

УДК 621.317

М. М. Дорожовець, А. Ковальчик*

Національний університет “Львівська політехніка”,
 кафедра інформаційно-вимірювальної техніки,
 *Ряшівська політехніка, Польща
 кафедра метрології та вимірювальних систем

ХАРАКТЕРИСТИЧНА МАТРИЦЯ ТРИКУТНОГО СКІНЧЕНОГО ЕЛЕМЕНТА ПРИ ЛІНІЙНІЙ АПРОКСИМАЦІЇ ПРОВІДНОСТІ ТА ПАРАБОЛІЧНІЙ АПРОКСИМАЦІЇ ПОТЕНЦІАЛУ

© Дорожовець М. М., Ковальчик А., 2001

Розраховані коефіцієнти характеристичної матриці трикутного скінченного елемента при лінійній апроксимації провідності та параболічній апроксимації потенціалу. Наведено заступну електричну схему з дискретних елементів, яка відповідає отриманій характеристичній матриці.

The coefficients of the characteristic matrix of a triangle finite element under condition of a linear approximation of the conductivity and parabolic approximation of the potential are calculated. Based on the discrete elements the equivalent electrical scheme is presented.

1. Вступ. В електроімпедансній томографії [1-6] польова задача, яка для провідного середовища описується законом Ома в диференціальній формі [7]

$$\mathbf{J}(x, y) = \gamma(x, y) \cdot \mathbf{E}(x, y) = -\gamma(x, y) \mathbf{grad} \varphi(x, y), \quad (1)$$

в загальному випадку не має прямого розв'язання, тому для її розв'язування здійснюють апроксимацію як провідності $\gamma(x, y)$, так і потенціалу $\varphi(x, y)$ (тут $\mathbf{J}(x, y)$ – вектор густини струму на границі досліджуваного середовища; $\mathbf{E}(x, y)$ – вектор напруженості електричного поля).

Очевидно, що для зменшення похибки апроксимації необхідно збільшувати кількість ділянок апроксимації або збільшувати порядок апроксимуючих функцій. В літературі з методу скінченних елементів [8,9] наводиться методика і розраховані параметри апроксимації просторового розподілу потенціалу лінійними, параболічними, кубічними тощо апроксимаційними функціями на трикутних та іншої форми елементах. При цьому зазвичай прийнято, що електрична провідність на елементі є сталою.

2. Методична похибка апроксимації польової задачі. З точки зору томографії шуканою величиною є не розподіл потенціалу, а просторовий розподіл провідності, який загалом не є сталим. Тому в похибці апроксимації польової задачі, крім похибки апроксимації потенціалу, слід також враховувати і похибку апроксимації розподілу провідності. Тобто при апроксимації обох величин в (1) методична похибка апроксимації

$$\delta_a = \delta_{a\gamma} + \delta_{aE} = \delta_{a\gamma} + \delta_{a\varphi}, \quad (2)$$

де $\delta_{a\gamma}$ – похибка апроксимації провідності; δ_{aE} – похибка апроксимації напруженості електричного поля; $\delta_{a\varphi}$ – похибка апроксимації похідної розподілу потенціалу.

В останньому враховано, що напруженість електричного поля є похідною потенціалу, тому у вираз входить не сама похибка апроксимації розподілу потенціалу, але його похідної. Тобто в загальному випадку для p -го порядку апроксимаційної функції потенціалу залежність похибки апроксимації її похідної залежить від довжини h апроксимаційної ділянки не як звичайно, пропорційно до h^{p+1} , а на порядок менше – h^p . Зокрема, при лінійній апроксимації потенціалу похибка пропорційна до довжини ділянки h , а не до її квадрата h^2 і т. д. [8]

$$\Delta_{a\varphi(p)} = \frac{c_{\varphi(p)} \left| \varphi^{(p+1)} \right|_{\max} h^p}{\text{trig}(\phi)}, \quad (3)$$

де $\left| \varphi^{(p+1)} \right|_{\max}$ – максимальне значення модуля відповідної похідної потенціалу; $c_{\varphi(p)}$ – коефіцієнт, що залежить від порядку апроксимації; $\text{trig}(\phi)$ – певна тригонометрична функція найменшого кута трикутного елемента, яка також залежить від порядку апроксимації.

