УДК 621.372.061

ЧУТЛИВІСТЬ НАПРУГ ПО ОБВОДУ КОНТУРУ ФАНТОМА ДО ЗМІН КОМПЛЕКСНИХ ОПОРІВ НЕОДНОРІДНОСТЕЙ В ЕЛЕКТРОІМПЕДАНСНІЙ ТОМОГРАФІЇ

Достал Т., д.т.н., проф.[1], Сушко І. О., аспірантка[2], Мацай А. О., магістрант[2], Гайдаєнко Є. В., аспірант[2], Рибін О. І., д.т.н. професор[2]
[1]Технічний університет Брно, м.Брно, Чехія
[2]Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

SENSITIVITY OF PHANTOM CONTOUR VOLTAGE TO COMPLEX IMPEDANCE CHANGES OF INHOMOGENEITIES IN ELECTRICAL IMPEDANCE TOMOGRAPHY

Dostal T., Doctor of Science (Technics), Professor [1], Sushko I., postgraduate student [2], Matsai A., undergraduate student [2], Gaidayenko E., postgraduate student [2], Rybin A., Doctor of Science (Technics), Professor [2]
[1]Brno University of Technology, Brno, Czech Republic
[2]National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

Вступ

Оцінка чутливості напруг по обводу контуру фантома при розв'язанні задач електроімпедансної томографії (EIT) має велике значення при формулюванні вимог до точності проектованих вимірювальних засобів [1–4]. При розв'язанні задачі оцінки потенційної чутливості напруг об'єкта досліджень до змін параметрів неоднорідностей усередині цього об'єкта на початкових етапах використовують різноманітні моделі – фантоми :у вигляді фізичних макетів з опорами та ємностями [5–9] або математичних моделей на базі еквівалентних електричних схем [10–13] та рівнянь Максвелла [14]. Наявність шумів та похибок вимірювань визначає потенційну досяжну точність у відхиленнях напруг по обводу контуру фантома при зміні параметрів усередині цього фантома. При використанні електричних еквівалентних схем для моделювання досліджуваного об'єкта звичайно використовують метод скінченних елементів [15], на базі якого і будується така еквівалентна схема. В роботах [10, 16] запропоновано для розв'язання прямої задачі імпедансної томографії (імітація процесу вимірювань на фантомі, представленому у вигляді еквівалентної електричної схеми) використовувати метод модифікацій [17]. Більшість оцінок потенційної чутливості в електроімпедансній томографії наведено для фантомів з дійсними опорами, що в значній мірі обмежує значимість таких оцінок. В

роботі розглядається саме потенційна чутливість при комплексних опорах неоднорідностей фантома.

Моделювання об'єкту досліджень

Розглянемо круглий фантом (який у подальшому будемо використовувати як еталон) з нормованою поверхневою провідністю $\sigma_0 = 1 + j$. Круглий фантом розбито на 776 квадратних скінченних елементів рис. 1,а, обернена матриця кожного i-го елемента має вигляд

$$\overline{\overline{Z}}_i = k \cdot \begin{bmatrix} 0,5732 & 0,3232 & 0,2500 \\ 0,3232 & 0,6464 & 0,3232 \\ 0,2500 & 0,3232 & 0,5732 \end{bmatrix} \quad (1)$$

де k — коефіцієнт, що враховує розміри та поверхневу провідність скінченного елемента.

Розв'язання прямої задачі методом модифікацій дає повну обернену матрицю електричної еквівалентної схеми (фантома) і в тому числі значення напруг по обводу контуру. Лінії модулів рівної напруги усередині фантома приведено на рис. 1,б. Фази усіх напруг дорівнюють $\pi / 4$ і тому не приводяться. Дійсні та уявні частини ліній рівної напруги мають такий самий вигляд, як і лінії рівної напруги для модулів. Після внесення неоднорідності у формі круга рис. 2,а та у формі квадрату рис. 3,а розподіл за модулем та за фазою та розподіли дійсної та уявної частини ліній рівної напруги змінюються усередині фантома, як показано на рис. 2,б — 2,є та рис.3,б — рис. 3,д відповідно.

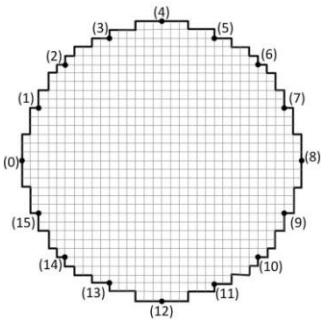

Рис. 1а. Фантом з 776 квадратних скінченних елементів.

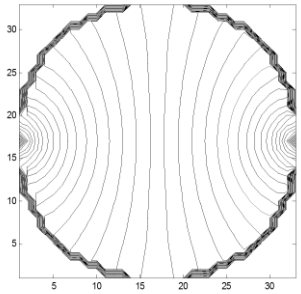

Рис. 1б. Лінії рівної напруги за модулем для рівномірного фантому з поверхневою провідністю $\sigma_0 = 1 + j$.

