіших проблем застосування вимірювальних томографічних систем (ВТС) у вимірювальній практиці є необхідність створення відповідного метрологічного забезпечення. На сьогоднішній день відсутні стандартизовані методики перевірки таких систем, а використання традиційних методик не може бути безпосередньо використано оскільки є істотною специфікою томографічних вимірювань. Відповідно до томографічного принципу локальні просторові значення шуканого розподілу провідності всередині об'єкта недоступні ні для прямого ні для опосередкованого вимірювання. Ре-

зультати вимірювань зовнішніх величин (струмів чи потенціалів або між електродних провідностей чи опорів) містять інтегральну по всьому об'єкту інформацію про локальні значення розподілу провідності. Тому загалом неможливо застосувати методику перевірки системи лише на основі еталонних засобів вимірювань [2 – 5]. Це зумовлено тим, що навіть за ідеально точних засобів вимірювання похибка відтворення образу розподілу може бути великою внаслідок методичних похибок розв'язування прямої та оберненої томографічних задач. Тобто існує також необхідність перевірки похибок алгоритмів та інших обчислювальних процедур, а також слід враховувати фізичну модель просторового розподілу електричної величини всередині об'єкта.

**Метою даної роботи** є створення методики та засобів метрологічної перевірки таких систем, що враховують всі основні складові похибок ВТС.

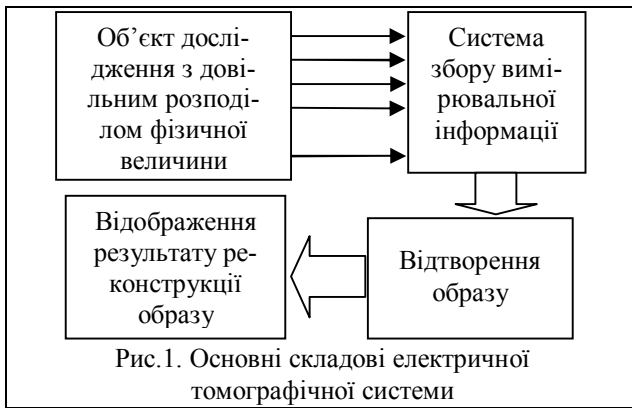
### 1. Структура електричної томографічної системи і системи збору вимірювальних даних

З метою розробки методики перевірки насамперед розглянемо структуру томографічної системи та її основні складові. Томографічні вимірювання здійснюються за узагальненою схемою, показаною на рис. 1.

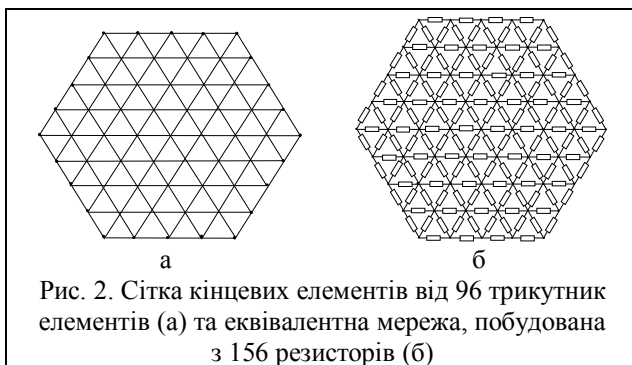
**Фізична модель об'єкту дослідження і її апроксимація.** Внутрішня структура фізичної моделі повинна відповідати методу апроксимації рівняння Пуассона:

$$\nabla \cdot [(\gamma(x, y) + j\omega\varepsilon(x, y))\nabla\varphi(x, y)] = 0, \quad (1)$$

де  $\gamma(x, y)$  – провідність і  $\varepsilon(x, y)$  – діелектрична проникність провідності середовища;  $\varphi(x, y)$  – потенціал всередині розподілу;  $\omega$  – це частота електричного збудження. Результати дослідження показали, що найбільш ефективне рішення рівняння (1) виходить за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) [7 – 9].



Від такого наближення досліджувана область покрита сіткою трикутних елементів (рис. 2, а), якій відповідає електрична мережа резисторів (рис. 2, б) і (або) конденсаторів. Конфігурації мережі і кількість її резисторів залежить від використовуваного номера трикутника кінцевих елементів і їх розташування.



**Система збору даних.** Блок-схема системи збору даних (СЗД) зображена на рис.3. Основними компонентами СЗД є:



- багатоканальні мультиплексори для кількості струму збудження і вимірювання напруги;
- джерело струму збудження ( $I_0$ );
- інструментальний підсилювач, АЦП (або інтегрована вимірювальна карта з цифровим виходом на шину PCI);
- персональний комп'ютер (ПК) з відповідним програмним забезпеченням.

