

Kazimierz BRYDAK, Mykhaylo DOROZHOVETS

POLITECHNIKA RZESZOWSKA, KATEDRA METROLOGII I SYSTEMÓW DIAGNOSTYCZNYCH

Badanie bezpośredniej i pośredniej metody rekonstrukcji przewodności w tomografii elektrycznej

Mgr inż. Kazimierz BRYDAK

Jest absolwentem (1978) Wydziału Elektrycznego Politechniki Rzeszowskiej – specjalność metrologia i automatyka. Zatrudniony jest na stanowisku starszego wykładowcy w Katedrze Metrologii i Systemów Diagnostycznych. W pracy naukowo-badawczej zajmuje się zagadnieniami pomiarów tomograficznych i problemami przetwarzania sygnałów pomiarowych w mikrokontrolerach analogowych.



e-mail: brydak@prz.eu.pl

Streszczenie

W pracy zbadano dwa algorytmy realizujące rozwiązanie zagadnienia odwrotnego tomografii elektrycznej związane z odtworzeniem rozkładu konduktywności iteracyjnymi metodami przybliżonymi. W pierwszym algorytmie realizowane jest bezpośrednie odtwarzanie rozkładu konduktywności. W drugim algorytmie rekonstrukcji podlega rezystywność. W oparciu o zaproponowane modele rozkładu konduktywności z wzorcowymi zaburzeniami parametrów rozkładu przedstawiono ocenę zbieżności omawianych algorytmów oraz przedstawiono wpływ doboru parametrów początkowego przybliżenia konduktywności oraz sposób jego poprawy przez wprowadzenie współczynnika skalowania parametrów.

Słowa kluczowe: tomografia elektryczna, macierz wrażliwości, sieci elektryczne, zagadnienie odwrotne.

Investigations of direct and indirect methods for conductivity reconstruction in electrical tomography

Abstract

In the paper two iterative algorithms for distribution conductivity reconstruction by a tomography method are presented. Both algorithms are based on the previous approximation using the finite element method (FEM) of the conductivity γ inside the investigated area. In the first algorithm (called MG) the approximated conductivity distribution is directly reconstructed. In the second algorithm (called MR) the conductivity distribution is indirectly reconstructed by resistivity ρ with the next inverse transformation: $\gamma = 1/\rho$. Using electrical equivalent circuits of the triangular and rectangular elements, the FEM approximation can be presented as electrical networks (Fig. 2) built from resistors (conductors, capacitors and (or) inductors). Therefore the Jacobian matrix, which is used in the reconstruction algorithm, can be calculated directly and accurately (without any methodical errors) with solution of the appropriate equations of node potentials (5) or loop currents (6). The quality of algorithms is verified using 4 test models of conductivity distribution γ in the investigated area (Fig. 3). Each test model consists of $N_{el}=96$ triangular elements and provides $N_{ep}=24$ measuring electrodes (associated with the external node equivalent network). It is shown that the direct algorithm (MG) is convergent for small (about few percent) changes of conductivity and is strongly dependent on the level of initial conductivity in the first iteration. The convergence of the indirect algorithm (MR) does not depend on initial resistivity levels in the first iteration and after 3-4 iterations the model conductivity is reconstructed with the accuracy smaller than 1% for the reconstruction standard deviations (Fig. 3). It is possible to improve the direct algorithm (MR) by scaling the initial conductivity (12). The scaled factor is calculated as a ratio of the mean measured to calculated output interelectrode voltage value (11). After scaling the MG algorithm, it provides the same or better convergence as the MR algorithm (Fig. 3). The investigation results are discussed in the summary.

Keywords: electrical tomography, sensitivity matrix, electrical grid, inverse problem.

Prof. dr hab. inż. Mykhaylo DOROZHOVETS

Jest absolwentem (1975) Katedry Techniki Informatyko-Pomiarowej Politechniki Lwowskiej, w 2001 r. obronił pracę habilitacyjną. Obecnie jest zatrudniony na stanowisku profesora zwyczajnego w Katedrze Metrologii i Systemów Diagnostycznych Politechniki Rzeszowskiej. W pracy naukowo-badawczej zajmuje się analizą i oceną niepewności wyników pomiarów, zagadnieniami pomiarów tomograficznych oraz problemami przetwarzania sygnałów pomiarowych. Opublikował ponad 240 prac naukowych oraz 6 podręczników.