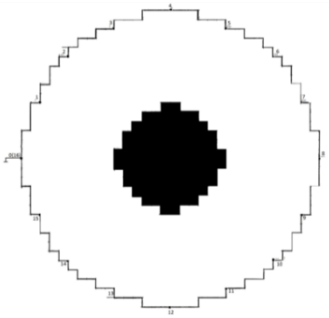

Рис. 2а. Фантом з круглою неоднорідністю

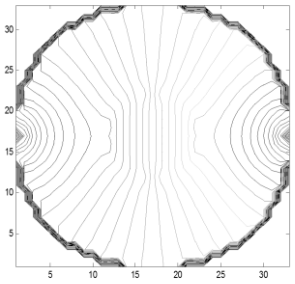

Рис.2б. Лінії рівної напруги за модулем для фантому рис.2а з поверхневою провідністю неоднорідності $\sigma_1 = 0,01 + j \cdot 0,01$.

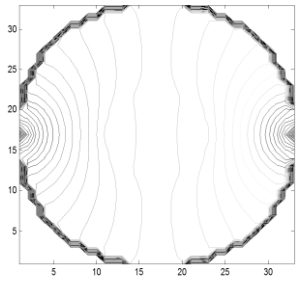

Рис.2в. Лінії рівної напруги за модулем для фантому рис.2а з поверхневою провідністю неоднорідності $\sigma_1 = 3 + j \cdot 6$.

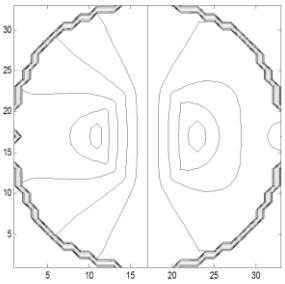

Рис. 2г. Лінії рівної напруги за фазою для фантому рис.2а з поверхневою провідністю неоднорідності $\sigma_1 = 3 + j \cdot 6$.

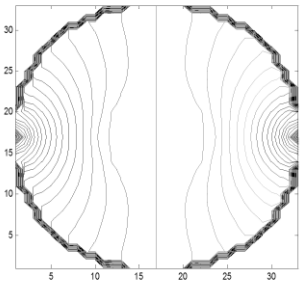

Рис. 2д. Розподіл реальної частини ліній рівної напруги для фантому рис.2а з поверхневою провідністю неоднорідності $\sigma_1 = 3 + j \cdot 6$.

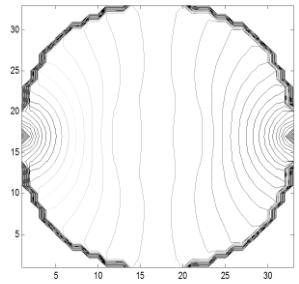

Рис. 2є. Розподіл уявної частини ліній рівної напруги для фантому рис.2а з поверхневою провідністю неоднорідності $\sigma_1 = 3 + j \cdot 6$.

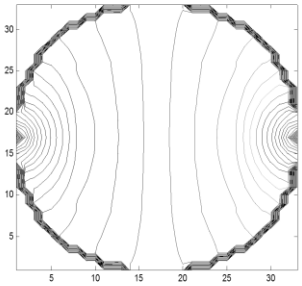

Рис. 3г. Розподіл уявної частини ліній рівної напруги для фантому рис. 3а з поверхневою провідністю неоднорідності $\sigma_1 = 0,5 + j \cdot 3$.

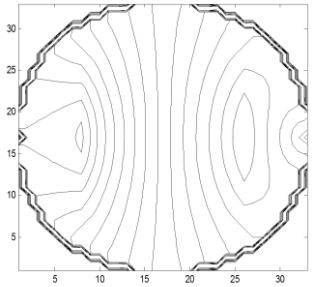

Рис. 3д. Лінії рівної напруги за фазою для фантому рис. 3а з поверхневою провідністю неоднорідності $\sigma_1 = 0,5 + j \cdot 3$.

Як видно з наведених рисунків, характер розподілення достатньо вірно відображає характер та форму неоднорідності. На жаль, розподілення ліній рівної напруги усередині фантома не відоме, тому вся інформація для реконструкції образу (розподілення поверхневих провідностей), зосереджена в виміряних напругах по обводу контуру фантома, а чутливість вимірюва-

них напруг до змін провідностей усередині фантома є значно гіршою, ніж у поширених в практиці томографічних пристроях.

Чутливість комплексних напруг до змін поверхневої провідності усередині фантома

Перед тим, як перейти до оцінки чутливості вимірюваних напруг до змін поверхневої провідності усередині фантома, розглянемо питання впливу анізотропії поля образу (рис.1,а) на отримуваний при математичному моделюванні результат. Лінії рівної напруги на рис.1 – 3 наведено для випадку підключення джерела струму (I = 1) до вузлів 0 та 8 рис.1,а. При цьому, вузлові напруги мають значення, які можна представити у вигляді $\bar{U}^T_{0,8} = [0,0000; 0,2728; 0,3250; 0,3594; 0,3891; 0,4189;$

$0,4532; 0,5054; 0,7783; 0,5054; 0,4532; 0,4189; 0,3891; 0,3594; 0,3250; 0,2728]$

При підключенні того ж джерела до вузлів 1 – 9 вузлова напруга має вигляд $\bar{U}^T_{1,9} = [0,2079; 0,0000; 0,2060; 0,2591; 0,2945; 0,3242; 0,3531; 0,3872;$ $0,4406; 0,6485; 0,4425; 0,3894; 0,3540; 0,3242; 0,2954; 0,2613]$.

