

МІНІМІЗАЦІЯ СИСТЕМАТИЧНОЇ ПОХИБКИ МІРЯННЯ ЕЛЕКТРОІМПЕДАНСНОГО ТОМОГРАФА

Для усунення систематичної похибки мірювання електроімпедансного томографа використано синфазний метод аналізу ансамблю однофазних реалізацій томографічного експерименту. Побудовано метод усунення систематичної похибки мірювання, яка зумовлена розкидом параметрів каналів електроімпедансного томографа. Метод апробовано на даних, отриманих з використанням дослідної системи імпедансного томографа

For decreasing of measurement systematic errors of an electrical impedance tomographic experiment an in-phase method of the ensemble realization analysis are used. The method of decreasing of impedance measurement systematic errors has built. A suppose about measuring channels parameters variation considered. Results of method application on an experimental data approved.

Ключові слова: Електроімпедансний томограф, похибка.

Електроімпедансна томографія (ЕІТ) є одним зі способів неінвазивної графічної побудови зображень плоских зрізів електропровідних тіл [1]. Задача реконструкції зображення за отриманим сигналом (даними) за своєю суттю є зворотною і некоректно поставленою. Це значить, що навіть малі зміни вхідного сигналу можуть призводити до великих змін на реконструйованому зображенні [1]. Метою роботи є виявлення структури похибки вхідних даних і побудова адекватної математичної моделі похибки мірювання електроімпедансного томографа, як багатоканальної вимірювальної системи, для її мінімізації.

Похибка мірювання в імпедансній томографії містить як випадкову, так і систематичну складові. Випадкова складова похибки обумовлена незначним порушенням контакту електродів з поверхнею досліджуваного середовища, а систематична – апаратними особливостями побудови вхідного тракту томографа.

Імпедансні томографи, що побудовані на прецизійних системах відбору даних з введенням додаткових вузлів, наприклад [2], або ж повністю побудовані в науково-дослідних лабораторіях [3] так чи інакше використовують схему комутації вимірювальних електродів, реалізовану на інтегральних мультиплексорах. При цьому послідовно кожному електроду вмикається один ключ такого мультиплексора. Вибором адреси певних ключів мультиплексора комутують пару вимірювальних електродів, тобто вмикають два ключі, і під'єднують відповідну ділянку поверхні тіла до первинного вимірювального перетворювача (ПВП) (рис. 1).

У ПВП вимірювана величина опору тіла між парою електродів перетворюється у напругу і далі трактується як сигнал. Опір відкритого каналу КМОН-структури є скінченим, та для різних ключів навіть одного напівпровідникового кристалу змінюється в межах (1-6) % від номінального залежно від типу інтегральної схеми [4]. Якщо досліджуване провідне тіло має опір близький до номінального опору відкритого ключа мультиплексора, то матимемо досить суттєве значення похибки. Оскільки опір ключа є сталим, то складова похибки, зумовлена останнім, є усувною, систематичною. Побудова адекватної математичної моделі похибки мірювання у стосунку до електроімпедансної томографії у відомій літературі не висвітлюється. Хоча, усунення похибки при вимірюванні електричного імпедансу дасть можливість отримувати коректніший розв'язок зворотної