Похибка апроксимації провідності функціями p -го порядку є пропорційною до h^{p+1}

$$\Delta_{a\gamma(p)} = \frac{c_{\gamma(p)} \left| \gamma^{(p+1)} \right|_{\max} h^{p+1}}{\text{trig}(\phi)}, \quad (4)$$

де позначення аналогічні, як у виразі похибки апроксимації потенціалу.

Як випливає з (3) та (4), для отримання похибки апроксимації (2) в допустимих межах за умови приблизно однакового впливу обох складових апроксимація потенціалу мусить бути на порядок вищою. Тобто широко застосована апроксимаційна модель зі сталою апроксимацією провідності і параболічною апроксимацією потенціалу є цілком коректною.

Що ж стосується збільшення порядку апроксимації потенціалу при незмінній сталій апроксимації провідності, то вона правомірна за невеликої нерівномірності розподілу провідності. Якщо ж вона є істотною, а томографію застосовують власне для кількісного оцінювання неоднорідності провідності, то внаслідок великої похибки її апроксимації зменшення похибки апроксимації потенціалу з точки зору зменшення сумарної похибки апроксимації (2) може не дати бажаного результату. Тому для підвищення ефективності апроксимації зі збільшенням порядку апроксимації потенціалу необхідно одночасно збільшувати порядок апроксимації провідності.

3. Математична модель сумісних лінійної апроксимації провідності та параболічної апроксимації потенціалу. Першим питанням такої апроксимації є розрахунок коефіцієнтів характеристичної матриці елемента, що використовуються при побудові системи лінійних рівнянь, які описують досліджуване середовище при збудженні його зовнішніми стимулами. Для вирішення цього питання застосуємо відому методику [8,9].

У провідному середовищі виділимо один трикутний елемент KLM товщиною d з серединами його сторін N , O , P (рис.1). На цьому трикутнику задамо параболічну апроксимацію потенціалу у формі полінома Лагранжа за умови, що у перелічених вище пунктах вузлові потенціали становлять φ_k , φ_b , φ_m , φ_n , φ_o , φ_p , відповідно

$$\begin{aligned} \varphi_{klm}(x, y) = & \varphi_k U_k(x, y) + \varphi_l U_l(x, y) + \varphi_m U_m(x, y) + \\ & + \varphi_n U_n(x, y) + \varphi_o U_o(x, y) + \varphi_p U_p(x, y), \end{aligned} \quad (5)$$

де $U_i(x,y)$ – параболічна функція, що в i -му вузлі набуває значення 1, а у решті вузлів – нульові значення.

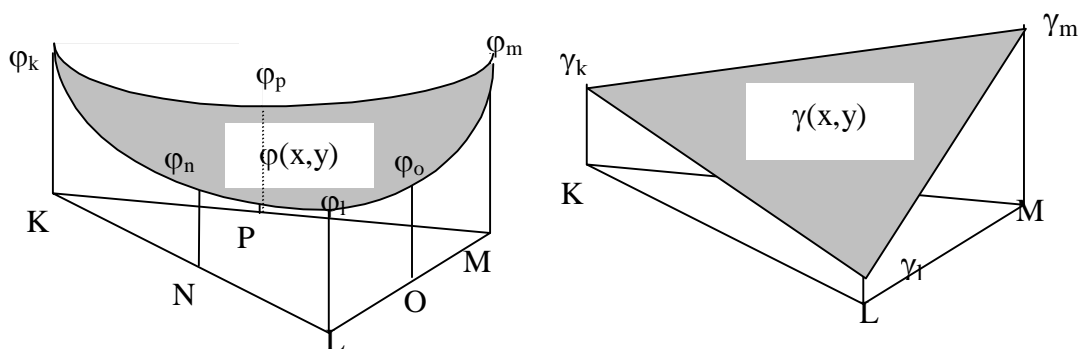


Рис.1. Трикутний елемент з 6-ма вузлами

Крім того, подібним чином на тому самому трикутнику задамо лінійну Лагранжову апроксимацію провідності при вузлових значеннях $\gamma_k, \gamma_l, \gamma_m$