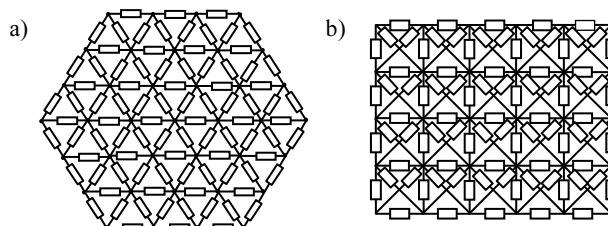
e-mail: michdor@prz.edu.pl

1. Wprowadzenie

Tomografia elektryczna (TE) wykorzystywana jest do uzyskiwania bezinwazyjnego obrazów rozkładów przestrzennych parametrów elektrycznych $p(x,y)$ (takich jak: rezystywność $\rho(x,y)$, konduktywność $\gamma(x,y)$, stała dielektryczna $\epsilon(x,y)$ lub ich kombinacji) wewnątrz badanego obiektu, wykorzystując wyniki pomiarów wielkości elektrycznych (na przykład potencjałów U) na obrzeżu obiektu przy jego zewnętrznym pobudzeniu (na przykład prądem I). System TE składa się z trzech zasadniczych części: wieloelektrodowy moduł sensorów, system akwizycji danych pomiarowych (SADP) i algorytm rekonstrukcji obrazu. Ponieważ liczba danych pomiarowych jest zwykle limitowana, praktyczne algorytmy rekonstrukcji obrazu najczęściej oparte są na wstępnej dyskretyzacji badanego obszaru. Dla przykładu zagadnienie położone opisywane równaniem Poissona

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

(gdzie: $\varphi(x,y)$ - jest funkcją rozkładu potencjału, ω - jest pulsacją prądu pobudzeń elektrod TE) jest aproksymowane metodą elementów skończonych (MES) elementami trójkątnymi, prostokątnymi lub innymi w zależności od kształtu obiektu. Wiadomo jest [2-5], że dla trójkątnych lub czworokątnych elementów skończonych możliwe jest reprezentowanie ich przez ekwiwalentną dyskretną sieć elektryczną zawierającą elementy pasywne (rezystory, cewki, kondensatory). W szczególności, na rys. 1 pokazano ekwiwalentne sieci elektryczne, reprezentujące trójkątne i czworokątne elementy skończone. Parametry elementów pasywnych tych sieci jednoznacznie są wyznaczone przez macierze charakterystyczne χ elementów skończonych, które z kolei są zależne jedynie od ich średniej konduktywności γ_j i kształtu elementu [2-5].



Rys.1. Ekwiwalentne sieci elektryczne aproksymujące badany obszar elementami trójkątnymi (a) oraz prostokątnymi (b)

Fig. 1. Equivalent electrical networks approximating the investigated area with triangular (a) and rectangular finite elements (b)

2. Matematyczne modele rekonstrukcji przewodności obiektu

Podstawowym zagadnieniem TE jest rozwiązywanie zagadnienia odwrotnego, które polega na wyznaczaniu rozkładu konduktywności γ_j $j = 1, \dots, N_{el}$ (N_{el} – liczba elementów aproksymacyjnych) na podstawie uzyskanych wyników pomiarów $U_{meas,i}$ $i = 1, \dots, M_{wp}$ (M_{wp} – liczba zarejestrowanych wyników pomiarów).

Ponieważ wyniki pomiarowe nieliniowo zależą od poszukiwanego rozkładu konduktywności

$$U_{meas,i} = F_i(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_{N_{el}}) \quad i = 1, \dots, M_{wp}, \quad (2)$$

to zagadnienie odwrotne opisywane jest nieliniowym układem równań.