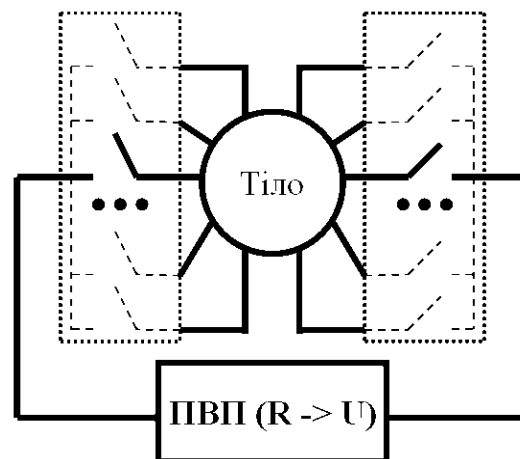


Рис. 1. Вхідний тракт електроімпедансного томографа

задачі реконструкції. Нижче наведено метод усунення систематичної похибки для електроімпедансного томографа. Метод застосовано для попередньої обробки даних, отриманих при проведенні томографічного експерименту з використанням макету імпедансного томографа. Томографічним експериментом (ТЕ) називатимемо процес вимірювання електричного імпедансу на поверхні провідного тіла з допомогою системи вимірювальних електродів. Тому, для реалізації ТЕ, зрозуміло, потрібні певні апаратні засоби.

Відбір даних ТЕ. В рамках науково-дослідної роботи на кафедрі біотехнічних систем розроблено макет електроімпедансного томографа для реалізації двохелектродного режиму вимірювання опору ділянки провідного середовища [5]. Томограф вимірює падіння напруги на ділянці тіла між задіяною парою електродів при пропусканні крізь нього змінного електричного струму (послідовність прямокутних імпульсів типу “меандр” з частотою слідування 100 кГц та амплітудою 10 В). Величина струму обмежується значенням 1 мА. Схема комутації забезпечує по чергові під'єднання пари електродів до ПВП. Схема комутації виконана на інтегральних КМОН мультиплексорах, розкид опору відкритого каналу яких складає 5 %. Для вимірювання опору ділянки провідного середовища однією парою електродів задіяються два

ключі мультиплектора, які вмикаються послідовно опору ділянки провідного середовища (див. рис. 1). Елемент власного опору відкритих каналів ключів мультиплексорів є джерелом систематичної похибки. Для її усунення використано диференціальний режим вимірювання, в якому результат вимірювання формується як різниця між результатом спостереження та поправкою на опір послідовно ввімкнених у вимірювальне коло ключів мультиплексорів. Оскільки в ТЕ використовуються різні попарні комбінації електродів i , відповідно, різні попарні комбінації ввімкнених в вимірювальне коло ключів, то поправка буде одномірним числовим масивом, кожен елемент якого еквівалентний опору відповідної пари.

Для формування масиву поправки систематичної похибки проведено ТЕ з коротко з'єднаними електродами вимірювальної системи (режим калібрування). В цьому режимі вимірювали лише опір відкритих каналів послідовно-ввімкненої пари ключів. Логічним є припущення про сталість опору відкритого ключа i , тому, про наявність кореляційного зв'язку між окремими реалізаціями ТЕ. І дійсно, для окремих пар реалізацій ТЕ значення коефіцієнту кореляції отримали в межах (0.96-0.98). Це значить, що навіть в режимі калібрування (відсутня складова похибки, яка зумовлена зміною електричного контакту) також має місце і випадкова складова. Тому, результат ТЕ в режимі калібрування потрібно трактувати як деякий випадковий процес (ВП) з елементом повторюваності його окремих реалізацій. Кореляційна функція, отримана для двох реалізацій ТЕ в режимі калібрування (див. рис. 2) досягає максимуму при нульовому зсуві, що підтверджує їх однофазність і дає підставу застосувати для аналізу останніх синфазний метод отримання інваріантних оцінок: математичного сподівання та середньоквадратичного відхилення [6]. Самі математичне сподівання і середньоквадратичне відхилення стаціонарних компонент характеризуватимуть конкретний ансамбль реалізацій ТЕ та самі будуть випадковими функціями. Тобто, за одним ансамблем реалізацій ТЕ знайдемо лише їх оцінки.