$$\gamma_{klm}(x,y) = \gamma_k L_k(x,y) + \gamma_l L_l(x,y) + \gamma_m L_m(x,y), \quad (6)$$

де $L_i(x,y)$ – лінійна апроксимаційна функція, яка дорівнює 1 в i -му вузлі і 0 у решті вузлів.

За відомих координат вершин трикутного елемента і його вузлових провідностей $\gamma_k, \gamma_l, \gamma_m$ пряма задача електричної томографії полягає у знаходженні розподілу потенціалу на елементі, а точніше, при застосуванні апроксимації (5) – в знаходженні відповідних вузлових потенціалів $\varphi_k, \varphi_l, \varphi_m, \varphi_n, \varphi_o, \varphi_p$.

Характеристичну матрицю трикутного елемента з апроксимаціями (5) і (6) знаходять з умови мінімуму енергії, що виділяється в ньому. Відомо [7], що в одиницю часу dt в одиниці об'єму dQ середовища з провідністю $\gamma(x,y)$ виділяється енергія

$$\frac{dE}{dt \cdot dQ} = \gamma(x,y) \cdot E^2(x,y) = \gamma(x,y) \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (7)$$

Для стаціонарної задачі від енергії у (7) можемо перейти до потужності, тоді, враховуючи (5), повна потужність, що виділяється в об'ємі елемента

$$\begin{aligned} P &= \iint_Q \gamma(x,y) \left[\left(\sum_k \varphi_k U'_{k_x}(x,y) \right)^2 + \left(\sum_k \varphi_k U'_{k_y}(x,y) \right)^2 \right] dQ = \\ &= d \iint_{\Omega} \gamma(x,y) \left[\left(\sum_k \varphi_k U'_{k_x}(x,y) \right)^2 + \left(\sum_k \varphi_k U'_{k_y}(x,y) \right)^2 \right] d\Omega \end{aligned} \quad (8)$$

де Ω – область інтегрування в межах площі трикутного елемента.

Значення вузлових потенціалів знайдемо з умови мінімуму потужності (8), з якого після перегрупування підінтегрального виразу отримаємо ліву частину системи рівнянь для всіх $1 \leq j \leq n$.

$$\frac{dP}{d\varphi_j} = 2d \sum_k \varphi_k \iint_{\Omega} \gamma(x, y) \left[U'_{j_x}(x, y) U'_{k_x}(x, y) + U'_{j_y}(x, y) U'_{k_y}(x, y) \right] d\Omega = \sum_k \varphi_k \chi_{kj} = 0$$

$$\text{де } \chi_{kj} = 2d \iint_{\Omega} \gamma(x, y) \left[U'_{j_x}(x, y) U'_{k_x}(x, y) + U'_{j_y}(x, y) U'_{k_y}(x, y) \right] d\Omega - \quad (9)$$

коефіцієнти характеристичної матриці, що залежать лише від апроксимаційних функцій потенціалу і провідності, форми трикутника і їх можна обчислити заздалегідь.