Odtwarzanie rozkładu konduktywności realizowane jest zwykle iteracyjnymi metodami przybliżonymi jak np. metoda Newtona-Raphsona (N-R) czy metodą najszybszego spadku. Np. w algorytmie N-R do rozwiązania nieliniowego układu równań (2) wykorzystuje się linearyzację wokół zadanych wartości γ_{zad} [7]

$$U_{meas,i} \approx F(\gamma_{zad,j}) + \sum_j \frac{\partial F_i}{\partial \gamma_j} (\gamma_j - \gamma_{zad,j}), \quad (3)$$

lub w postaci macierzowej:

$$\mathbf{U}_{meas} \approx \mathbf{F}(\boldsymbol{\gamma}_{zad}) + \mathbf{J}(\boldsymbol{\gamma}_{zad}) \cdot (\boldsymbol{\gamma} - \boldsymbol{\gamma}_{zad}), \quad (4)$$

gdzie: $\mathbf{J}(\boldsymbol{\gamma}) \left(J_{i,j}(\boldsymbol{\gamma}) = \frac{\partial F_i}{\partial \gamma_j} \right)$ jest macierzą wrażliwości (Jakobianem).

Wyznaczana jest ona na podstawie rozwiązania liniowego zagadnienia prostego, które polega na obliczaniu rozkładu potencjałów lub prądów w sieci dla znanego rozkładu konduktywności.

Przy wymuszeniu prądowym macierz wrażliwości może być wyznaczona dokładnie, bez błędów metody, w oparciu o wyrażenia [2-6]:

$$J_{i,j(k)}(\boldsymbol{\gamma}) = -\frac{1}{I_0} \left(\sum_{l=1}^M S_{jl} \Delta U_{jl}^{(k)} \Delta U_{jl}^{(i)} \right); \quad (5)$$

lub

$$J_{i,j(k)}(\boldsymbol{\gamma}) = -\frac{1}{\gamma_j^2 I_0} \left(\sum_{l=1}^M \frac{I_{jl}^{(k)} I_{jl}^{(i)}}{S_{jl}} \right), \quad (6)$$

przy czym $M=3$ dla elementów trójkątnych i $M=6$ dla elementów czworokątnych. W tych wyrażeniach S_{jl} jest współczynnikiem, który wiąże wartość konduktancji G_{jl} l -gałęzi sieci z konduktywnością γ_j j -tego skończonego elementu; $\Delta U_{jl}^{(k)}$, $\Delta U_{jl}^{(i)}$ – są spadkami napięć na l -gałęzi j -tego elementu przy wymuszeniu z zewnętrznej gałęzi o numerze k i i . Analogicznie $I_{jl}^{(k)}$, $I_{jl}^{(i)}$ są prądami l -gałęzi j -tego elementu przy tych samych wymuszeniach.

Z zależności (5) i (6) widać, że macierz wrażliwości może być obliczona na podstawie rozwiązania zagadnienia prostego metodą potencjałów węzłowych (5) lub metodą prądów oczkowych (6).

Ze wzoru (6) wynika, że przy zwiększeniu konduktywności obiektu m -razy ($\gamma^* = m \cdot \gamma$) wartość wrażliwości zmienia się $1/m^2$ razy, a wyniki pomiarów napięć zmieniają się $1/m$ razy.

Natomiast, jeśli bezpośrednio rekonstruowana jest rezystywność: $\rho = 1/\gamma$, to, ponieważ zachodzi równość

$$\frac{\partial U_{meas}}{\partial \rho} = \frac{\partial U_{meas}}{\partial \gamma} \frac{\partial \gamma}{\partial \rho} = -\frac{\partial U_{meas}}{\partial \gamma} \gamma^2, \text{ ze wzoru (6) wynika:}$$

$$J_{i,j(k)}(\rho_j) = -J_{i,j(k)}(\gamma_j) \gamma_j^2 = \frac{1}{I_0} \left(\sum_{l=1}^M \frac{I_{jl}^{(k)} I_{jl}^{(i)}}{S_{jl}} \right). \quad (7)$$

Stąd widać, że przy skokowej zmianie przewodności ($\gamma^* = m \cdot \gamma$, $\rho^* = \rho/m$), wrażliwość (7) nie zależy od poziomu na którym występują zmiany wartości rezystywności.