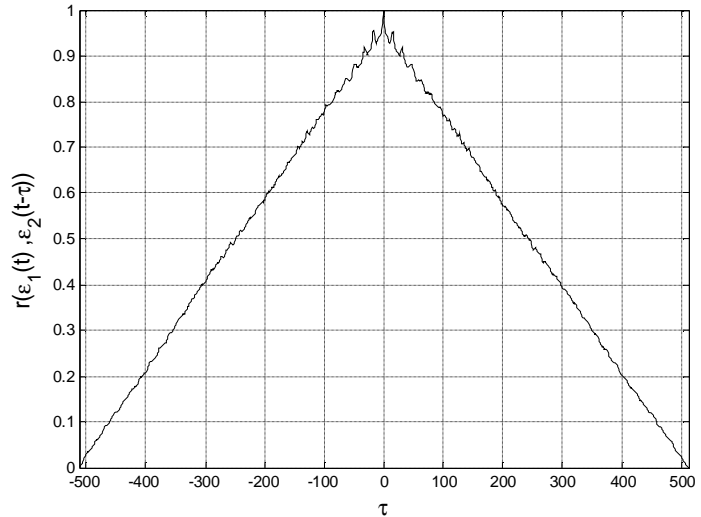


Рис. 2. Взаємна кореляційна функція двох реалізацій ТЕ в режимі калібрування

Для синфазного аналізу проведено 64 реалізації ТЕ із коротко з'єднаними вимірювальними електродами. На рис. 3 показано ансамбль реалізацій ТЕ з коротко з'єднаними електродами. По осі аплікату дано значення вимірюваної величини у відсотках до динамічного діапазону АЦП.

З рис. 2 бачимо, що розкид значень опорів відкритих каналів мультиплексорів є досить значним, і становить близько 20% динамічного діапазону АЦП. Щоб компенсувати власний опір вимірювальних каналів введемо поправку $d(i)$, як масив значень власних опорів (чи пропорційних їм напруг) отриманих при обробці ансамблю реалізацій ТЕ в режимі калібрування. При калібруванні отримуємо двохмірний масив-спостереження $\Omega_{obs}^{TEST}(i, j)$, де $i \in N \subset Z$ – індекс спостереження в межах одного експерименту, j – індекс ТЕ в ансамблі. При попередньому опрацюванні масиву спостереження синфазним методом отримаємо поправку $d(i)$. Тоді результат вимірювання $\Omega_{meas}(i)$ формуватиметься з результату спостереження ТЕ $\Omega_{obs}(i)$ як $\Omega_{meas}(i) = \Omega_{obs}(i) - d(i)$.

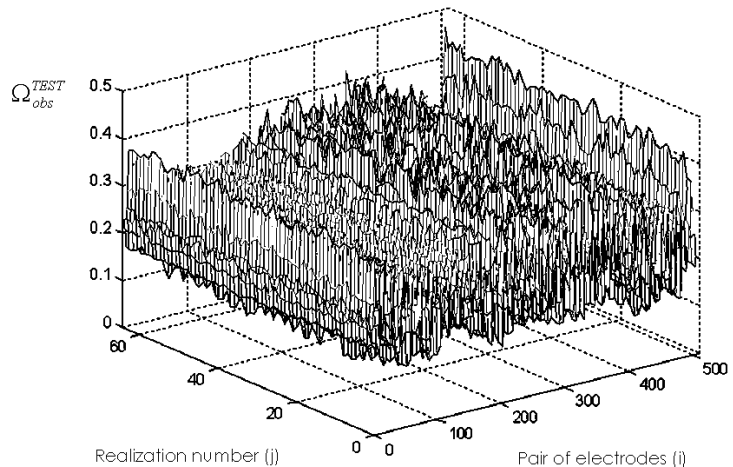


Рис. 3. Ансамблі реалізацій ТЕ

Математична модель поправки систематичної похибки. Одна реалізація $\Omega_{obs}^{TEST}(i, \bullet)$, де \bullet – символ індексу реалізації, як випадковий процес (ВП) є обмеженою послідовністю спостережуваних значень опору $\Omega_{k,m}$ i -ї двійки $k, m \in N \subset Z$ ключів мультиплектора $\Omega_{km} = f_{\Omega}(i)$. Адекватною моделлю сигналів від синхронних мультиплексорних систем є ВП класу \mathcal{P} , які розглядаються в рамках енергетичної теорії стохастичних сигналів [6]. Клас \mathcal{P} є класом ВП з обмеженою потужністю. ВП, як реалізацію ТЕ, відносимо до класу \mathcal{P} , оскільки для отримання його синфазних оцінок нам буде достатньо використовувати

норму у вигляді зваженої суми квадрату значень функції лінійної комбінації пар опорів по всій реалізації, тобто потужність сигналу:

$$P_{\Omega} = \frac{1}{N} \sum_{i=1..N} f_{\Omega}(i) \quad (1)$$

В нашому випадку аргумент ВП є i (точніше індекс впорядкованої послідовності) $\Omega_{obs}^{TEST}(i, \bullet)$ обмежений кількістю N можливих, необхідних для реалізації одного ТЕ, вмикань двійок каналів мультиплексора, а область значень обмежена гарантованим виробником інтегральної схеми мультиплексора значенням опору відкритого каналу з заданою похибкою. Це дає можливість зробити висновок про обмеженість потужності окремих реалізацій $\Omega_{obs}^{TEST}(i, \bullet)$, як деякого ВП, тобто $P_x < \infty$ і про приналежність останнього до класу \mathcal{P} випадкових процесів скінченної середньої потужності. Якщо параметром варіантів ВП покласти індекс реалізації з експериментально отриманого ансамблю, то отримаємо параметроваріантний клас \mathcal{P} , характеристики якого повторювані від варіанту-реалізації. Маємо випадок періодично-корельованого ВП $\Omega_{obs}^{TEST}(i, \bullet) = x_{i, \bullet}$, в якому $m(x_{i, \bullet}) = const$, та $r(x_{i, \bullet}) = const$ [6]. Знайдемо оцінки стаціонарних компонент ВП. Оцінка математичного сподівання стаціонарних компонент ВП і буде тим функціоналом для мінімізації систематичної помилки мірвання в ТЕ. Її знайдемо як

$$d(i) = \hat{m}_i(x) = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q x_{i,q} - m(x_{\cdot,q}).$$

На рис. 4 показано графік отриманої оцінки математичного сподівання. Випадкову складову оцінимо з використанням середньоквадратичного відхилення для отриманих однофазних реалізацій ТЕ як стаціонарних компонент. Нижче приведений графік стандартного відхилення стаціонарних компонент ВП

$$\hat{D}_i(x) = \sqrt{\frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q (x_{i,q} - \hat{m}_i(x))^2}.$$

З рис. 5 бачимо, що випадкова складова для деяких пар мультиплексорів становить майже 11.25 % від відповідного значення оцінки математичного сподівання (приблизне значення, отримане як відношення максимальних поділок шкал значень графіків стандартного відхилення і математичного сподівання), що не значно більше за подвійний, гарантований виробником інтегральної схеми, допуск на відхилення від номінального опору відкритого каналу мультиплексора (який становить 5 % [4]). Зауважимо, що в обох випадках вісь значень – приведений до одиниці динамічний діапазон аналогово-цифрового перетворювача томографа. Отриманий відносний результат добре узгоджується з паспортними даними на інтегральну схему-мультиплексор. Оцінку математичного сподівання стаціонарних компонент як детермінований елемент моделі систематичної похибки мірвання використаємо для її мінімізації.

Опрацювання експериментальних даних. ТЕ, проводимо для двох випадків (показано на рис. 6 а, б).

В обох випадках маємо ванну, заповнену 0.9% $NaCl$ з розташованим в ній скляним непровідним тілом циліндричної форми. ТЕ проводиться з допомогою 32-х електродів, які рівномірно-розміщені на боковій поверхні ванни. Коли за даними ТЕ одразу ж проводити реконструкцію, то отримаємо зображення, показане на рис. 7 а, б.

Зображення на рис. 8 отримані із вихідних даних, до яких було застосовано методику усунення систематичної похибки. Зменшився фон, зумовлений впливом власного опору вимірювальної системи і тепер виявити стороннє тіло значно простіше.

Використання енергетичної теорії стохастичних сигналів при синфазному аналізі ансамблю реалізацій сигналу від електроімпедансного томографа мало своєю метою побудувати зразковий сигнал-

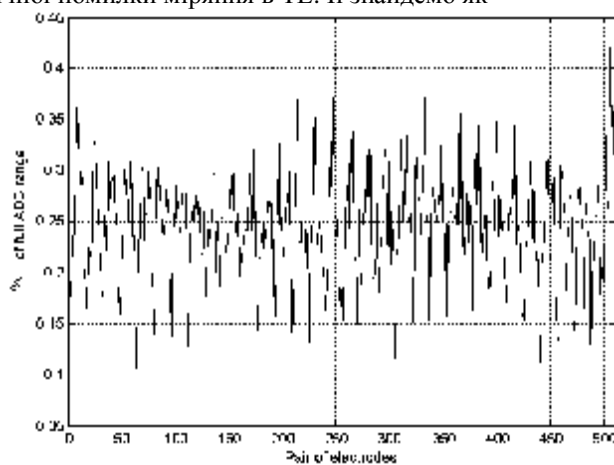


Рис. 4. Оцінка математичного сподівання стаціонарних компонент ансамблю реалізацій ТЕ

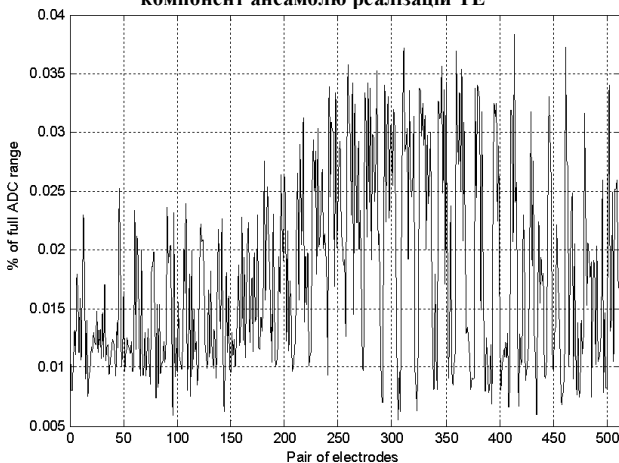


Рис. 5. Оцінка стандартного відхилення стаціонарних компонент

поправку, як елемент негативного зворотного зв'язку для вхідного тракту томографа. При цьому використали лише один з елементів математичної моделі – оцінку математичного сподівання. Плануємо оцінку середньоквадратичного відхилення використати для побудови регуляризуючого оператора. Це дозволить коректніше проводити високочастотну фільтрацію проєкційних даних.

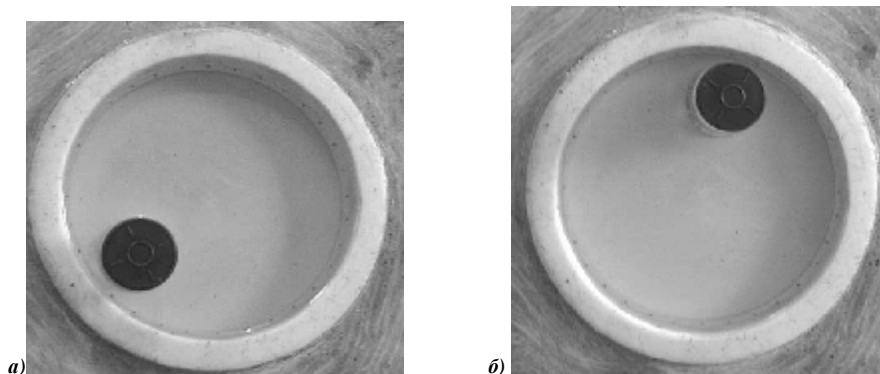


Рис. 6. Натурне моделювання томографічного експерименту: а) випадок 1; б) випадок 2

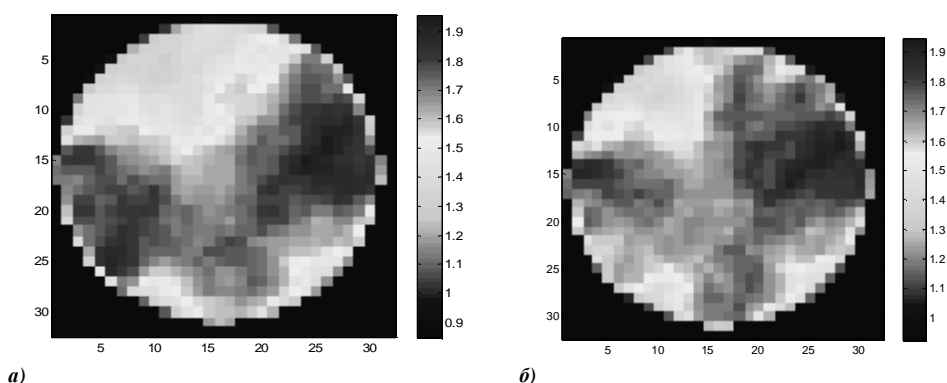


Рис. 7. Реконструйоване зображення (дані з систематичною похибкою) а) випадок 1; б) випадок 2

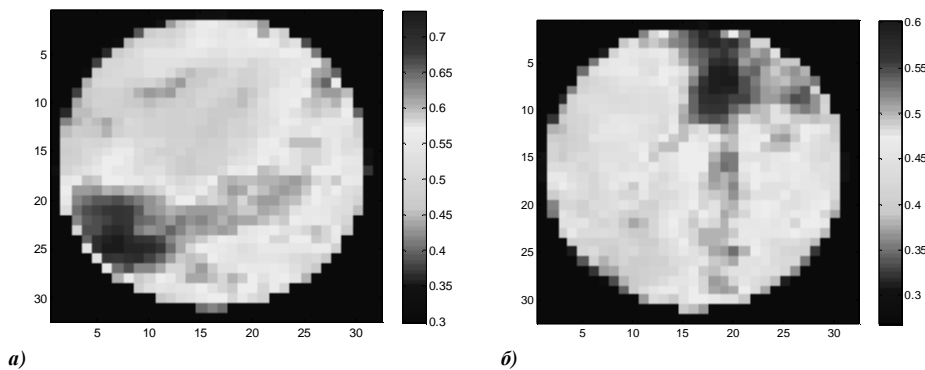


Рис. 8. Реконструйоване зображення (систематичну похибку усунуто) а) випадок 1; б) випадок 2

Література

1. Electrical Impedance Tomography: Methods, History and Applications / editor David Holder, Manchester Institute for Mathematical Sciences School of Mathematics. – Manchester, Institute of Physics Publishing, 2004. – 456p.
2. Kovačić, D. An electrical impedance tomography system for current pulse measurements [Електронн. ресурс]. – режим доступу: <http://www.bib.irb.hr/datoteka/71589.D.pdf>
3. Soleimani, M. Electrical impedance tomography system: an open access circuit design [Електронн. ресурс]. – режим доступу: <http://www.biomedical-engineering-online.com/content/5/1/28>
4. Шило В.Л. Популярныe цифровыe микросхемы: Справочник / Шило В.Л. – М.: Радио и связь, 1987. – 352с.
5. Яворський Б.І. Метод реконструкції зображень в електроімпедансній томографії / Б.І. Яворський, Ю.Б. Промович // Вісник ТДТУ ім. І. Пулюя. – 2009. – Том 14. – № 1. – С. 154-161
6. Драган, Я. Енергетична теорія лінійних моделей стохастичних сигналів / Драган Я.; Центр стратегічних досліджень еко-біо-технічних систем. – Львів, 1997. – 333 с.

Надійшла 14.5.2010 р.