Для спрощення обчислення цих коефіцієнтів перетворенням координат [8,9]

$$x = x_k + (x_m - x_k)\xi + (x_l - x_k)\eta; \quad y = y_k + (y_m - y_k)\xi + (y_l - y_k)\eta, \quad (10)$$

трикутник з вершинами $x_k, y_k; x_l, y_l; x_m, y_m$ в системі координат (ξ, η) зводять в канонічний трикутник з вершинами $(0, 0); (0, 1)$ та $(1, 0)$. Тоді в новій системі координат базові параболічні апроксимаційні функції потенціалу та їх похідних набувають виглядів [9], які подано у табл. 1.

Таблиця 1

Базові параболічні апроксимаційні функції та їх похідні

Вузол	$U_i(\xi, \eta)$	$\partial U_i / \partial \xi$	$\partial U_i / \partial \eta$
k	$U_k(x, y) = 1 - 3\xi - 3\eta + 2\xi^2 + 2\eta^2 + 4\xi\eta$	$-3 + 4\xi + 4\eta$	$-3 + 4\xi + 4\eta$
l	$U_l(x, y) = -\xi + 2\xi^2$	$-1 + 4\xi$	0
m	$U_m(x, y) = -\eta + 2\eta^2$	0	$-1 + 4\eta$
n	$U_n(x, y) = 4\eta - 4\eta^2 - 4\xi\eta$	-4η	$4 - 8\eta - 4\xi$
o	$U_o(x, y) = 4\xi\eta$	4η	4ξ
p	$U_p(x, y) = 4\xi - 4\xi^2 - 4\xi\eta$	$4 - 8\xi - 4\eta$	-4ξ

У цій системі координат лінійна апроксимація провідності має вигляд

$$\gamma(\xi, \eta) = \gamma_k + (\gamma_m - \gamma_k)\xi + (\gamma_l - \gamma_k)\eta. \quad (11)$$

Тоді після досить громіздких перетворень вираз (9) для коефіцієнтів характеристичної матриці набуває вигляду

$$\chi_{kj} = 2d \int_0^1 \int_0^{1-\xi} \left(\gamma_k + (\gamma_m - \gamma_k)\xi + (\gamma_l - \gamma_k)\eta \right) \cdot \left[\left(\text{ctg}(k) + \text{ctg}(l) \right) \frac{dU_k}{d\xi} \frac{dU_j}{d\xi} - \text{ctg}(k) \left(\frac{dU_k}{d\xi} \frac{dU_j}{d\eta} + \frac{dU_k}{d\eta} \frac{dU_j}{d\xi} \right) + \left(\text{ctg}(k) + \text{ctg}(m) \right) \frac{dU_k}{d\eta} \frac{dU_j}{d\eta} \right] d\eta d\xi \quad (12)$$

де k, l, m – відповідні кути трикутника.

Підставляючи значення похідних апроксимаційних функцій з табл. 1 у (12) і виконуючи інтегрування для всіх комбінацій індексів $1 \leq k \leq 6, k \leq j \leq 6$, отримаємо симетричну характеристичну матрицю, яка наведена в табл. 2. Як і слід було очікувати, коефіцієнти цієї матриці залежать тільки від кутів трикутника та шуканих вузлових значень провідності і не залежать від розмірів трикутника.

Якщо середовище апроксимоване рівносторонніми трикутниками ($\text{tg}(\pi/3) = 1/\sqrt{3}$), то елементи характеристичної матриці набувають значень, що наведені в табл. 3. В табл. 4

подані коефіцієнти характеристичної матриці для апроксимації на рівносторонніх трикутниках при сталих значеннях провідності.

4. Заступна схема трикутного елемента з дискретних елементів при параболічній апроксимації потенціалу та лінійній апроксимації провідності. Відповідно до отриманої характеристичної матриці легко можна збудувати заступну схему з дискретних елементів (рис.2).