Podobnie do wyrażenia (4), linearyzowany układ równań wiążący napięcia mierzone z rezystywnościami $\boldsymbol{\rho}$ można przedstawić w postaci macierzowej następująco [7]:

$$\mathbf{U}_{meas} \approx \boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{\rho}_{zad}) + \mathbf{J}(\boldsymbol{\rho}_{zad}) \cdot (\boldsymbol{\rho} - \boldsymbol{\rho}_{zad}). \quad (8)$$

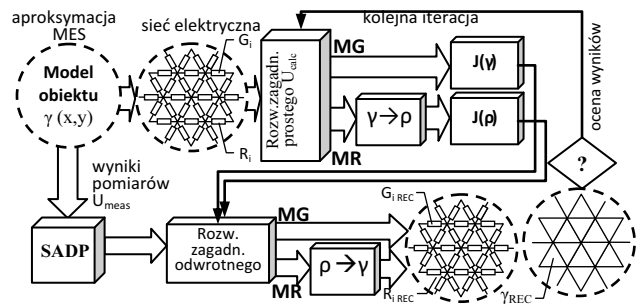
W wyrażeniu (8) funkcja $\boldsymbol{\Phi}$ jest inną funkcją nieliniową w stosunku do funkcji \mathbf{F} w wyrażeniu (4).

Celem dalszych badań jest wyjaśnienie jaka metoda rekonstruowania (wg równania (4) oraz (5), (6) lub (8) oraz (7)) jest skuteczniejsza z punktu widzenia szybkości zbieżności algorytmu obliczeniowego przy różnych modelach rozkładu konduktywności.

3. Ogólny opis algorytmu badań

3.1. Etapy algorytmu badań

Algorytm badań zbieżności i dokładności rekonstrukcji przewodności TE przewiduje następujące etapy realizacji (rys. 2):



Rys. 2. Graficzna prezentacja algorytmu badań rekonstrukcji γ_i metodą MR i MG
Fig. 2. Graphical presentation of the algorithm for investigations of γ_i reconstruction with MR and MG method

1. Zadanie modelu rozkładu konduktywności γ_{zad} .
2. Wstępna dyskretyzacja obszaru obiektu MES i na podstawie macierzy charakterystycznych elementów wyznaczanie wartości parametrów ekwiwalentnej sieci elektrycznej.
3. Wyznaczenie wartości napięć międzyelektrodowych U_{meas} dla zadanego pobudzenia $I_0 = 1$ oraz γ_{zad} .
4. Zadanie początkowego, jednostajnego rozkładu przewodności o wartości $\gamma^{(it)} = 1, (it - 1)$.
5. Rozwiązanie dla $\gamma^{(it)}$ zagadnienia prostego i wyznaczenie potencjałów węzłowych lub prądów oczkowych oraz napięć międzyelektrodowych $U^{(it)}$.
6. Obliczenie macierzy wrażliwości (5) lub (6) dla metody bezpośredniej rekonstrukcji przewodności (MG), oraz wg zależności (7) – dla metody rekonstrukcji rezystywności (MR).
7. Rekonstruowanie przewodności $\gamma^{(it+1)}$ wg (9) oraz rezystywności wg (10) z odwrotnym przekształceniem $\rho^{(it+1)} \rightarrow \gamma = 1/\rho$.
8. Wyznaczenie błędów rekonstrukcji $\delta_j^{(it)}$ oraz ich parametrów według pkt. 3.5.

9. Powtórzenie procesu iteracyjnego od p.5 przy $\gamma^{(it+1)}$.
10. Zakończenie procesu iteracyjnego na podstawie $|\delta| \leq \varepsilon_{dop}$ lub $it = it_{zad}$.

3.2. Bezpośrednia rekonstrukcja przewodności (algorytm MG)

Wyznaczanie przewodności wg linearyzowanego równania (4) odbywa się w iteracyjny sposób z wykorzystaniem regularyzacji Lewenberga-Marquada [7]:

$$\gamma^{(it+1)} = \gamma^{(it)} + \left[\mathbf{J}(\gamma^{(it)})^T \mathbf{J}(\gamma^{(it)}) + \mu^{(it)} \mathbf{I} \right]^{-1} \cdot \mathbf{J}(\gamma^{(it)})^T \cdot (\mathbf{U}_{meas} - \mathbf{U}_{calc}^{(it)}), \quad (9)$$

gdzie: $\mu^{(it)} \mathbf{I}$ - jest członem regularyzującym [7]
 $\mu^{(it)} \approx \sqrt{n \cdot m_{eps}} \cdot \left\| \mathbf{J}(\gamma^{(it)})^T \mathbf{J}(\gamma^{(it)}) \right\|_2$, m_{eps} - epsilon maszyny,
 a \mathbf{I} macierzą jednostkową.