Виходячи з міркувань центральної симетрії усіх позицій джерела струму (0 – 8, 1 – 9, 2 – 10,…,8 – 0) для обчислених напруг $\bar{U}^T_{0,8}$ та $\bar{U}^T_{1,9}$ їх значення повинні були б співпадати, враховуючи нумерацію, тобто $u_i^{(0,8)} = u_{i+1}^{(1,9)}$. До того ж, значення напруг $\bar{U}^T_{0,8}$ симетричні відносно напруги $u_8^{(0,8)}$, а для напруг $\bar{U}^T_{1,9}$ така симетрія виконується з певною похибкою. Це пояснюється, з одного боку певною анізотропією моделі рис.1,а (анізотропією самого квадратного скінченного елемента та анізотропією розташування цих елементів у фантомі), з другого боку – похибкою в визначенні геометричного положення вузлів 1 та 9 на цій моделі. Виходячи з відомих результатів [2,4], слід зазначити, що відхилення напруг від отриманих для рівномірного фантома (при наявності неоднорідностей) становить одиниці та долі відсотків, що вже «закладено» в моделі рівномірного фантома рис.1,а. При цьому вимірювання на фізичній моделі (при компенсації впливу шумів системи та похибок вимірювання) дасть результати, однакові для усіх підключень джерела струму.

Анізотропія квадратної моделі викликана, в першу чергу, використанням формул розрахунків вхідних опорів скінченних елементів, які вірні для нескінченно малих розмірів такого елемента. Тому спочатку проведемо уточнення моделі скінченного елемента (1).

Утворимо зі скінченного елемента наступний, що складається з чотирьох, потім 16, 32,…1024 скінченних елементів (1). Уточнена таким чином матриця після викреслення стовпців та рядків, номери яких дорівнюють номерам внутрішніх вузлів, має вигляд

$$\overline{\overline{Z}}_{i,1024} = k \cdot \begin{bmatrix} 0,4997 & 0,25875 & 0,2409 \\ 0,25875 & 0,5175 & 0,25875 \\ 0,2409 & 0,25875 & 0,4997 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

По редукованій матриці (2), яка відповідає моделі скінченного елемента, складеного з 1024 скінченних елементів з розмірами в 32 рази меншими відносно (1), побудуємо обернену матрицю для 1024 елементів. Для цього об'єднаємо 4,16,…1024 скінченних елементи з матрицею (2).

Отримаємо

$$\overline{\overline{Z}}_{i,1024.1024} = k \cdot \begin{bmatrix} 0,40766 & 0,21096 & 0,1967 \\ 0,21096 & 0,4219 & 0,21096 \\ 0,1967 & 0,2109 & 0,40766 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Різниця у співвідношеннях елементів матриць (2) та (3) спостерігається в шостій значущій цифрі, тобто результат (3) можна вважати «точним». У випадку, коли виміряні на натурному макеті величини було пронормовано до вхідного опору матриці (1), такий самий вхідний опір повинна мати матриця (3). Після її нормування (приведенням до того ж самого вхідного опору) отримаємо

$$\overline{\overline{Z}}_{i,1024.1024} = k \cdot \begin{bmatrix} 0,5732 & 0,2966 & 0,2766 \\ 0,2966 & 0,5933 & 0,2967 \\ 0,2766 & 0,2967 & 0,5732 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Ступінь уточнення значень елементів оберненої матриці скінченного елемента можна оцінити порівнянням (1) та (4).

Наступним методом боротьби з анізотропією моделі є збільшення кількості скінченних елементів, або, враховуючи те, що фантом має форму кругу, створення центрально-симетричної (відносно центру фантома) моделі, що складається з рівнобедрених трикутників. Але в цьому випадку буде мати місце анізотропія неоднорідностей, в залежності від їх розташування усередині фантома та форми. Іншим, більш простим способом, є урахування методу розв'язання зворотної задачі. Оскільки для напруг $\bar{U}^T_{0,8}$ маємо симетричні значення (відносно $u_0^{(0,8)}$ та $u_8^{(0,8)}$), то при обчисленнях таких напруг по фантому для різних підключень джерела струму (0–8, 1–9, …, 8–0) разом з джерелом будемо повертати і координатну сітку фантома рис.4,а. Так, на рис.4,а позначено розташування скінченних елементів для підключення джерела струму до вузлів 1–9. На рис.4,б зображено зонний фантом [18,19], який використовуємо при реалізації методу зон провідності для розв'язання оберненої задачі імпедансної томографії, при підключенні джерела струму між вузлами 1–9.