**Програмне забезпечення.** Програмне забезпечення ВТС включає наступні основні складові:

- керування системою збирання вимірювальних даних;

- первинне опрацювання вимірювальних даних (відбраковка даних, фільтрація, усереднення тощо);
- відтворення (реконструкція) образу розподілу провідності (чи іншої величини);
- відображення та пересилання реконструйованих даних;
- керування технологічним процесом відповідно до результатів реконструкції образу.

## 2. Основні складові похибки електричних томографічних систем

Відповідно до структури томографічної системи основними складовими похибки томографічного вимірювання просторового розподілу провідності є:

- похибки інструментальних засобів системи, які включають: мультиплексори, струм вирушення;
- похибки відтворення образу розподілу за результатами вимірювань електродних величин (оберненої задачі);
- похибка, що зумовлена неадекватністю прийнятої математичної моделі електричного поля всередині об'єкта;
- похибка наближеного розв'язування польової задачі.

За таких умов для метрологічної перевірки томографічних вимірювальних систем необхідно скористатись методом еталонної величини.

В процесі розробки, дослідження та відлагодження томографічних систем необхідно мати можливість окремого визначення складових похибки (інструментальних та методичних). Для цього еталонна фізична модель має задовольняти певні вимоги, а саме: мати таку саму конфігурацію зовнішніх вимірювальних електродів як і реальний об'єкт, її внутрішня структура має відповідати способу апроксимації при наближеному розв'язуванні польової задачі, елементи внутрішньої структури моделі мають бути виконані з необхідною точністю і бути регульованими. Отже за своєю суттю еталонна модель є багатоканальною, багатозначною, регульованою мірою електричної провідності.

Для фізичної моделі ще необхідно встановити вимоги щодо точності її елементів. Специфіка проблеми полягає в тому, що чутливість вимірювальних величин до зміни провідності в різних частинах середовища є неоднаковою. Найбільша чутливість досягається біля вимірювальних електродів, тобто на периферії, а в центрі об'єкта вона найменша, що супроводжується погіршенням точності відтворення провідності в цій зоні. З урахуванням цього при побудові дискретної фізичної моделі точність її елементів має зростати в напрямку від країв до центру. Оскільки похибка відтворення образу провідності в декілька відсотків вважається задовільною, то загалом особливих проблем щодо вибору елементів провідності не існує. Створена таким чином фізична модель просторового розподілу провідності дозволяє оцінювати як окремо різні складові похибки системи, так і її сумарну похибку [6].

### 3. Методика оцінювання основних складових похибок ВТС

**Оцінювання інструментальної похибки.** Реконструктивний алгоритм може збільшити вплив таких похибок у сотні і навіть тисячі разів [6]. 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 при розв'язанні польової задачі, завдяки чому похибка останньої не буде впливати.

Похибку інструментальних засобів системи оцінюють звичайним способом, а різницю між результатами вимірювань електродних величин та їх розрахованими значеннями

$$\Delta_{\text{інстр}} = M^{\text{вим}} - M^{\text{розр}},$$

де  $M^{\text{розр}}$  – розраховані значення для заданих значень провідності певної кількості елементів і струмів збудження.

**Оцінювання похибки алгоритму відтворення образу.** В алгоритмі А відтворення образу провідності як вхідні використовуються значення  $M^{\text{розр}}$  електродних величин, отримані шляхом розв'язування прямої задачі при заданих значеннях параметрів моделі. За ними відтворюють образ провідності  $\gamma^{\text{rec}}(\text{розр}) = A(M^{\text{розр}})$ . Похибку алгоритму відтворення визначають як різницю між відтвореними та заданими значеннями елементів моделі

$$\Delta_{\text{rec}} = \gamma^{\text{rec}}(\text{розр}) - \gamma^{\text{ref}},$$

де  $\gamma^{\text{ref}}$  – відомий розподіл провідності.

