

# ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ І МАГНІТНИХ ВЕЛИЧИН

УДК 621.317

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАНЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН У ТОМОГРАФІЇ

© Ірина Петровська, 2009

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра інформаційно-вимірювальних технологій,  
Львів, вул. С. Бандери, 12, 79013, Україна

*Проаналізовано різні методи вимірювань міжелектродних різниць потенціалів та обґрунтовано вибір  
реконструйованої величини в електричній томографії.*

*Проанализировано разные методы измерений межэлектродных разниц потенциалов и обосновано выбор  
реконструированной величины в электрической томографии.*

*In the article different methods of measurements of interelectrode differences of potentials are analysed and the choice  
of the reconstructed size in an electric tomography is proved.*

**1. Вступ.** Одним з напрямків томографії є електрична томографія (electrical tomography) [1–3]. Електрична томографія – метод отримання 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 величини прикладених струмів і зареєстрованих потенціалів, 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 Шеффілда, дослідження яких відрізнялися способом зондування об’єкта досліджень і визначенням реакції на це збудження.

**2. Мета досліджень** – обґрунтувати вибір методу зондування об’єкта досліджень в електричній томографії та виконання вимірювань електродних величин.

**3. Вибір методу зондування об’єкта досліджень в електричній томографії та виконання вимірювань**

**електродних величин.** В електричній томографії переважно використовуються дві схеми зондування об’єкта досліджень та знаходження його реакції на це збудження – оксфордська та шеффілдська (рис. 1, 2).

На рис. 1 показана оксфордська схема, в якій об’єкт досліджень зондується різницею потенціалів між певними електродами, а вимірюються струми на решті електродів [4]. Один з електродів (*i*-й електрод) “нульовий”, або заземлений.

Потенціали електродів подаються так, щоб значення струмів визначались геометричним положенням відповідного електрода відносно “нульового”, за виразом:  $I_j = I_0 \cdot \cos\varphi_j$ , де  $\varphi_j$  – кут між центральним напрямком (між 1-м і “нульовим” електродом) і напрямком на певний *j*-й електрод. Це дає глибше проникнення струмів у внутрішні шари об’єкта досліджень, що забезпечує покращання точності вимірювань.

Ця схема придатніша для однорідного середовища, де досліджувана величина є стала. Електрична томографія займається неоднорідними середовищами, при зміні розподілу провідності в об’єкті траєкторії ліній протікання струму будуть змінюватись, як і потенціали, прикладені до електродів, а струми замикатимуться не тільки між струмовим електродом і “заземленим”, а також і між сусідніми.

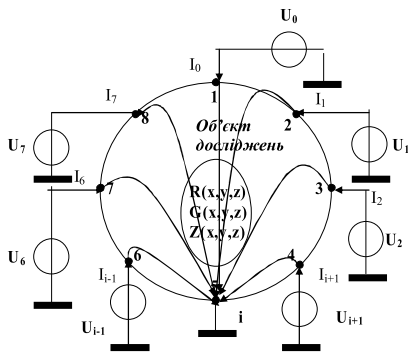


Рис. 1. Оксфордська схема методу вимірювань в електричній томографії

При потенціаловому зондуванні об'єкта вимірюваними є електродні струми, а під час розв'язання прямої задачі вони є у правій частині матричного рівняння, яке описує пряму задачу [5]:

$$G_{ekw} \cdot U_0 = I_z \quad (1)$$

і тому не потрібне знаходження оберненої матриці з усіма можливими негативними наслідками щодо поганої зумовленості системи рівнянь та збільшення часових затрат на розв'язання прямої задачі томографії.

У такій схемі (рис.1) для зменшення деформації густини струмів у приелектродних ділянках проміжки між електродами мають бути якнайменшими. Однак необмежене їх зменшення призводить до зменшення опору між базовим збуджуючим і сусідніми з ним електродами. В результаті цього основний струм через об'єкт замикається між базовим та прилеглими до нього електродами. Струми електродів після сусідніх з базовим електродом майже не залежать від ширини електродів.

Основною проблемою при застосуванні цієї схеми є вплив неконтрольованих змін опору електричних контактів  $R_k$  між електродами та об'єктом (рис.3).