W celu polepszenia zbieżności wartość członu regularyzacji docelowo adaptuje się: $\xi^{(it)} \mu^{(it)} \mathbf{I}$, gdzie $\xi^{(it)} = C_0 \cdot (\nu^{(it)})^{p_0}$,

$$g^{(it)} = \frac{\max(\nu^{(it)}) - \min(\nu^{(it)})}{2\nu^{(it)}}, \quad \nu_i^{(it)} = \frac{U_{meas_i}}{U_{calc_i}^{(it)}}, \quad i = 1, 2, \dots, M_{wp}$$

a wartości współczynników C_0 i p_0 dobiera się eksperymentalnie.

3.3. Pośrednia rekonstrukcja przewodności z bezpośrednią rekonstrukcją rezystywności (algorytm MR)

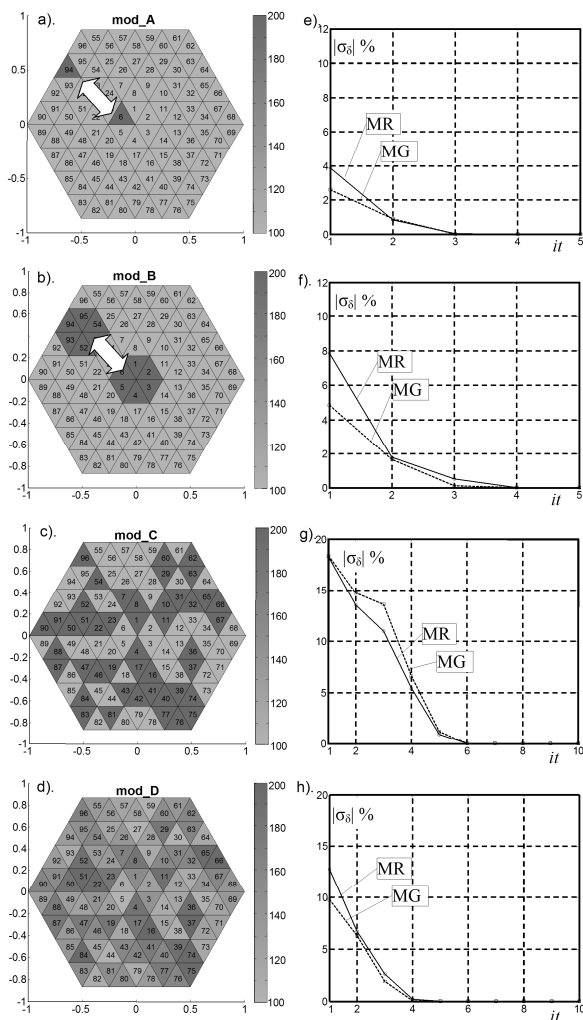
W danym przypadku dla każdej iteracji wyznaczone są rezystywności: $\rho^{(it)} = 1/\gamma^{(it)}$, następnie zgodnie z wyrażeniem podobnym do (9) jest rekonstruowana rezystywność:

$$\rho^{(it+1)} = \rho^{(it)} + \left[\mathbf{J}(\rho^{(it)})^T \mathbf{J}(\rho^{(it)}) + \xi^{(it)} \mu^{(it)} \mathbf{I} \right]^{-1} \cdot \mathbf{J}(\rho^{(it)})^T \cdot (\mathbf{U}_{meas} - \mathbf{U}_{calc}^{(it)}), \quad (10)$$

i na końcu na drodze odwrotnego przekształcenia wyznacza się poszukiwaną przewodność: $\gamma^{(it+1)} = 1/\rho^{(it+1)}$.