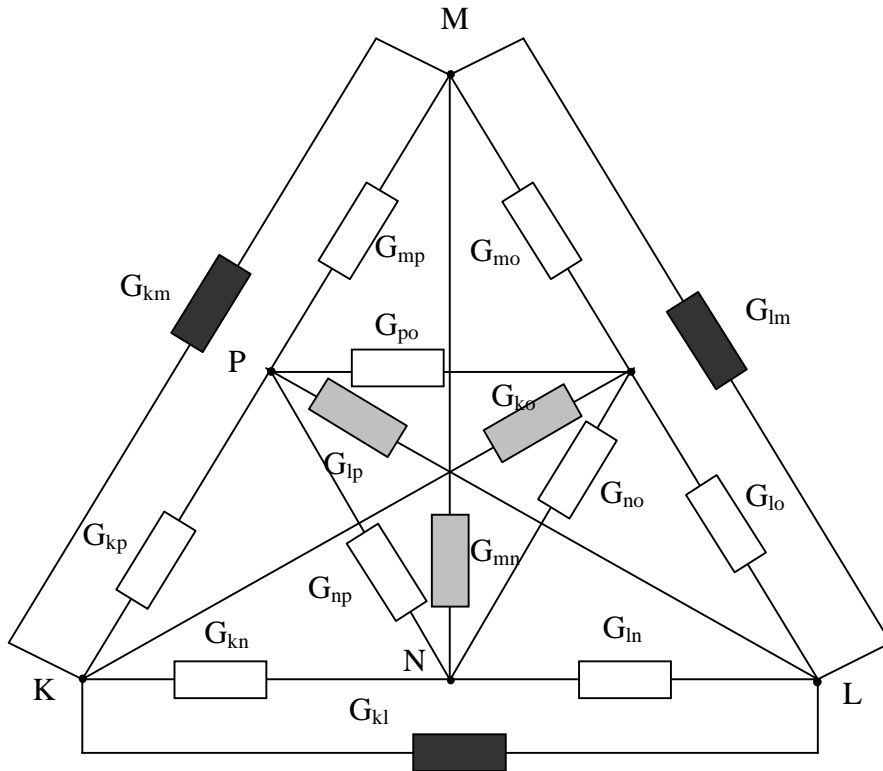


Рис.2. Заступна схема трикутного елемента з параболічною апроксимацією потенціалу та лінійною апроксимацією провідності

Відомо [7], що в системі рівнянь методу вузлових напруг недиагональні коефіцієнти, взяті з протилежним знаком, слід трактувати як міжвузлові провідності. Як видно з табл. 2, при параболічній апроксимації потенціалу та лінійній апроксимації провідності деякі недиагональні коефіцієнти є додатними, тому в заступній схемі з дискретних елементів додатним коефіцієнтам відповідають від'ємні міжвузлові провідності.

Провідності між вершинами трикутника з гострими кутами завжди є від'ємними (на рис.2 вони показані темним кольором). Провідності між вершинами та серединами протилежних сторін можуть бути як від'ємними, так і додатними, залежно від співвідношень вузлових провідностей (показані сірим кольором). Зокрема, при однакових вузлових провідностях вони дорівнюють нулю. Загалом завдяки наявності елементів між вершинами трикутника та серединами його протилежних сторін заступна схема на рис.2 не є плоскою. Ці елементи відображають нерівномірність провідності на трикутнику.

Таблиця 2

Характеристична матриця трикутного елемента з параболічною апроксимацією потенціалу та лінійною апроксимацією провідності.
Значення коефіцієнтів доможити на $d/30$