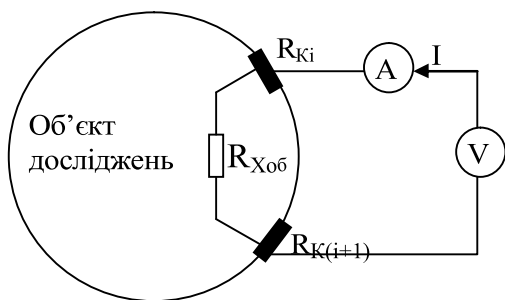


Рис.3. Вплив опорів контактів на вимірюваний струм

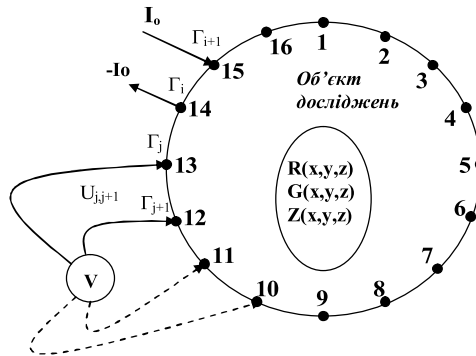


Рис. 2. Шеффілдська схема методу вимірювань в електричній томографії

Як бачимо, вимірюваний струм залежить від опорів контактів  $R_{Ki}$  і  $R_{K(i+1)}$ :

$$I = \frac{U}{R_{Xоб} + R_{Ki} + R_{K(i+1)}} \quad (2)$$

Тому, якщо провідність середовища велика (вимірювані опори малі), то і вплив опорів контактів буде великим.

Зауважимо, що ці опори практично важко виміряти, оскільки немає доступу до внутрішньої частини об'єкта.

Інший спосіб зондування об'єкта і виконання вимірювань використовує шеффілдська схема, яка вперше була розроблена в 1983 році, коли група фізиків з госпіталю в місті Шеффілд, що в Англії, спроектувала прототип пристрою з незалежними від опорів контактів результатами вимірювань, завдяки якому можна було виконувати вимірювання на тілі людини. Цей метод виявився дуже ефективним і сьогодні близько 20 груп науковців у всьому світі активно провадять подальші дослідження щодо покращання результатів шеффілдської схеми як для клінічного, так і для промислового застосування електричної томографії.

Шеффілдська схема вимірювань показана на рис. 2 з підімкненими  $n=16$  електродами (як правило, кількість підімкнених електродів кратна восьми, тобто  $n=8, 16, 24, 32, 64$  тощо), розміщеними рівномірно на границі об'єкта. З метою нагромадження достатньої кількості вимірювальних даних до сусідніх пар електродів прикладається струм (постійний або змінний) і виконуються вимірювання спаду напруг між кожною парою електродів, за винятком електродів, до

яких підводиться струм, щоб уникнути похибок, які можуть виникнути через неконтрольований спад напруги на перехідному опорі контакту між електродом та об'єктом дослідження (цей метод вимірювань називається сусіднім – між сусідніми електродами). На рис. 4–7 подано інші можливі методи вимірювань міжелектродних напруг при подаванні збуджувальних струмів з використанням шеффілдської схеми. Це актуальніше в медичній томографії, у промисловій в багатьох випадках перехідним опором можна знехтувати.

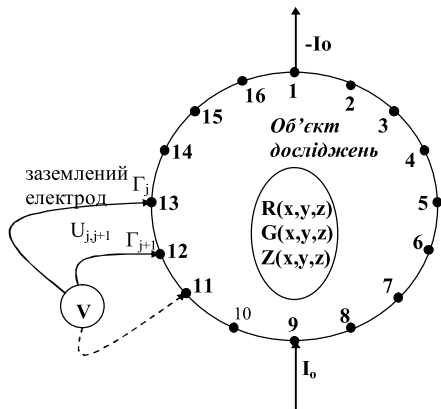
У такий спосіб виконують  $(N-3)$  вимірювань для вибраного положення електродів. В результаті, по чергово змінюючи вибране положення електродів, вимірювання повторюються і в такий спосіб отримують  $N=N*(N-3)=16*13=208$  даних вимірювань