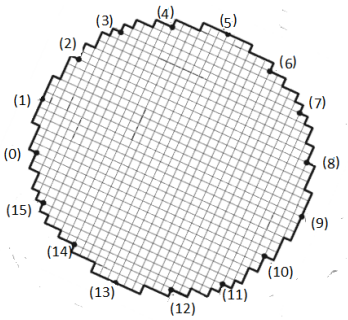

Рис. 4а. Розташування скінченних елементів для підключення джерела струму до вузлів 1 – 9

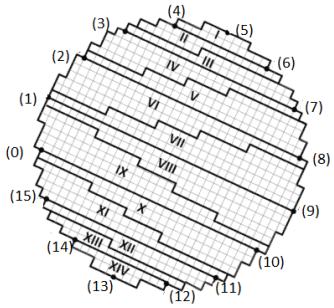

Рис. 4б. Зонний фантом для підключення джерела струму до вузлів 1 – 9.

При наявності неоднорідності рис.4,в підключення джерела струму до вузлів 1…9 відображено на рис.4,г, де також проведено перенумерацію вузлів $i = i+1$, а на рис.4,д – фантом при підключенні джерела струму до вузлів 8–0 (з перенумерацією вузлів аналогічно до рис.4,г).

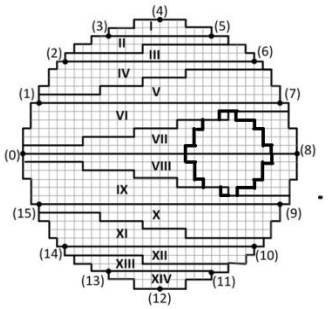

Рис. 4в. Зонний фантом з неоднорідністю. для підключення джерела струму до вузлів 0 – 8.

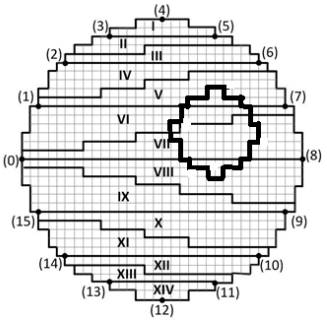

Рис. 4г. Зонний фантом з неоднорідністю. для підключення джерела струму до вузлів 1 – 9.

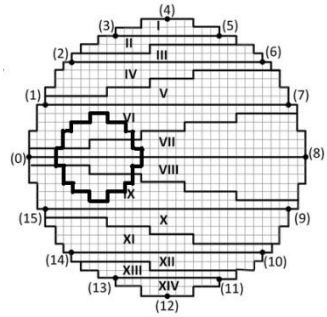

Рис. 4д. Зонний фантом з неоднорідністю. для підключення джерела струму до вузлів 8 – 0.

Певна анізотропія поля образу (рівномірного фантома), тим не менше, не впливає на відносні оцінки чутливості напруг по обводу контуру до змін поверхневих провідностей графоелементів реконструйованого зображення. Тому наведемо такі оцінки для різних видів комплексних неоднорідностей. Так, при наявності квадратної неоднорідності (18×18 скінченних елементів з провідністю $6+0{,}1j$ на фоні фантома діаметром 32 скінченних елементів з провідністю $1+j$) максимальне відносне відхилення модуля напруг буде для підключення джерела струму між вузлами 1 – 9 та 9 – 1 і становить у відсотках до значень рівномірного фантома (для положення 9 – 1) $\Delta\bar{U}^T_{9,1\%} = [30{,}5;\ 23{,}4;\ 30{,}5;\ 29{,}4;\ 26{,}9;\ 23{,}4;19{,}2;14{,}5;8{,}0;\ 0;8{,}0;14{,}5;$

$19{,}2;\ 23{,}4;\ 26{,}9;\ 29{,}4]$. Аналогічно, відносне відхилення фаз у відсотках

$\Delta\bar{\varphi}^T_{9,1\%} = [23{,}0;16{,}3;\ 23{,}0;\ 21{,}1;18{,}7;16{,}3;13{,}7;10{,}4;\ 5{,}7;0;\ 5{,}7;10{,}4;13{,}7;16{,}3;$

$18{,}7;\ 21{,}1]$.

Для тих самих напруг чутливість у відсотках дійсної частини $\mathrm{Re}\{\Delta\bar{U}^T_{9,1\%}\}=[19,2;14,3;19,2;18,7;17,0;14,3;11,0;7,7;3,9;0;3,9;7,7;11,0;14,3;17,0;18,7]$ та уявної $\mathrm{Im}\{\Delta\bar{U}^T_{9,1\%}\}=[44,1;33,8;44,1;42,0;38,4;33,8;28,4;21,7;12,2;0;12,2;21,7;28,4;33,8;38,4;42,0]$.