3.4. Badane modele rozkładu przewodności

Do badań zaproponowanych w pracy algorytmów zaprojektowano numeryczny model sieci rezystywnej aproksymujący założony badany obszar elementami trójkątymi. Założona sieć składa się z $N_{el} = 96$ elementów oraz $N_{ep} = 24$ elektrod pomiarowych (związanych z zewnętrznymi węzłami ekwiwalentnej sieci). Modelowanie własności badanego obszaru polega na zadawaniu określonych wartości przewodności elementów skończonych sieci. W badaniach założono charakterystyczne modele badanego obiektu związane z różnym rozkładem zmienności przewodności $\gamma_{j,zad}$ (rys. 3, a, b, c, d). W modelu typu A (rys. 3a) skokowej zmianie o P% (P=10..100%) podlega tylko jeden element, którego położenie zmienia się od środka do granicy obszaru. W modelu typu B (rys. 3b) rozważa się jednoczesną skokową zmianę przewodności 6 zgrupowanych w różny sposób elementów. W modelu typu C (rys. 3c) rozważa się losowe w przestrzeni dwuwartościowe zmiany przewodności, a w modelu typu D (rys. 3d) - losowe zmiany przewodności o rozkładzie jednostajnym z różną wartością średnią.



Rys. 3. Rozważane modele z różnym rozkładem zmienności γ_i oraz odpowiadające im standardowe odchylenia błędów rekonstrukcji metodą MR i metodą MG

Fig. 3. The considered models with different distribution of parameter γ_i variability and corresponding reconstruction standard deviations for MR and MG method

3.5. Ocena jakości rekonstrukcji przewodności

W każdej iteracji obliczany jest względny błąd rekonstrukcji wartości przewodności każdego aproksymowanego elementu

$$\delta_j^{(it)} = \frac{\gamma_j^{(it)} - \gamma_{j,zad}}{\gamma_{j,zad}} 100\% \quad (11)$$

i jego charakterystyki: wartość średnia $\bar{\delta}^{(it)} = \frac{1}{n} \sum_j \delta_j^{(it)}$, standardowe odchylenie $\sigma_{\delta}^{(it)} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_j (\delta_j^{(it)} - \bar{\delta}^{(it)})^2}$, wartość maksymalna $\delta_{peak}^{(it)} = \max(|\delta_j^{(it)}|)$.

4. Wyniki badań

4.1. Wyniki badań zbieżności algorytmów

Wykorzystując opisane w 3.4 modele rozkładu przewodności, w każdej iteracji na podstawie algorytmów MG (według 3.2) i MR

(według 3.3) zostały zrekonstruowane wartości przewodności elementów oraz odpowiadające im błędy rekonstrukcji.

W rezultacie badań ustalono, że w modelach o niewielkich zakresach zmian przewodności $P \approx 10..20\%$ obydwie algorytmy szybko znajdują rozwiązanie. Przy zmianach przewodności rzędu $P \approx 100\%$ pierwszy algorytm **MG** (bezpośrednie odtwarzanie przewodności) nie zapewnia rekonstrukcji (nie jest zbieżny). Przyczyną rozbieżności tego algorytmu jest duża czułość macierzy wrażliwości do zmian przewodności (jak omówiono wcześniej odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu).

Natomiast drugi algorytm (z bezpośrednią rekonstrukcją rezystywności **MR**) jest zbieżny niezależnie od wartości zmian przewodności modelu. Na rys. 3, e, f, g, h przedstawiono zależność (MR) standardowego odchylenia względnych błędów rekonstrukcji przewodności odpowiednich modeli obiektu w kolejnych iteracjach. Wykorzystanie adaptacyjnej regularyzacji pozwala na osiągnięcie akceptowalnych wyników już po 3-4 iteracjach (rys. 3, e, f, g, h). Jednak realizacja tego algorytmu wiąże się z dodatkowym nakładem obliczeń związanych z przeliczaniem przewodności na rezystywność i odwrotnie, dla każdego elementu ekwiwalentnej sieci.