(за час близько 80 мс), проте з них лише половина (104) є лінійно незалежними. Ці 104 різниці потенціалів є даними для реконструкції образу на 380 IBM PC, що займає близько 5 с при використанні алгоритму однієї ітерації. Отже, для такої схеми кількість незалежних результатів вимірювань:

$$N_{\text{нз\_вим}} = N*(N-3)/2,$$

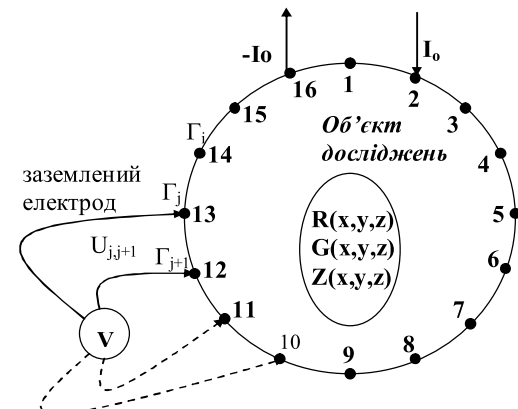
де  $N$  – кількість електродів,  $N_{\text{вим}}$  – кількість вимірювань,  $N_{\text{нз\_вим}}$  – кількість незалежних вимірювань.

Зондування об'єкта досліджень може здійснюватись при підведенні струму не тільки між сусідніми електродами, але і між всіма іншими можливими комбінаціями електродів: між протилежними або парами протилежних. Вимірювання різниці потенціалів при цьому виконують між рештою пар електродів.



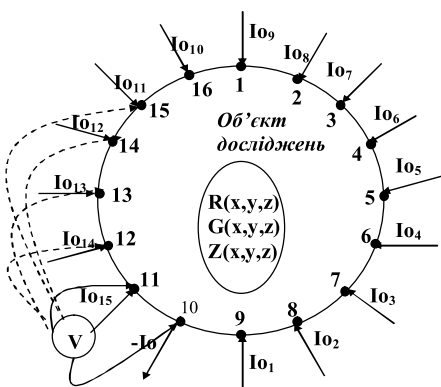
$$N_{\text{вим}} = N*(N-4); \quad N_{\text{нз\_вим}} = N*(N-4)/2$$

Рис. 4. Полусный метод збудження



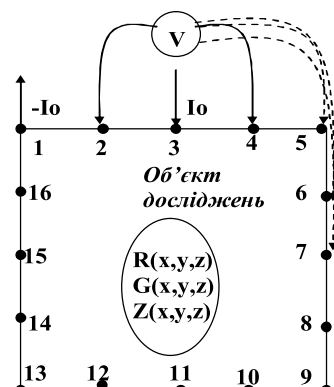
$$N_{\text{вим}} = N*(N-4); \quad N_{\text{нз\_вим}} = N*(N-4)/2$$

Рис. 5. SDP (split-drive par)



$$N_{\text{вим}} = N*(N-1); \quad N_{\text{нз\_вим}} = N*(N-1)/2$$

Рис. 6. Мультизбудження



$$N_{\text{вим}} = N*(N-4); \quad N_{\text{нз\_вим}} = N*(N-4)/2$$

Рис. 7. Хрестоподібне збудження

При збудженні струмом об'єкта досліджень шуканий вектор зовнішніх потенціалів  $U_z$  є розв'язком матричного рівняння  $G_{ekw} \cdot U_z = I_0$  (де  $G_{ekw}^{-1}$  – еквівалентна обернена матриця провідностей), звідки [100]:

$$U_z = G_{ekw}^{-1} \cdot I_0 \quad (3)$$

Для розв'язання цього рівняння необхідно знайти обернену матрицю  $G_{ekw}^{-1}$ . Недолік цієї схеми вимірювань в тому, що лінії струму замикаються біля поверхні об'єкта досліджень, не проникаючи вглиб. Тому найповніша вимірювальна інформація про результати вимірювань зовнішніх шарів об'єкта досліджень, точність вимірювань внутрішніх шарів об'єкта досліджень при цьому зменшується.