**Оцінювання сумарної похибки.** Тут мається на увазі сумісна дія похибок вимірювання засобів та алгоритму відтворення образу. В алгоритмі реконструкції як вхідні використовуються результати вимірювань електродних величин. Похибка в цьому випадку є різницею між відтвореними значеннями елементів

$$\Delta_{\text{rec}} = \gamma^{\text{rec}}(\text{вим}) - \gamma^{\text{ref}}.$$

**Оцінювання похибки апроксимації.** Цю складову методичної похибки відтворення образу розподілу провідності можна оцінити розрахунковим методом. Для цього, при безпосередньо заданому розподілі провідності, пряму задачу розв'язують застосовуючи апроксимацію, для якої похибка для даних умов є нехтовно малою і отримують дійсні розрахункові значення електродних величин  $M^{\text{розр}}(\text{true})$ . Це можна досягнути шляхом збільшення кількості елементів апроксимації, або застосування іншої, але більш точнішої апроксимації, наприклад, параболічної апроксимації потенціалу і лінійної апроксимації провідності. Розраховані таким чином оцінки електродних величин використовують у реконструктивному алгоритмі, результатом роботи якого є апроксимований заданою кількістю елементів обра-

зу розподілу провідності  $\gamma^{\text{rec}}(\text{true}) = A(M^{\text{розр}}(\text{true}))$ . Похибка апроксимації на вході і на виході

$$\Delta_{\text{апр}}(M) = M^{\text{розр}} - M^{\text{розр}}(\text{true});$$

$$\Delta_{\text{апр}}(\gamma) = \gamma^{\text{rec}} - \gamma^{\text{rec}}(\text{true}).$$

Для експериментального оцінювання похибки апроксимації необхідно передбачити можливість зміни внутрішньої структури моделі на предмет збільшення в необхідну кількість раз фізичних апроксимаційних елементів моделі [6].

### Висновки

1. Запропонована методика метрологічної перевірки ВТС, яка дає можливість окремо оцінювати інструментальну складову, алгоритму відтворення, апроксимації, а також сумарну похибку;

2. Основою до метрологічної перевірки є створення еталонної моделі об'єкту з такою самою конфігурацією зовнішніх електродів і внутрішньою структурою, яка відповідає способу апроксимації польової задачі;

3. Наступним етапом досліджень є розробка еталонної фізичної моделі для перевірки ВТС і створення відповідного програмного забезпечення.

### Список літератури

1. Дорожовець М.М. Використання теореми варіацій для розрахунку матриці Якобі для оберненої задачі електричної томографії / М.М. Дорожовець // Вісник ДУ "Львівська політехніка". – 2003. – № 479. – С. 67-71.
2. Бурдун Г.Д. Основи метрології / Г.Д. Бурдун, Б.Н. Марков. – М.: Изд-во стандартів, 1975. – 225 с.
3. Любимов Л.И. Проверка средств электрических измерений / Л.И. Любимов, И.Д. Форслова. – Л.: Энергия, 1989. – 192 с.
4. Орнадский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П.П. Орнадский. – К.: Вища школа, 1984. – 320 с.
5. Циделко В.Д. Метрологическое обеспечение систем / В.Д. Циделко, Н.А. Яремчук. – К.: УМК ВО, 1988. – 100 с.
6. Дорожовець М.М. Томографічні вимірювання просторового розподілу фізичних величин на прикладах електричної та акустичної томографії): дис. ... доктора технічних наук / М.М. Дорожовець. – Львів, 2001. – 335 с.
7. Dorozowiec M. Use of the multi-element resistance strain transducers for measurement of the tension distribution / M. Dorozowiec // Metody i technika Przetwarzania sygnalow w pomiarach fizycznych. – Rzeszow, 1997. – P. 43-49.
8. Electrical Impedance Tomography System Based on Equipotential Electrodes / M. Dorozhovets, B. Snadnyk, V. Zavgorodny, A. Kovalczyk. // Proc. of XV Symp. Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits. – Poznan-Liege, Belgium, Sept. 1998. – P. 269-271.
9. Khan S.H. Validation of Finite Element Modelling of Multielectrode Capacitive System for Process Tomography Flow Imaging / S.H. Khan, F. Abdullah // Tomographic techniques. – 1993. – P. 63-73.

Надійшла до редколегії 28.08.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.О. Яцук, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна.

---

**МЕТОДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ПОВЕРКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОМОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Ю.Т. Волкова, М.М. Дорожовец

*В статье рассматривается структура измерительных электрических томографических систем и методы ее поверки. Рассмотрены основные составляющие метрологической поверки и оценка составляющих погрешностей электрической томографической системы, а также методики метрологической поверки измерительных электрических томографических систем.*

**Ключевые слова:** метрологическая поверка, электрическая томографическая система, погрешность.

**METHODS OF METROLOGICAL VERIFICATION OF MEASURING ELECTRICAL TOMOGRAPHY SYSTEMS**

J.T. Volkova, M.M. Dorozhovets

*In this paper the structure of measuring electrical tomography systems and methods for its' verification are represented. The main parts of metrological verification and assessment composes of errors, and also methodologies of metrological verification of electrical tomography systems are reviewed.*

**Keywords:** metrological verification, electrical tomography system, error.