Для випадку, коли нерівномірність (в центрі фантома) має форму кругу (діаметром 12 скінченних елементів з поверхневою провідністю $0,7+5j$) на фоні фантома з провідністю $1+j$, відносні відхилення (у відсотках) модуля та фази напруг по обводу контуру відповідно становлять $\Delta\bar{U}^T_{0,8\%}=[0;0,8;2,4;4,4;6,5;8,1;9,1;9,1;6,5;9,1;9,2;8,2;6,5;4,5;2,5;0,8]$; $\Delta\bar{\varphi}^T_{0,8\%}=[0;0,4;-1,2;-2,2;-3,2;-4,1;-4,7;-4,7;-3,2;-4,6;-4,7;-4,1;-3,2;-2,2;-1,2;-0,4]$. Аналогічно, розраховані для дійсної та уявної частин відносні прирощення напруг мають подібний характер.

Як видно з наведених результатів, чутливість у випадку квадратної неоднорідності виявилася достатньо великою, враховуючи «контраст» між фоном та провідністю неоднорідності. Максимальна чутливість модулів напруг по обводу контуру («контраст» проекцій) у цьому випадку становить 30,5% (при «контрасті» по модулю усередині фантома 4,24) та відносній площі неоднорідності 40%. Для круглої неоднорідності («контраст» усередині фантома 3,57) максимальна чутливість модулів напруг становить 9,1% (0,091) при відносній площі неоднорідності 14%.

Цікавим є порівняння чутливості вимірюваних проекцій в імпедансній томографії з чутливістю проекцій в лінійній відносно сигналу носія інформації, наприклад, рентгенівської томографії. Нехай усередині фантома з фоном (коефіцієнтом розсіяння рентгенівського випромінювання), що дорівнює $\sqrt{2}$ знаходиться квадратна неоднорідність з коефіцієнтом розсіяння (для кожного з 18×18 скінченного елемента), що дорівнює 6. Тоді контраст проекції становив би 2,82, що в 1,5 разів менше, ніж усередині фантома. У випадку імпедансної томографії контраст становить 0,305, що менше контрасту усередині фантома у 14 разів. Аналогічно, для круглої неоднорідності зменшення контрасту при обчисленнях вздовж спільного діаметра становить відповідно для рентгенівської та імпедансної томографії 1,7 та 38 разів. Тим не менше, отримані результати для чутливості напруг до зміни імпедансу достатньо чітко розрізняються по амплітудам та фазам.

Розглянемо тепер випадок, коли фантом містить три неоднорідності рис. 5,а. На рис.5,б наведені лінії рівних напруг (модулів) при провідності неоднорідностей $0,05+0,05j$. Прирощення напруг на електродах фантома для різних пар вузлів підключення джерела струму у відсотках до їх значень при рівномірному фантомі є достатньо великими і становлять, напри-

клад, при підключенні джерела струму до вузлів 7 – 15 наступні величини $\Delta\bar{U}_{7,15\%} = [-60,99; -48,61; -44,78; -44,84; -40,43; -20,04; 0,82; 0;$
$-6,43; -13,85; -6,43; -13,85; -29,68; -51,63; -60,42; -62,27; -63,21; -48,54]$.
Аналогічно, лінії рівної напруги для того ж фону, але для провідностей неоднорідностей $11+11j$ наведено на рис.5,в, прирощення у відсотках модулів напруг відносно рівномірного фантома $\Delta\bar{U}_{0,8\%} = [34,24;\ 41,26; 42,53; 44,05; 47,47; 49,85; 46,15; 32,21; 47,35; 49,08;$
$46,14; 44,03; 43,42; 42,35; 34,90]$.

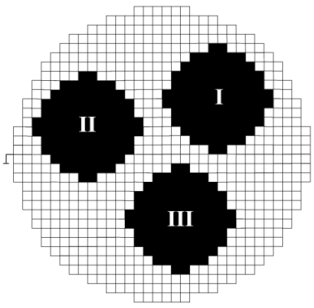

Рис. 5а. Фантом з трьома круглими неоднорідностями

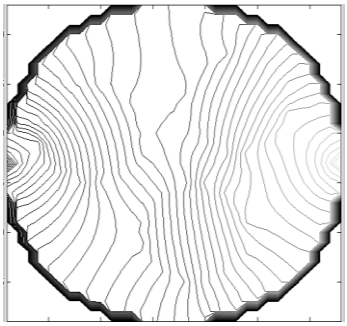

Рис. 5б. Лінії рівних напруг за модулем при поверхневій провідності неоднорідностей $\sigma_1 = 0,05 + j \cdot 0,05$

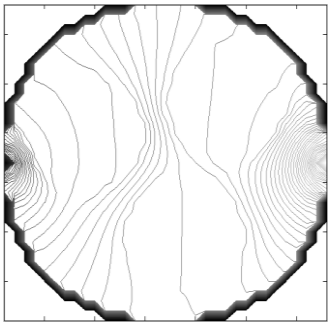

Рис. 5в. Лінії рівних напруг за модулем при поверхневій провідності неоднорідностей $\sigma_1 = 11 + j \cdot 11$

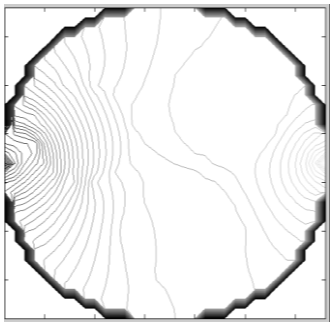

Рис. 5г. Лінії рівних напруг за модулем при поверхневій провідності неоднорідностей $\sigma_1 = 6 + j \cdot 12$ $\sigma_2 = 0,01 + j \cdot 0,05$ $\sigma_1 = 8 + j \cdot 0,05$

У випадку, коли всі три неоднорідності мають різну провідність, відповідно до номерів 1, 2, 3 на рис.5,а, $6+12j$; $0,01+0,05j$; $8+0,05j$, лінії рівної напруги мають вигляд рис.5,г. Приведемо деякі значення прирощення фази. Так, при підключенні джерела струму між вузлами 10–2 прирощення фази у відсотках $\Delta\bar{\varphi}_{10,2\%} = [5,08;\ 4,25;\ 3,32; 6,10;$
$8,11; 9,44; 10,22; 10,46; 9,62; 6,41; 0; 4,05; 8,00; 9,33; 9,37; 8,27]$.

Для фантома рис.5,г прирощення напруг також є значним. Тим не менше, чутливість пристроїв вимірювання напруг визначається, в першу чергу, можливістю реконструкції неоднорідностей усередині фантома, яка, в свою чергу, залежить від обраного методу реконструкції [2,4,19].

Висновки

1. Проведено аналіз впливу анізотропії моделі на відносні прирощення напруг по обводу контуру фантома при зміні параметрів неоднорідностей з комплексними поверхневими провідностям.

2. Для усунення власної анізотропії скінченного елемента отримано обернену матрицю, складену для об'єднання 1024×1024 вихідних скінченних елементів. Тобто при подальшому збільшенні кількості скінченних елементів значення елементів оберненої матриці відрізняються в 5 – 6 значущих цифрах.

3. Для зменшення впливу анізотропії фантома в цілому запропоновано виконувати для різних підключень незалежного джерела струму поворот на відповідний кут (разом з джерелом) сітки фантома.

4. Чутливість до змін опорів в електроімпедансній томографії є в десятки разів меншою, ніж для тієї ж самої моделі неоднорідності в рентгенівській томографії (пряма проекція).

5. При неоднорідностях всередині фантома, що складають 10% і 20% від площі фантому з поверхневими провідностями, що відрізняються за модулем від провідності фону до 10 разів, прирощення напруг становить до 30 – 40%.

Перелік посилань

1. Пеккер Я. С. Электроимпедансная томография / Я. С. Пеккер, К. С. Бразовский, В. Ю. Усов, М. П. Плотников, О. С. Уманский. — Томск: ООО «Издательство научно–технической литературы», 2004. — 190 с.

2. Сушко І. О. Потенційна чутливість імпедансної томографії / І. О. Сушко, Є. В. Гайдаєнко, О. А. Якубенко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. — 2012. — № 50. — С. 92—104.

3. Дорожовець М. Математичні засади прямої задачі томографії провідності / М. Дорожовець, А. Федорчук, І. Петровська // Вісник Державного університету «Львівська політехніка». Автоматика вимірювання та керування. — 1998. — №324. — С. 43—51.

4. Рибін О.І. Чутливість в імпедансній томографії / О.І. Рибін, Є.В. Гайдаєнко, І.О. Сушко, О.І. Гаманенко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. — 2013. — № 55. — С.106—114.

5. Schneider I. D. Design of an electrical impedance tomography phantom using active elements / I. D. Schneider , R. Kleffel, D. Jennings, A. J. Courtenay // Medical & Biological Engineering & Computing. — 2000. — № 38. — P. 390—394.

6. Kao T.–J. A Versatile High–Permittivity Phantom for EIT / T.–J. Kao, G. J. Saulnier, D. Isaacson, T. L. Szabo, J. C. Newell // IEEE Transactions on biomedical engineering. — 2008. — V. 55, № 33. — pp. 2601—2607.

7. Griffiths H. A Cole phantom for EIT / H. Griffiths // Physiological measurements Journal. — 1995. — №16. — p. 29—38.

8. Hahn G. Constructing resistive mesh phantoms by an equivalent 2D resistance distribution of a 3D cylindrical object / G. Hahn, A. Just, J. Dittmar, M. Quintel // The 12th International Conference in Electrical Impedance Tomography : 4—6 May 2011, University of Bath.

9. Griffiths H. A phantom for electrical impedance tomography / H. Griffiths // Clin. Phys. Physiol. Meas. — 1988. — Vol. 9A. — pp. 15—20.

10. Рибіна І. О. Метод променів провідностей та моделювання фантома в імпедансній томографії // Вісник ЖДТУ. — 2010. — № 53. — С.160—161.

11. Рибіна І. О. Моделювання кінцевого елемента в імпедансній томографії / І. О. Рибіна, Є. В. Гайдаєнко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. — 2010. — № 41. — С. 19—24.

12. Гусєва О. В. Спрощена модель досліджуваного об'єкта для завдань електроімпедансної томографії / О.В. Гусєва // Вісник ЖДТУ. — 2011. — №3. — С. 128—133.

13. Гусєва О. В. Оцінка чутливості вимірювань потенціалів при багатоканальній імпедансній томографії / О.В. Гусєва, В.І. Найденко, О.Б. Шарпан // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2006. — №1. — С. 12—18.

14. Дудикевич Т. В. Моделювання розподілу електричного потенціалу всередині біологічних об'єктів при резистивних томографічних вимірюваннях / Т. В. Дудикевич // Вимірювальна техніка та метрологія. — Львів. — 1995. — С. 60.

15. Сильвестр П. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров—электриков / П. Сильвестр, Р. Феррари. — М. : Мир , 1986. — 229с.

16. Сушко І. О. Алгоритм розв'язання прямої задачі імпедансної томографії методом модифікацій / І. О. Сушко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. — 2011. — № 47. — с. 165-175.

17. Рыбин А. И. Численно–символьный анализ электрических цепей обобщенным методом модификации / А.И. Рыбин // Праці Інституту Електродинаміки НАН України, ІЕД НАНУ. — 2002. — №1. — С. 28—30.

18. Sushko I. O. Features of solving the Electrical Impedance Tomography inverse problem by zones conductivities method / I. O. Sushko, A. I. Rybin // Visn. NTUU KPI, Ser. Radioteh. radioaparatobuduv. — 2012. — № 51. — С. 106—114.

19. Сушко И. А. Визуализация распределения поверхностных проводимостей томографического сечения методом зон проводимости / И.А. Сушко // Известия вузов. Радиоэлектроника. — 2013. — Т. 56, № 7. — С. 60—68.

References

1. Pekker Ya. S., Brazovskiy K.S., Usov V.Yu., Plotnikov M.P. and Umanskiy O.S. (2004) *Elektroimpedansnaya tomografiya*, Tomsk, OOO "Izdatelstvo nauchno–tekhnicheskoi literatury", 190 p.

2. Sushko, I. O., Gaydayenko, E. V., Yakubenko, A. A. (2012) Electrical Impedance Tomography potential sensitivity. *Visn. NTUU KPI, Ser. Radioteh. radioaparatobuduv*. no. 50, pp. 92-104. (in Ukrainian)

3. Dorozhovets M., Fedorchuk A., Petrovska I. (1998) Matematychni zasadi priamoi zadachi tomografii providnosti. *Visnyk Derzhavnogo universytetu "Lvivska politekhnika". Avtomatika vymiruvannia ta keruvannya*, No 324, pp. 43-51.

4. Rybin, A. I., Gaydayenko, E. V., Sushko, I. O., Gamanenko, A. I. (2013) The sensitivity in Electrical Impedance Tomography. *Visn. NTUU KPI, Ser. Radioteh. radioaparatobuduv*. no. 55, pp. 107-117. (in Ukrainian)

5. Schneider I. D., Kleffel R., Jennings D. and Courtenay A. J. (2000) Design of an electrical impedance tomography phantom using active elements. *Medical & Biological Engineering & Computing*. No 38. pp. 390 – 394.

6. Kao T.–J., Saulnier G. J., Isaacson D., Szabo T. L. and Newell J. C. (2008) A Versatile High–Permittivity Phantom for EIT. *IEEE Transactions on biomedical engineering*. Vol. 55, No 33, pp. 2601–2607.

7. Griffiths H. A (1995) Cole phantom for EIT. *Physiological measurements Journal*. No 16, pp. 29–38.

8. Hahn G., Just A., Dittmar J. and Quintel M. (2011) Constructing resistive mesh phantoms by an equivalent 2D resistance distribution of a 3D cylindrical object. *The 12th International Conference in Electrical Impedance Tomography*.

9. Griffiths H. (1988) A phantom for electrical impedance tomography. *Clin. Phys. Physiol. Meas.* Vol. 9, pp. 15–20.

10. Rybina I. A. (2010) Metod promeniv providnosti ta modeliuvannia fantoma v impedansnii tomografii [Method conductivity beams and simulation phantom in impedance tomography]. *Visnyk ZhDTU*. No. 8, pp. 21–28.

11. Rybina I. O. and Gaydayenko E. V. (2010) Finite element modeling in impedance tomography. *Visn. NTUU KPI, Ser. Radioteh. radioaparatobuduv.* no. 41, pp. 19-24. (in Ukrainian)

12. Guseva O.V. (2011) Sproshchena model doslidzhuvanogo obyekta dlia zavdan elektroimpedansnoi tomografii [A simplified model of the object for tasks electrical impedance tomography]. *Visnyk ZhDTU*. No 3, pp.128 –133.

13. Guseva O.V., Naidenko V.I. and Sharpan O.B. (2006) Otsinka chutlivosti vymiruvan potentsialiv pry bagatokanalnii impedansnii tomografii. *Naukovi visti NTUU "KPI"*. No 1. pp. 12–18.

14. Dudykevich T.V. (1995) Modeluvannia rozpodilu elektrychnogo potentsialu vseredyni biologichnih obiektiv pri rezystyvnyh tomografichnyh vymiruvanniah [Simulation of the electric potential distribution inside biological objects with resistive tomography measurements]. *Vymiruvalna tekhnika ta metrologiia*, p. 60.

15. Silvestr P. and Ferrari R. (1986) Metod konechnyh elementov dlia radioinzhenerov I inzhenerov–elektrikov [The Finite Element Method for radio and electrical engineers], Moskow, Mir Publ., 229 pp.

16. Sushko, I. O. (2011) Algorithm for solving the Electrical Impedance Tomography forward problem by the modification method. *Visn. NTUU KPI, Ser. Radioteh. radioaparatobuduv.* no. 47, pp. 165-175. (in Ukrainian)

17. Rybin A.I. (2002) Chislenno–simvolnyi analiz elektricheskih tsepei obobshennym metodom modifikatsii. *Pratsi Institutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy, IED NANU*. No 1. pp. 28–30.

18. Rybin, A. I., Sushko, I. O. (2012) Features of solving the Electrical Impedance Tomography inverse problem by zones conductivities method. *Visn. NTUU KPI, Ser. Radioteh. radioaparatobuduv.* no. 51, pp. 106-114.

Sushko I. (2013) Visualization of surface conductivity distributions of tomography cross-section using conductivity zones method. *Radioelectronics and Communications Systems*. Vol. 56, No7. pp. 60–68.

Достал Т., Сушко І.О., Мацай А.О., Гайдаєнко Є.В., Рибін О.І. ***Чутливість напруг по обводу контуру фантома до змін комплексних опорів неоднорідностей в електроімпедансній томографії.*** *Проведено аналіз впливу значень поверхневої провідності неоднорідностей на зміну значень комплексних напруг по обводу контуру фантома, порівняно з однорідним фантомом з комплексною поверхневою провідністю. Проведено аналіз впливу анізотропії скінченного елемента та всього фантома в цілому на обчислювані комплексні напруги. Отримано модель скінченного квадратного елемента, який складається з 1024x1024 скінченних елементів, отриманих по спрощеним наближеним формулам. Констатовано, що незалежно від різниці абсолютних значень напруг, виміряних при різних положеннях джерела струму, їх відносні прирощення залишаються незмінними. Для боротьби з такого роду анізотропією запропоновано разом з джерелом обертати сітки фантомів, як скінченних елементів, так і зон провідності. Остаточні висновки про межі чутливості вимірювальних пристроїв можна буде зробити лише після накопичення статистичних даних розв'язання зворотної задачі, обраним авторами методом зон провідності.*

Ключові слова: *електроімпедансна томографія, фантом, скінченний елемент, зони провідності, пряма задача, зворотна задача, чутливість, анізотропія, комплексні опори.*

Достал Т., Сушко И.А., Мацай А.А., Гайдаенко Е.В., Рыбин А.И. ***Чувствительность напряжений по обводу контура фантома к изменениям комплексных сопротивлений неоднородностей в электроимпедансной томографии.*** *Проведен анализ влияния значений поверхностной проводимости неоднородностей на изменение значений комплексных напряжений по обводу контура фантома в сравнении с однородным фантомом с комплексной поверхностной проводимостью. Выполнен анализ влияния анизотропии конечного элемента и всего фантома в целом на вычисляемые комплексные напряжения. Получена модель конечного квадратного элемента, составленного из 1024x1024 конечных элементов, полученных по упрощенным формулам. Отмечено, что независимо от разницы абсолютных значений напряжений, вычисленных при различных положениях источника тока, их относительные приращения остаются неизменными. Для борьбы с такого рода анизотропией предложено вместе с источником поворачивать сетки фантомов, как конечных элементов, так и зон проводимости. Окончательные выводы о границах чувствительности измерительных устройств можно будет сделать после накопления статистических данных решения обратной задачи, выбранным авторами метода зон проводимости.*

Ключевые слова: *электроимпедансная томография, фантом, конечный элемент, зоны проводимости, прямая задача, обратная задача, чувствительность, анизотропия, комплексные сопротивления.*

Dostal T., Sushko I., Matsai A., Gaidayenko E., Rybin A. ***Sensitivity of phantom contour voltage to complex impedance changes of inhomogeneities in Electrical Impedance Tomography.***

Introduction. The analysis of surface conductivity influence of inhomogeneities to the changes of complex phantom contour voltages comparing with a homogeneous phantom with complex surface conductivity is carried out. The analysis of the influence of finite element and all phantom generally anisotropy on the calculated complex voltages is conducted.

The results. The model of square finite element is obtained. It consists of 1024x1024 finite elements obtained by simplified approximate formulas. The relative increments of voltage values are unchanged regardless of the difference in the absolute values of voltages measured

at different positions of the current source. It is proposed to rotate the phantom grids of finite elements and conductivity zones with the current source rotation to overcome this anisotropy.

Conclusions. Final conclusions about the limits of the measuring device sensitivity could be done only after the data accumulation of solving the inverse problem by zones conductivity method.

***Keywords**: Electrical Impedance Tomography, phantom, finite element, conductivity zones, forward problem, inverse problem, sensitivity, anisotropy, complex voltages.*