**4. Обґрунтування вибору реконструйованої величини (опору чи провідності) та методу розв'язування прямої задачі в імпедансній томографії.**

При застосуванні різних методів апроксимації електричного провідного середовища отримуємо сітку з дискретних електричних елементів. У разі провідного середовища ця сітка може бути утворена із резисторів  $R_j$  або кондукторів (провідностей)  $G_j=1/R_j$ . Постає запитання: що краще безпосередньо реконструювати: значення провідностей  $G_j$  чи опорів  $R_j$ ? Відповідь на це питання залежить від двох чинників: 1) чим збуджується об'єкт (струмом чи напругою) і що відповідно вимірюють (різниці потенціалів чи електродні струми); 2) для яких аргументів системи рівнянь оберненої задачі характерна нелінійність, тобто що забезпечує точніший і швидший розв'язок.

Якщо приймаємо, що об'єкт зондується струмом (з відомим значенням  $I_0$ ) – шеффілдська схема вимірювань – а вимірюються різниці міжелектродних потенціалів  $U$ , то система рівнянь електричної томографії може бути подана у вигляді:

$$\begin{cases} U_1 = I_0 \cdot F_1(R_1, R_2, \dots, R_n) \\ \dots \\ U_m = I_0 \cdot F_m(R_1, R_2, \dots, R_n) \end{cases}, \quad (4)$$

де  $F_1(R_1, R_2, \dots, R_n)$ ,  $F_m(R_1, R_2, \dots, R_n)$  – нелінійні функції від значень опорів елементів, або у вигляді:

$$\begin{cases} U_1 = I_0 \cdot \phi_1(G_1, G_2, \dots, G_n) \\ \dots \\ U_m = I_0 \cdot \phi_m(G_1, G_2, \dots, G_n) \end{cases} \quad (5)$$

де  $\phi_1(G_1, G_2, \dots, G_n)$ ,  $\phi_m(G_1, G_2, \dots, G_n)$  – нелінійні функції від значень провідностей елементів. Функції  $F_i(R_1, R_2, \dots, R_n)$  (4) і  $\phi_i(G_1, G_2, \dots, G_n)$  (5) відображають ефект паралельно-послідовного сполучення дискретних елементів (опорів  $R_j$  чи провідностей  $G_j$ ).

Очевидно, що з погляду лінійності кращою є система (4), оскільки фізично при усіх  $R_j \rightarrow 0$  всі міжелектродні напруги також прямують до нуля ( $U_i \rightarrow 0$ ). При зростанні усіх  $R_j$ , наприклад, у два рази ( $R_j \rightarrow 2 \cdot R_j$ ) за сталого струму, всі напруги також зростуть вдвічі т.д. Загалом зростання довільного опору приведе до зростання всіх вимірюваних напруг.

Натомість, система (5), з фізичного погляду, поводить інакше. Для отримання нульових значень напруг необхідно, щоб провідність  $G_j \rightarrow \infty$ . Збільшення провідності довільної вітки спричиняє зменшення вимірюваної напруги. Отже, ця система не володіє властивістю лінійності.

Тому доцільніше реконструювати опори  $R_j$  віток дискретної схеми заміщення, тобто описувати обернену задачу томографії неявною системою рівнянь (4). На доцільність такого вибору вказують й інші фізичні міркування, а саме: за сталого струму зміни напруг безпосередньо реконструюють зміни опорів схеми, а не провідності (за законом Ома :  $U=I_0 \cdot R$  при  $I_0 = \text{const}$   $U \sim R$ ).

Щодо вибору методу розв'язання прямої задачі томографії, то її можна розв'язувати методом вузлових потенціалів або контурних струмів. При розв'язуванні прямої задачі методом вузлових напруг система рівнянь набуває вигляду:

$$G_{ekw} \cdot U_{вузл} = I_{0збуд} \quad (6)$$

і шукані вузлові потенціали:

$$U_{вузл} = G_{ekw}^{-1} \cdot I_{0збуд} \quad (7)$$

При розв'язуванні прямої задачі методом контурних струмів система має вигляд:

$$R_{ekw} \cdot I_{віт} = I_{0збуд} \cdot R_{зовн}, \quad (8)$$

де  $R_{зовн}$  – опори зовнішніх віток, і шукані струми віток знаходимо за виразом:

$$I_{віт} = R_{ekw}^{-1} \cdot I_{0збуд} \cdot R_{зовн} \quad (9)$$

У цих рівняннях  $G_{ekw}$  і  $R_{ekw}$  – еквівалентні матриці провідностей та опорів, що відповідають знайденим методом вузлових напруг чи контурних струмів.

Основним чинником, що впливає на вибір методу, є розмір системи рівнянь – розмір матриці  $G_{ekw}$  чи  $R_{ekw}$ . За методом вузлових потенціалів розмір матриці  $G_{ekw}$  визначається кількістю вузлів схеми, а за методом контурних струмів розмір матриці  $R_{ekw}$  визначається

кількістю віток схеми. Отже, якщо кількість вузлів менша за кількість віток, то вибираємо метод вузлових напруг, якщо навпаки, то метод контурних струмів.

**5. Висновок.** Проаналізувавши різні методи зондування об'єкта досліджень в електричній томографії, обґрунтовано доцільність зондування струмом і вимірювання напруги; обґрунтовано методику виконання вимірювань електродних величин і доцільність реконструкції опорів, а не провідностей.

1. Webster J.G. *Electrical Impedance Tomography*. Adam Higler, 1990. 2. Filipowicz S. F., Rymarczyk T.

*Tomografia Impedancyjna*, BEL Studio, Warszawa 2003r. 3. Seagar A.D., Barber D.C., Brown B.H. *Electrical Impedance Imaging*. IEE Proceedings. Vol.134, Pt. A, No 2, February 1987, pp.201-209. 4. Basarab-Horwath I, Lacey P.. *A Distributed Pressure Sensor Which Utilises Electrical Impedance Tomography*. Sensor-VI. Technology, Systems and Applications. Edited by K.T.V.Grattan City University of London and A.T. Augousty Kingston University, Institute of Physics. Publishing Bristole anPhiladelphia. 1993. –P.381–386. 5. Терновой К.С., Синьков М.В., Закидальский А.И. и др. *Введение в современную томографию* / Под ред. К.С. Тернового и М.В. Синькова. –К.: Наукова думка, 1983. – 231 с.

УДК 621.317.7.089.6

## МЕТОД КОРЕКЦІЇ ІНТЕГРАЛЬНОЇ НЕЛІНІЙНОСТІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕТВОРЕННЯ ПРЕЦИЗІЙНИХ АНАЛОГО-ЦИФРОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

© Роман Кочан, 2009

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем,  
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

*Проаналізовано методи визначення інтегральної нелінійності характеристики перетворення аналого-цифрових перетворювачів. Запропоновано та досліджено метод, який ґрунтується на вимірюванні спаду напруг на резисторах чотирьохрезистивного подільника напруг при зміні порядку увімкнення резисторів, що забезпечило високу точність визначення інтегральної нелінійності характеристики перетворення у точках діапазону, які відповідають вихідним напругам подільника. Запропонована схема подільника та комутатора, які забезпечують формування 5 тестових точок, рівномірно розподілених по діапазону перетворення.*

*Проанализировано методы определения интегральной нелинейности характеристики преобразования аналого-цифровых преобразователей. Предложено и исследовано метод, который базируется на измерении падения напряжения на резисторах четырехрезистивного делителя напряжения при изменении порядка включения резисторов. Это обеспечило высокую точность определения интегральной нелинейности характеристики преобразования в точках диапазона, которые формируются делителем. Предложено схемы делителя и коммутатора, которые обеспечивают формирование 5 тестовых точек, равномерно распределенных по диапазону преобразования.*

*There is made analysis of methods of identification the integral nonlinearity of conversion characteristics of analog to digital converters. There is proposed and investigated the new method, which is based on measurement the output voltage of voltage divider with four resistors in the condition of changing the sequence of resistors. It provides high accuracy of identification the integral nonlinearity of conversion characteristics of analog to digital converters in the points generated by voltage divider. The proposed diagram of voltage divider and multiplexing circuit provides generation of five testing points uniformly distributed via range.*

**Вступ.** Сьогодні сигма-дельта аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) мають роздільну здатність 24...32 розряди [1, 2]. Однак такі АЦП не забезпечують високої точності перетворення вхідної

напруги на код безпосередньо. Висока точність досягається тільки за умови виконання процедур корекції адитивної та мультиплікативної похибок (установки нуля і калібрування за допомогою пре-