	k	p	m	o	l	n
k	$\gamma_k 9(ctgl + ctgm)$ $\gamma_l 3(ctgl + ctgm)$ $\gamma_m 3(ctgl + ctgm)$	$-\gamma_k(11ctgl - 3ctgm)$ $-\gamma_l(4ctgl + ctgm)$ $-\gamma_m(5ctgl + 2ctgm)$	$\gamma_k 2ctgl$ $\gamma_l ctgl$ $\gamma_m 2ctgl$	$-\gamma_k 3(ctgl + ctgm)$ $\gamma_l(2ctgl + ctgm)$ $\gamma_m(ctgl + 2ctgm)$	$\gamma_k 2ctgm$ $\gamma_l 2ctgm$ $\gamma_m ctgm$	$-\gamma_k(11ctgm - 3ctgl)$ $-\gamma_l(5ctgm + 2ctgl)$ $-\gamma_m(4ctgm + ctgl)$
p		$\gamma_k 8(3ctgk + 2ctgl + ctgm)$ $\gamma_l 8(ctgk + ctgl + ctgm)$ $\gamma_m 8(ctgk + 2ctgl + 3ctgm)$	$-\gamma_k(5ctgl + 2ctgk)$ $-\gamma_l(4ctgl + ctgk)$ $-\gamma_m(11ctgl - 3ctgk)$	$-\gamma_k 4(-ctgl + 2ctgm)$ $-\gamma_l 4(-ctgk + 2ctgm)$ $-\gamma_m 4(ctgk + ctgl + 6ctgm)$	$\gamma_k(2ctgk + ctgm)$ $-\gamma_l 3(ctgk + ctgm)$ $\gamma_m(ctgk + 2ctgm)$	$-\gamma_k 4(6ctgk + ctgl + ctgm)$ $-\gamma_l 4(2ctgk - ctgm)$ $-\gamma_m 4(2ctgk - ctgl)$
m			$\gamma_k 3(ctgl + ctgk)$ $\gamma_l 3(ctgl + ctgk)$ $\gamma_m 9(ctgl + ctgk)$	$-\gamma_k(4ctgk + ctgl)$ $-\gamma_l(5ctgk + 2ctgl)$ $-\gamma_m(11ctgk - 3ctgl)$	$\gamma_k ctgk$ $\gamma_l 2ctgk$ $\gamma_m 2ctgk$	$\gamma_k(2ctgk + ctgl)$ $\gamma_l(ctgk + 2ctgl)$ $-\gamma_m 3(ctgk + ctgl)$
o			$\gamma_k 8(ctgk + ctgl + ctgm)$ $\gamma_l 8(2ctgk + 3ctgl + ctgm)$ $\gamma_m 8(2ctgk + ctgl + 3ctgm)$	$\gamma_k 8(ctgk + ctgl + ctgm)$ $\gamma_l 8(2ctgk + 3ctgl + ctgm)$ $\gamma_m 8(2ctgk + ctgl + 3ctgm)$	$-\gamma_k(4ctgk + ctgm)$ $-\gamma_l(11ctgk - 3ctgm)$ $-\gamma_m(5ctgk + 2ctgm)$	$-\gamma_k 4(2ctgl - ctgm)$ $-\gamma_l 4(ctgl + 6ctgl + ctgm)$ $-\gamma_m 4(-ctgk + 2ctgl)$
l					$\gamma_k 3(ctgm + ctgk)$ $\gamma_l 9(ctgm + ctgk)$ $\gamma_m 3(ctgm + ctgk)$	$-\gamma_k(5ctgm + 2ctgk)$ $-\gamma_l(11ctgm - 3ctgk)$ $-\gamma_m(4ctgm + ctgk)$
n						$\gamma_k 8(3ctgk + ctgl + 2ctgm)$ $\gamma_l 8(ctgk + 3ctgl + 2ctgm)$ $\gamma_m 8(ctgk + ctgl + ctgm)$

Таблиця 3

Характеристична матриця рівностороннього трикутного елемента з параболічною апроксимацією потенціалу та лінійною апроксимацією провідності.

Значення коефіцієнтів домножити на $d/30 \sqrt{3}$

	k	p	m	o	l	n
k	$\gamma_k 18 + \gamma_l 6 + \gamma_m 6$	$-\gamma_k 8 - \gamma_l 5 - \gamma_m 7$	$\gamma_k 2 + \gamma_l + \gamma_m 2$	$-\gamma_k 6 + \gamma_l 3 + \gamma_m 3$	$\gamma_k 2 + \gamma_l 2 + \gamma_m$	$-\gamma_k 8 - \gamma_l 7 - \gamma_m 5$
p		$\gamma_k 48 + \gamma_l 24 + \gamma_m 48$	$-\gamma_k 7 - \gamma_l 5 - \gamma_m 8$	$-\gamma_k 4 - \gamma_l 4 - \gamma_m 32$	$\gamma_k 3 - \gamma_l 6 + \gamma_m 3$	$-\gamma_k 32 - \gamma_l 4 - \gamma_m 4$
m			$\gamma_k 6 + \gamma_l 6 + \gamma_m 18$	$-\gamma_k 5 - \gamma_l 7 - \gamma_m 8$	$\gamma_k + \gamma_l 2 + \gamma_m 2$	$\gamma_k 3 + \gamma_l 3 - \gamma_m 6$
o				$\gamma_k 24 + \gamma_l 48 + \gamma_m 48$	$-\gamma_k 5 - \gamma_l 8 - \gamma_m 7$	$-\gamma_k 4 - \gamma_l 32 - \gamma_m 4$
l					$\gamma_k 6 + \gamma_l 18 + \gamma_m 6$	$-\gamma_k 7 - \gamma_l 8 - \gamma_m 5$
n						$\gamma_k 48 + \gamma_l 48 + \gamma_m 24$

Таблиця 4

Характеристична матриця рівностороннього трикутного елемента з параболічною апроксимацією потенціалу та сталою апроксимацією провідності ($\gamma_k = \gamma_l = \gamma_m = \gamma_e$).

Значення коефіцієнтів домножити на $\gamma_e d/6 \sqrt{3}$

	k	p	m	o	l	n
k	6	-4	1	0	1	-4
p		24	-4	-8	0	-8
m			6	-4	1	0
o				24	-4	-8
l					6	-4
n						24

5. Порівняльний аналіз властивостей розрахованої характеристичної матриці.

Отримані характеристичні матриці застосовуються при побудові системи лінійних рівнянь методу вузлових напруг. Очевидно, що формування такої системи значно складніше, ніж у випадку більш простої лінійної апроксимації потенціалу та сталої апроксимації провідності [3]. Крім того, завдяки наявності вузлів на серединах сторін трикутників, розмір системи збільшується на кількість сторін трикутників, тобто

$$N_c = 1.5n_{тр,вн} + 2n_{тр,зовн}, \quad (14)$$

де $n_{тр,вн}$, $n_{тр, зовн}$ – кількість внутрішніх та зовнішніх трикутних апроксимаційних елементів.

Альтернативою підвищенню порядків апроксимації, як було сказано вище, є збільшення кількості апроксимаційних елементів при лінійній апроксимації потенціалу та сталій апроксимації провідності. При цьому кожен з трикутників шляхом сполучення середин його сторін розбивається на чотири менші трикутники з половинною довжиною сторін.

Очевидно, похибка апроксимації в цьому випадку зменшиться удвічі, кількість елементів зросте у 4 рази, а кількість вузлів стане такою самою, як при параболічній апроксимації потенціалу (14). Для подальшого зменшення похибки таку ж процедуру виконують необхідну кількість разів, збільшуючи кількість елементів на кожному кроці у 4 рази.

Тобто з погляду трудомісткості розв'язування прямої задачі обидві апроксимації є еквівалентними (однакова кількість шуканих вузлових потенціалів). Хоча при сталій апроксимації провідності формування системи рівнянь значно простіше.

З точки зору оберненої задачі розбиття кожного трикутника на 4 збільшує у таке ж число разів кількість невідомих, тобто $N_e = 2n(n+1) \cong 2n^2$ (де n – кількість вимірювальних електродів навколо круглого об'єкта).

При лінійній апроксимації провідності шуканими стають вузлові значення провідності і їх кількість $N_e \cong n^2/4$ стає меншою за кількість трикутних елементів у $N_e/N_e \cong 8$ разів. Зауважимо, що основні часові затрати в томографії провідності припадають на знаходження матриці Якобі N_x -разовим розв'язуванням прямої задачі (N_x – кількість шуканих невідомих) [6]. Тому завдяки застосуванню розглянутої вище сумісної апроксимації на кожній ітерації отримуємо значну економію обчислювальних затрат (приблизно 8 разів) при розв'язуванні прямої задачі.

Трудомісткість розв'язування оберненої задачі провідності зменшується приблизно у $8^3 \cong 500$ разів.

6. Висновки. Отримані значення коефіцієнтів характеристичних матриць та заступна схема дають можливість сформулювати систему лінійних рівнянь методу вузлових напруг при розв'язуванні прямої задачі томографії. Застосування одночасно параболічної апроксимації потенціалу та лінійної апроксимації провідності забезпечує не тільки виграш в точності, але також істотно зменшує трудомісткість розв'язування томографічних задач.

1. Dickin F.J., Zhao X.J., Abdulach M.Z. and others. *Tomographic Imaging of Industrial Process Equipment Using Electrical Impedance Sensors. Sensors VI: Technology, Systems and Applications // Proceedings of the 5-th Conference on Sensors and their Applications.* – Bristol, Philadelphia and New York, 1991. Pp.215-220. 2. Lidgey 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.* – Suppl.A, 1992. Vol.13. Pp.43-46. 3. Дорожовець М.М., Федорчук А.А., Петровська І.Р. *Математичні засади прямої задачі томографії провідності // Вісн. ДУ"ЛПІ", 1998. №324. С.43-51.* 4. Дорожовець М.М. *Томографія електричної провідності з еквіпотенціальною схемою вимірювальних електродів // Вимірювальна техніка та метрологія.* – Львів, 1998. – Вип.53. – С.46-54. 5. Dorozhovets M., Stadnyk B, Zavgorodny V., Kowalczyk A *Electrical Impedance Tomography System Based on Equipotential Electrodes // Proceedings of the XV Symposium Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits. Liege, Belgium, 1998. Pp.269-271.* 6. Дорожовець М.М. *Математичні проблеми реконструкції образів в технічній томографії // Вимірювальна техніка та метрологія.* – Львів, 1998. – Вип.53. – С.113-121. 7. Бессонов Л.А. *Теоретические основы электротехники.* – М. 1961. 8. *Математическое моделирование и исследование процессов в неоднородных средах / Сергиенко И.В., Скеопецкий В.В., Дейнека В.С.: Отв. ред. Григоренко Я.М.* – К.: 1991. 9. Савула Я.Г. *Метод скінчених елементів.* – К.: НМК ВО, 1993. – 100 с.

УДК 621. 398

О.В. Івахів

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра інформаційно-вимірювальної техніки

МОДЕЛЮВАННЯ ДИСЦИПЛІН ОБСЛУГОВУВАННЯ СУКУПНОСТІ АНАЛОГОВИХ ДЖЕРЕЛ СИСТЕМИ

© Івахів О.В., 2001

Досліджується активність сукупності джерел вимірювальної інформації, оцінюється похибка відновлення досліджуваного процесу, вимоги до пропускну здатності каналів зв'язку як функції від активності джерела, заданої точності відтворення, критеріїв оцінки похибки, властивостей досліджуваних процесів для вибраних дисциплін обслуговування.

Measurement information totality sources activities, investigated process renovation error estimation, communication channel capacity demands as activity and needed renovation precision, different estimation ways and investigated processes properties function for choosing serving, types.

Вступ. У процесі створення системи можна умовно виділити ряд етапів, а саме: системне та технічне проектування, виготовлення, випробовування, використання за призначенням. На системному етапі здійснюється вибір варіанта побудови й оптимізація параметрів системи. Варіант побудови системи вибирають з ряду альтернативних варіантів