4.2. Polepszenie zbieżności algorytmu bezpośredniego odtwarzania konduktywności

Metoda bezpośredniego odtwarzania przewodności jest prostszą w realizacji, ponieważ nie wymaga przekształcania parametrów: $\rho^{(it+1)} \leftarrow 1/\gamma^{(it)}$ oraz $\gamma^{(it+1)} \leftarrow 1/\rho^{(it)}$. Autorzy zaproponowali skuteczną metodę polepszenia zbieżności algorytmu bezpośredniego odtwarzania przewodności bazującą na skalowaniu wartości początkowego przybliżenia przewodności w każdej iteracji. Współczynnik skalowania V_{skal} jest wyznaczany na podstawie przybliżonej równości średnich stosunków wartości napięć zmierzonych i obliczanych oraz średnich stosunku wartości przewodności:

$$\left(\frac{\overline{\gamma_{zad}}}{\overline{\gamma^{(1)}}} \right) \approx \left(\frac{\overline{U_{meas}}}{\overline{U_{calc}}} \right) = V_{skal} \quad (11)$$

Stąd wstępnie przyjmowane początkowe przybliżenie $\gamma^{(1)} = 1$ będzie zamienione na przeskalowaną wartość:

$$\gamma^{(1)} = \gamma^{(1)} \cdot V_{skal} \quad (12)$$

Wykorzystanie tego skalowania (12) przy wyznaczaniu macierzy wrażliwości (5) i wartości napięć obliczanych U_{calc} w każdej iteracji zapewnia dobrą zbieżność algorytmu bezpośredniego odtwarzania konduktywności wg równania (9), w pewnych przypadkach nawet lepszą do zbieżności algorytmu pośredniego (10) (zależności MG rys. 3, e, f, g, h).

5. Wnioski

- Rozkład konduktywności może być rekonstruowany metodą bezpośrednią lub metodą pośrednią przez rekonstrukcję rezystywności.
- Metoda pośrednia dzięki niezależności macierzy wrażliwości Jakobiego od poziomu wartości rezystywności zapewnia dobrą zbieżność algorytmu niezależnie od początkowego przybliżenia.
- Metoda pośrednia wymaga dobrego przybliżenia początkowego konduktywności i przy źle dobranym przybliżeniu początkowym może nie zapewnić zbieżności.
- Znaczne polepszenie zbieżności tego algorytmu może być zrealizowane przez wykorzystanie współczynnika skalowania, wyznaczonego na podstawie wartości średniej stosunku napięć zmierzonych do obliczonych dla poprzednio przyjętego przybliżenia przewodności.
- Dla badanych modeli rozkładu przewodności obydwie algorytmy zapewniają wyznaczanie przewodności z dokładnością poniżej 1% dla kryterium wartości standardowego odchylenia podczas 3-4 iteracji.

6. Literatura

- [1] Seagar A.D., Barber D.C., Brown B.H.: Electrical Impedance Imaging. IEE Proceedings. Vol.134, Pt. A, No 2, February 1987, str. 201-209.
- [2] Dorozhovets M.: Direct calculation of Jacobi matrix without the systematic error using finite elements method approximation in the tasks of the electrical tomography. (Ukr.) Selection and the transmission of information. N 8, Lviv, 2003. str.40-45.
- [3] Dorozhovets M., Brydak K.: Properties of electrical network equivalent to a finite element approximation and their using for image reconstruction in electrical tomography. 49th International Scientific Colloquium. Ilmenau Technical University, 27-30 September 2004, str. 343-348.
- [4] Dorozhovets M.: Modele dyskretne zagadnień tomografii elektrycznej. PAK Nr 7/8. Warszawa, 2003. str. 21-25.
- [5] Dorozhovets M., Kowalczyk A.: Fast and precise Method of the Jacoby Matrix Calculation for the Electrical Tomography Tasks. Proc. 48th International Scientific Colloquium. Ilmenau Technical University. September 22-25.2003. str. 423-424.
- [6] Dorozhovets M., Brydak K.: Metoda wyznaczania macierzy wrażliwości w tomografii elektrycznej przy aproksymacji elementami skończonymi. PAK Nr 12, vol.53, Warszawa, 2007. str.58-61.
- [7] Dennis J.E., Shnabel R.B.: Numerical method for unconstrained Optimisation in Nonlinear Equations. Prentice Hall, Inc. Englewood Clifs. New Jersey, 1983.

otrzymano / received: 15.10.2009

przyjęto do druku / accepted: 10.11.2009

artykuł recenzowany

INFORMACJE

Zapraszamy do publikacji artykułów promocyjnych w miesięczniku naukowo-technicznym PAK

Redakcja czasopisma POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, pok. 30b,
tel./fax: 032 237 19 45, e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl