



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej
Polskiej

(96) Data i numer zgłoszenia patentu europejskiego:
21.11.2018 18460066.6

(97) O udzieleniu patentu europejskiego ogłoszono:
**30.12.2020 Europejski Biuletyn Patentowy 2020/53
EP 3649934 B1**

(13) **T3**
(51) Int.Cl.
A61B 5/053 (2006.01)
G06T 11/00 (2006.01)

(54) Tytuł wynalazku:

Sposób rekonstrukcji obrazu w elektrycznej tomografii impedancyjnej

(30) Pierwszeństwo:
08.11.2018 PL 42769718

(43) Zgłoszenie ogłoszono:
13.05.2020 w Europejskim Biuletynie Patentowym nr 2020/20

(45) O złożeniu tłumaczenia patentu ogłoszono:
31.05.2021 Wiadomości Urzędu Patentowego 2021/11

(73) Uprawniony z patentu:
Uniwersytet w Białymstoku, Białystok, PL

(72) Twórca(y) wynalazku:
KRZYSZTOF R. SZYMAŃSKI, Białystok, PL
CEZARY J. WALCZYK, Klepacz, PL

(74) Pełnomocnik:

PL/EP 3649934 T3

Uwaga:

W ciągu dziewięciu miesięcy od publikacji informacji o udzieleniu patentu europejskiego, każda osoba może wnieść do Europejskiego Urzędu Patentowego sprzeciw dotyczący udzielonego patentu europejskiego. Sprzeciw wnosi się w formie uzasadnionego na piśmie oświadczenia. Uważa się go za wniesiony dopiero z chwilą wniesienia opłaty za sprzeciw (Art. 99 (1) Konwencji o udzielaniu patentów europejskich).

SPOSÓB REKONSTRUKCJI OBRAZU W ELEKTRYCZNEJ TOMOGRAFII IMPEDANCYJNEJ

Opis

- 5 **[0001]** Przedmiotem wynalazku jest sposób rekonstrukcji obrazu w elektrycznej tomografii impedancyjnej na podstawie teorii przepływów w układach wielospójnych.
- 10 **[0002]** Elektryczna tomografia impedancyjna polega na obrazowaniu przestrzennego rozkładu oporności właściwej wnętrza próbki materiału. Metoda ta polega na wymuszeniu prądu pomiędzy dwoma kontaktami i pomiarze różnicy potencjałów pomiędzy dwoma innymi kontaktami. Takie pomiary przeprowadza się według określonego schematu dla wielu różnych kontaktów rozłożonych na brzegu badanego obszaru próbki, otrzymując zestaw prądów i potencjałów, na podstawie których rekonstruuje się obraz.
- 15 **[0003]** Tomografia impedancyjna stosowana jest między innymi w medycynie (do obrazowania wnętrza ciała, szczególnie stanów zapalnych płuc), w geologii (do poszukiwania złóż mineralnych), w ekologii (do obrazowania rozkładów przestrzennych wód gruntowych lub do obrazowania przecieków ze składowisk odpadów do gruntu). Może być również stosowana do obrazowania stopnia wypełnienia zbiorników i rurociągów, do obrazowania defektów struktury materiału (ubytków, pęknięć), czy też do obrazowania jakości betonu.
- 20 **[0004]** Otrzymanie przestrzennego obrazu rozkładu impedancji wiąże się z koniecznością rozwiązywania tzw. zagadnienia odwrotnego.
- 25 **[0005]** Zagadnienie odwrotne dla tomografii impedancyjnej zostało opisane w publikacji „An Introduction to the Mathematical Theory of Inverse Problems” (Andreas Kirsch, Springer Science+Business Media, LLC 2011, str. 167). Zagadnienie odwrotne wyraża się poprzez operatory całkowe działające w przestrzeni danych o nieskończonym wymiarze i określone dla obszarów jednospójnych, to znaczy takich, które nie zawierają dziur. Nie została jednak
- 30 sformułowana teoria rozwiązywania zagadnienia odwrotnego dla obszarów wielospójnych, czyli takich, które mają dziury. Wielospójność jest o tyle istotna, że dotyczy układów ważnych dla zastosowań, w których poszukuje się pęknięć bądź ubytków.
- 35 **[0006]** W tomografii impedancyjnej występują skończone zbiory danych obciążonych niepewnościami eksperymentalnymi. Znanych jest kilka sposobów tworzenia obrazów w takich przypadkach, lecz wszystkie te sposoby opierają na zaawansowanych metodach numerycznych.
- 40 **[0007]** Jedną z metod to rozwiązanie zagadnienia odwrotnego poprzez regularyzację polegającą na ucięciu nieskończonego widma spektralnego odpowiednich operatorów i konstrukcji metody faktoryzacji działającej w przestrzeni skończonego wymiarowej. Metoda ta jest opisana w publikacji „A regularization technique for the factorization method” (Armin Lechleiter, Inverse Problems 22 (2006), str. 1605–1625).
- 45 **[0008]** Znana jest również metoda otrzymywania obrazu w warunkach dynamicznych, polegająca na rzutowaniu wstecznym (ang. back-projection), gdzie obraz tworzy się na podstawie analizy różnic pomiędzy kolejnymi zestawami

danych. Metoda ta jest przedstawiona w opisie patentu amerykańskiego US4617939 oraz w publikacji „Applied potential tomography” (D. C. Barber and B. H. Brown, J. Br. Interplanet. Soc., 1989, vol. 42, nr 7, str. 391–393).

5 [0009] Znana jest również metoda statyczna, w której przestrzenne rozkłady oporności właściwej otrzymuje się nieliniowymi metodami optymalizacyjnymi. Metoda ta jest opisana w opisie patentu amerykańskiego US5465730 oraz publikacji „Comparing Reconstruction Algorithms for Electrical Impedance Tomography” (T. J. Yorkey, J. G. Webster, and W. J. Tompkins, IEEE Trans. Biomed. Eng., 1987, vol. BME-34, nr 11, str. 843–852).

10 [0010] W metodach tworzenia obrazu potrzebne jest uwzględnienie kształtu badanego ciała oraz anizotropii. W tym celu wykorzystuje się najpierw obliczenia przeprowadzane metodami elementów skończonych. Metoda elementów skończonych polega na poszukiwaniu przybliżonych rozwiązań układów równań różniczkowych cząstkowych. Badany obszar dzieli się na skończone elementy, dla
15 których rozwiązanie jest przybliżane przez konkretne funkcje. Faktyczne obliczenia są przeprowadzane tylko dla węzłów tego podziału. Metodami elementów skończonych bada się rozkład prądów i napięć i na podstawie tego tworzy się metody obrazowania, jak opisano w publikacji „A finite element model with node renumbering for adaptive impedance imaging” (E. J. Woo, P. Hua, W. J. Tompkins, and J. G. Webster, Proc. IEEE EMBC, 1988, vol.1, str. 277–278).

20 [0011] Przy rekonstrukcji obrazu pojawia się problem odwracania macierzy w sytuacji, gdy macierz ta jest prawie osobliwa. W takich przypadkach do tworzenia obrazu stosuje rozkład według wartości osobliwych (ang. singular value decomposition), co przedstawiono w opisie patentu europejskiego EP0599877B1 i w publikacjach „An interleaved drive electrical impedance tomography image reconstruction algorithm” (B. M. Eyiboglu, Physiol. Meas. 17 (A), 1996, str. 59-71) oraz „Time series of EIT chest images using singular value decomposition and Fourier transform” (N Kerrouche, CN McLeod, W.R.B. Lionheart, Physiol Meas. 2001 Feb; 22(1), str.147-57).

30 [0012] Znany jest sposób tworzenia obrazu wykorzystujący metody bayesowskie, w których wartości pomiarowe traktuje się jako zmienne losowe, a rozwiązanie problemu odwrotnego konstruuje się w oparciu o teorię prawdopodobieństwa, jak opisano w publikacji „Statistical inversion and Monte Carlo sampling methods in EIT” (J. Kaipio, V. Kolehmainen, E. Somersalo, and M. Vauhkonen, Inverse problems 16, 2000, str. 1487–1522).

35 [0013] Niedawno opublikowane zostały prace dotyczące rozkładu prądów i potencjałów w jednorodnym układzie dwuspójnym (z jedną dziurą) - „Determination of the Riemann modulus and sheet resistance of a sample with a hole by the van der Pauw method” (K. Szymański, K. Łapiński, J. L. Cieśliński, Measurement Science and Technology, 26 (2015) 055003) oraz trójspójnym (z dwiema dziurami) - „Determination of topological properties of thin samples by the van der Pauw method” (K. R. Szymański, C. J. Walczyk, J. L. Cieśliński „Measurement”, złożona do publikacji 28.04.2018r., Ref: MEAS-D-18-01040). Publikacje te dotyczą wyznaczania pewnych własności geometrycznych układu na
45 podstawie poszukiwania oporności ekstremalnych, wymagających przesuwania kontaktów po brzegu badanego układu.

[0014] Artykuł "Two-dimensional electrostatic model for the Van der Pauw method" autorstwa Sun Zheng-Hang i inni, Physics Letters A 381 nr 27 strony

2144-2148, ISSN:0374-9601) opisuje zastosowanie dwu-wymiarowego modelu elektrostatycznego do badania próbek z dziurami metodą Van der Pauwa (VdP).

[0015] Celowym byłoby zatem opracowanie alternatywnych metod rekonstrukcji obrazu w elektrycznej tomografii impedancyjnej. Alternatywne metody, zwłaszcza oparte na różnych od dotychczas przyjmowanych założeniach teorii są korzystne, ponieważ w diagnostyce zdarzają się sytuacje niejednoznaczne. Wtedy wyniki różnych metod pomagają w podejmowaniu właściwych decyzji.

[0016] Przedmiotem wynalazku jest sposób rekonstrukcji obrazu w elektrycznej tomografii impedancyjnej do wyznaczania niejednorodności materiału, w którym to sposobie: na brzegu badanego obszaru materiału rozmieszcza się kontakty; poprzez które wymusza się przepływ prądu; i odczytuje się z nich napięcia poprzez układ przewodów podłączonych pomiędzy kontaktami a układem akwizycji danych. Sposób jest znamieny tym, że: określa się odwzorowanie konforemne reprezentujące przekształcenie dysku do kształtu badanego obszaru; zadaje się wiele położeń dziur w badanym obszarze; wyznacza się promienie dziur w zadanych położeń, przetwarzając odczytane z kontaktów napięcia przy wykorzystaniu teorii przepływów w układach wielospójnych, za pomocą procesora przyłączonego do układu akwizycji danych; i obrazuje się wyznaczone promienie dziur za pomocą układu wizualizacji, poprzez transformację położeń i promieni dziur do badanego obszaru przy użyciu odwzorowania konforemnego.

[0017] Korzystnie, wyznacza się promienie dziur dla co najmniej dwóch zestawów losowo zadanych położeń.

[0018] Korzystnie, wyznacza się promienie dziur dla zadanych położeń rozmieszczonych w regularnej sieci.

[0019] Przedmiot wynalazku został przedstawiony w przykładzie wykonania na rysunku, na którym:

Fig. 1 przedstawia kontakty umieszczone w punktach na brzegu obszaru D;

Fig. 2A-2C przedstawiają przykłady położeń kontaktów odpowiadających różnym kształtom badanych obiektów. Cienkimi liniami zaznaczono schematycznie przewody do przekazywania sygnałów;

Fig. 3 przedstawia przykład realizacji metody według wynalazku;

Fig. 4A przedstawia przykład jednorodnej próbki z dwoma dziurami, a Fig. 4B przedstawia rekonstrukcję obrazu tej próbki;

Fig. 5A przedstawia przykład próbki ze skokową zmianą oporności, a Fig. 5B przedstawia rekonstrukcję obrazu tej próbki.

[0020] Dla czytelniejszego zobrazowania opisanego tu rozwiązania przedstawione zostaną poniżej elementy teorii przepływów w układach wielospójnych.

[0021] Z twierdzenia Riemanna wynika, że dwuwymiarowy, jednorodny układ z dziurami (przy czym jako dziury w ramach niniejszego opisu rozumie się wszelkiego rodzaju otwory i szczeliny) może być przekształcony przez odwzorowanie konforemne do dysku zawierającego tylko koncentryczne otwory, jak opisano to w publikacji „Complex Analysis” (L. V. Ahlfors, 1979, 3rd ed. New York: McGraw-Hill).

[0022] Dalej, bez ograniczania ogólności, ponieważ odwzorowania konforemne nie zmieniają prądów i potencjałów, rozważamy jednostkowy dysk, w którym znajduje się k koncentrycznych, nie przecinających się otworów o promieniach $r_1, r_2, \dots, r_k \in R^1$, i o środkach w punktach $o_1, o_2, \dots, o_k \in R^2$. Układ taki, oznaczany dalej

przez D , posiada $k+1$ krawędzi, czyli k krawędzi od dziur i jedną zewnętrzną krawędź dysku.

[0023] Rozważamy potencjał elektryczny $V(x,y)$ na obszarze D , pochodzący od punkowego źródła prądu i punkowego ścieku prądu, znajdujących się w punktach $s_+, s_- \in D$. Korzystając z metody obrazów znanej z elektrostatyki (jak opisano w publikacji „The Feynman Lectures on Physics” (R. Feynman, R. Leighton, M. Sands, vol. 2, Addison-Wesley-Longman, 1970)) konstruujemy zbiory punktów $S(s_+)$ and $S(s_-)$, w których ulokowane są źródła i ścieki, dające potencjał w obszarze D . W tym celu dla każdej krawędzi $i, i=1, \dots, k+1$ definiujemy funkcję $I_i: R^2 \rightarrow R^2$, która jest inwersją względem odpowiednich okręgów (krawędzi dziur):

$$I_i(x) = \frac{x-o_i}{(x-o_i) \cdot (x-o_i)} r_i^2 + o_i. \quad (1)$$

[0024] Dla $i=k+1$ oczywiście $o_{k+1}=0$ oraz $r_{k+1}=1$. Następnie definiujemy obraz zbioru X w odwzorowaniu, które jest sumą wszystkich inwersji $I_i, s: X \rightarrow Y$

$$s(X) = \{y_i: y_i = I_i(x_j), i = 1, 2, \dots, k+1, x_j \in X\}. \quad (2)$$

[0025] Dalej, zaczynając od dowolnego punktu $p \in D$, przez kolejne iteracje definiujemy ciąg zbiorów $s^0, s^1, s^2, \dots$:

$$s^0 = \{p\}, s^1 = s(s^0), s^2 = s(s^1), \dots, s^{n+1} = s(s^n), \dots \quad (3)$$

[0026] Końcowy wynik naszej konstrukcji, obraz $S(p)$ pojedynczego punktu p w odwzorowaniu S jest zbiorem punktów:

$$S(p) = \bigcup_{i=0}^{\infty} s^i. \quad (4)$$

[0027] Następnie rozważamy potencjał elektryczny w punkcie $q=(x,y)$ należącym do nieskończonej płaszczyzny z punkowym źródłem prądu w punkcie s_+ i punktowym ściekiem prądu w punkcie s_- , który jest równy:

$$V(q, s_+, s_-) = \frac{j\rho}{2\pi h} \ln \frac{|s_+ - q|}{|s_- - q|}, \quad (5)$$

gdzie j jest prądem źródła, ρ opornością właściwą a h grubością jednorodnej próbki, w której jest k rozważanych dziur. Z tego dalej wynika, że potencjał w dowolnym punkcie $q \in D$, który pochodzi od źródeł i ścieków umieszczonych w punktach tworzących odpowiednie zbiory $S(s_+)$ i $S(s_-)$, równy jest sumie potencjałów od pojedynczych źródeł i ścieków:

$$V(q) = \sum_{\substack{t_+ \in S(s_+) \\ t_- \in S(s_-)}} V(q, t_+, t_-) = \frac{j\rho}{2\pi h} \ln \prod_{\substack{t_+ \in S(s_+) \\ t_- \in S(s_-)}} \frac{|t_+ - q|}{|t_- - q|}. \quad (6)$$

[0028] Nie jest znana jawna postać równania (6). Zbiory $S(s_+)$ i $S(s_-)$ są zazwyczaj fraktalami. Interesujące jest natomiast przybliżenie dla małych dziur. W tym celu rozważamy cztery kontakty umieszczone w punktach na brzegu obszaru D wyznaczonych kątami $\alpha \beta \gamma \delta$ (jak przedstawiono na Fig. 1).

[0029] Prąd $j_{\alpha\beta}$ wpływa przez kontakt α (źródło) i wypływa przez kontakt β (ściek), natomiast różnica potencjałów $V_{\gamma\delta}$ mierzona jest pomiędzy kontaktami γ i δ . Oporność czteropunktowa dla kontaktów $\alpha \beta \gamma \delta$ jest zdefiniowana jako $R_{\alpha\beta\gamma\delta} = V_{\gamma\delta} / j_{\alpha\beta}$. Rozwijając równanie (6) względem małych parametrów $r_1, r_2, \dots, r_k$ i podstawiając w miejsce prądów i napięć, otrzymujemy oporności czteropunktowe:

$$R_{\alpha\beta\gamma\delta} = R_{\alpha\beta\gamma\delta}^0 + \sum_{i=1}^n r_i^2 f(\alpha, \beta, \gamma, \delta, \sigma_i, \theta_i) + O(r_i^2 r_j^2), \quad (7)$$

gdzie $R_{\alpha\beta\gamma\delta}^0$ jest opornością czteropunktową dla dysku bez dziur

$$R_{\alpha\beta\gamma\delta}^0 = \lambda \ln \left| \frac{\sin \frac{(\gamma-\alpha)}{2} \sin \frac{(\delta-\beta)}{2}}{\sin \frac{(\gamma-\beta)}{2} \sin \frac{(\delta-\alpha)}{2}} \right|, \quad (8)$$

a parametr $\lambda = \rho / (\pi h)$.

5

[0030] Współczynniki rozwinięcia w szereg równania (7) są funkcjami położeń kontaktów i położeń środków dziur. Ich jawna postać wyraża się przez ułamki funkcji trygonometrycznych:

$$10 \quad f(\alpha, \beta, \gamma, \delta, \sigma, \theta) = \lambda \cdot \frac{a_1}{a_2} (a_3 - a_4), \quad (9)$$

gdzie dla przejrzystości wprowadzono oznaczenia a_1, a_2, a_3, a_4 :

$$\begin{aligned} a_1 &= 16 \ln 2 \cdot \sin \frac{\alpha-\beta}{2} \sin \frac{\gamma-\delta}{2}, \\ a_2 &= (1 - 2\sigma \cos(\alpha - \theta) + \sigma^2)(1 - 2\sigma \cos(\beta - \theta) + \sigma^2) \cdot (1 - 2\sigma \cos(\gamma - \theta) + \sigma^2) \cdot (1 - 2\sigma \cos(\delta - \theta) + \sigma^2), \\ 15 \quad a_3 &= 2\sigma(1 + \sigma^2) \left(\cos \frac{\beta-\delta}{2} \cos \frac{\alpha+\gamma-2\theta}{2} + \cos \frac{\alpha-\gamma}{2} \cos \frac{\beta+\delta-2\theta}{2} \right) - \\ &\quad 2\sigma^2 \cos \frac{\alpha+\beta+\gamma+\delta-4\theta}{2} - (1 + \sigma^4) \cos \frac{\alpha+\beta-\gamma-\delta}{2} - 4\sigma^2 \cos \frac{\alpha-\beta}{2} \cos \frac{\gamma-\delta}{2}, \\ a_4 &= 2\sigma^2 \cos \frac{\alpha+\beta+\gamma+\delta-4\theta}{2} + (1 + \sigma^4) \cos \frac{\alpha+\beta-\gamma-\delta}{2} + 4\sigma^2 \cos \frac{\alpha-\beta}{2} \cos \frac{\gamma-\delta}{2}. \end{aligned}$$

[0031] Istotne jest, że w rozwinięciu równania (7) dokładnego wyrażenia równania (6), współczynniki przy czynnikach typu $r_i r_j$ oraz $r_i r_j r_k$ są równe 0. Oznacza to, że rozwinięcie równania (7) jest dokładne do czwartych potęg promieni dziur i zawiera jedynie kwadraty promieni. Ma to znaczenie dla ujawnionej poniżej metody konstrukcji obrazu. Istotą wynalazku jest przybliżenie ciągłego rozkładu impedancji przez jednorodny materiał z odpowiednim rozkładem dziur. Rozwinięcie równania (7) daje rozkład prądów i potencjałów w jednorodnym układzie wielospójnym, czyli takim, w którym występuje wiele dziur. Dla arbitralnie przyjętych położeń dziur oraz położeń kontaktów, równanie (7) zależy tylko od kwadratów promieni dziur. Porównując prawą stronę równania (7) z mierzonymi eksperymentalnie opornościami czteropunktowymi dostajemy układ 20 równań, który jest liniowy w kwadratach promieni. Stosując znaną metodę najmniejszych kwadratów w celu znalezienia najlepszego dopasowania kwadratów promieni do danych eksperymentalnych otrzymujemy układ równań typu

$$x^T A x + b = 0, \quad (10)$$

$$x_i \geq 0,$$

gdzie A jest macierzą dodatnio określoną. Współrzędne x_i są kwadratami promieni dziur r_i , i z tego powodu w układzie równań (10) znajduje się warunek nieujemności współrzędnych x_i . Rozwiązanie takiego zagadnienia jest znane w algebrze jako problem programowania nieliniowego z warunkami Karusha, Kuhna Tuckera, jak opisano w publikacji "Nonlinear programming" (H. W. Kuhn, A. W. Tucker, 1951, Proceedings of 2nd Berkeley Symposium, Berkeley: University of California Press., str. 481–492). Znalezienie w ten sposób promienie dziur oraz ich położenia są przybliżeniem rozkładu impedancji układu.

[0032] Metoda według wynalazku oparta jest na znanej teorii odwzorowań konforemnych i z tego powodu można ją stosować do tworzenia obrazów

- tomograficznych obiektów o dowolnym kształcie. Jest to szczególnie ważne w różnych dziedzinach techniki. Z teorii liczb zespolonych znane są przekształcenia konforemne przeprowadzające koło przykładowo w owal, kwadrat czy prostokąt. W metodzie według wynalazku pozwala to na łatwe zdefiniowanie położeń kontaktów dla badanego kształtu (przykładowo takiego jak owal czy kwadrat) oraz zastosowanie odwzorowania konforemnego do określenia położeń dziur otrzymanych z równania (7). W metodzie według wynalazku nie jest konieczne przeprowadzanie symulacji metodami elementów skończonych w celu dobierania algorytmu obrazowania do układów o określonych kształtach. Algorytm obrazowania według wynalazku nie zależy od badanego kształtu.
- [0033] Na Fig. 2A-2C przedstawione są przykłady położeń kontaktów, zaznaczonych kropkami, odpowiadających różnym kształtom badanych obiektów.
- [0034] Równo rozłożone kontakty na brzegu koła pokazane są na Fig. 2A.
- [0035] Poprzez zastosowanie odwzorowania konforemnego
- $$f(z) = i \cdot \frac{z}{1-(az)^2}, 0 < a < 1, \quad (11)$$
- otrzymujemy położenia kontaktów do badania wnętrza owalu, Fig. 2B.
- [0036] Poprzez zastosowanie odwzorowania konforemnego
- $$f(z) = \frac{1}{a} \cdot F(\arcsin z, -1), a = F\left(\operatorname{arcsinh} \frac{1+i}{\sqrt{2}}, -1\right), \quad (12)$$
- gdzie F jest znaną z analizy matematycznej całką eliptyczną pierwszego rodzaju, otrzymujemy położenia kontaktów do badania wnętrza kwadratu, Fig. 2C.
- [0037] We wszystkich przedstawionych na Fig. 2A-2C przypadkach badanych kształtów, algorytm uzyskiwania obrazu według wynalazku jest taki sam, zmienia się jedynie sposób rozstawienia kontaktów i wizualizacji obrazu poprzez użycie odpowiedniego odwzorowania konforemnego.
- [0038] Dla jednolitości przedstawienia metody należy dodać, że w przypadku badania układów w kształcie koła (Fig. 2A) odwzorowanie konforemne do przeprowadzenia wizualizacji według wynalazku jest odwzorowaniem identycznościowym $f(z)=z$.
- [0039] Metodę według wynalazku można zastosować w obrazowaniu niejednorodności impedancji (elektryczna tomografia impedancyjna). W tym celu własności materiału niejednorodnego przybliża się poprzez własności materiału jednorodnego, w którym znajduje się wiele małych dziur imitujących niejednorodność.
- [0040] Przykład realizacji metody według wynalazku przedstawiono na Fig. 3. Na brzegu badanego obszaru rozłożone są kontakty (1), poprzez które wymusza się przepływ prądu i odczytuje się napięcia poprzez układ przewodów (2), podłączonych do układu akwizycji danych (4). Wewnątrz badanego obszaru pokazano przykład niejednorodności oporności (3). Zadawanie sygnałów prądowych (stałoprądowych lub zmiennoprądowych) i odbiór sygnałów napięciowych odbywa się za pośrednictwem układu akwizycji danych (4), zgodnie z technikami znanymi w dziedzinie techniki tomografii impedancyjnej. Dane są przetwarzane przy użyciu algorytmu według wynalazku w układzie procesora (5) i przesyłane do układu wizualizacji (6), w którym wykorzystywane jest odpowiednie przekształcenie konforemne, dobrane do badanego kształtu.
- [0041] Metodą elementów skończonych wygenerowano dane odpowiadające określonym rozkładom oporności właściwej. Następnie zadawano położenia dziur

i stosując metodę według wynalazku otrzymywano promienie dziur najlepiej pasujące do danych.

5 **[0042]** Położenia dziur zadawano poprzez określenie co najmniej jednego zestawu wielu różnych położeń. Położenia dziur mogą być generowane w sposób losowy, wówczas szczególnie wskazane jest aby przeprowadzić obliczenia dla wielu różnych zestawów.

[0043] Położenia dziur mogą być również określone jako rozmieszczone na równomierniej sieci, przykładowo sieci dziur oddalonych od siebie o równe odległości względem osi x i y płaszczyzny badanego obszaru materiału.

10 **[0044]** W wyniku działania algorytmu według wynalazku dla położeń, w których dane odczytane przez układ akwizycji danych 4 wskazują na występowanie dziury, podawane są względnie duże promienie dziury, natomiast dla położeń, w których dane odczytane przez układ akwizycji danych 4 nie wskazują na występowanie dziury, podawane są względnie małe lub nawet zerowe promienie dziury.

15 **[0045]** Przykładowe rekonstrukcje obrazów poprzez generowanie rozkładów dziur i wizualizację przedstawiono na Fig. 4A-4B i 5A-5B. Fig. 4A przedstawia przykładowy materiał z dwoma dziurami, a Fig. 4B przedstawia rekonstrukcję obrazu uzyskaną sposobem według wynalazku (w tym wypadku w obszar dwóch dużych dziur został zrekonstruowany jako obszar, w którym występuje wiele gęsto rozłożonych małych dziur). Fig. 5A przedstawia przykładowy materiał ze skokowym, dwukrotnym wzrost oporności, a Fig. 5B przedstawia rekonstrukcję obrazu uzyskaną sposobem według wynalazku (w tym wypadku zrekonstruowany obraz wykazuje dużo niewielkich dziur, gęsto i równomiernie rozłożonych w obszarze skokowej zmiany oporności).

25 **[0046]** Zaletą metody według wynalazku jest jej niewielki poziom skomplikowania matematycznego, co pozwala na tworzenie szybkich algorytmów. Tworzenie obrazu odbywa się bez udziału operatorów działających w przestrzeni nieskończonej wielowymiarowej. Pozwala to na wygodne implementowanie algorytmów według wynalazku do szybkich procesorów.

30 **[0047]** Zaletą metody według wynalazku jest to, że można zastosować algorytm wielokrotnie, z różnymi sieciami rozkładu promieni dziur, a z otrzymanych wyników tworzyć rozkłady wielkości dziur. W ten sposób można zwiększać dokładność rozkładu kosztem zwiększania liczby obliczeń.

35 **[0048]** Zaletą metody według wynalazku jest również to, że oparta jest na nowych założeniach teoretycznych nie ujawnionych do tej pory. W pracy „Impedance Imaging, Inverse Problems, and Harry Potter's Cloak” (K. Bryan and T. Leise, Society for Industrial and Applied Mathematics Vol. 52, No. 2, str. 359–377) pokazano techniki maskowania przedmiotów tak, żeby stały się niewidoczne przy badaniu techniką tomografii impedancyjnej. Ta praca wskazuje na to, że technika tomografii impedancyjnej nie jest jednoznaczna, tzn. że można przedmiot lub niejednorodność „zamaskować”, czyli tak zmodyfikować otoczenie, by całość była postrzegana tak jakby przedmiotu (niejednorodności) nie było. Z powodu możliwych niejednoznaczności, proponowana nowa metoda według wynalazku pozwala na wskazanie jej korzystnej cechy, a mianowicie nowy algorytm oparty na
45 innych niż dotychczas stosowane założeniach, daje szansę wykrywania maskowanych przedmiotów, albo też czyni metody maskowania trudniejszymi.

Zastrzeżenia

1. Sposób rekonstrukcji obrazu w elektrycznej tomografii impedancyjnej do wyznaczania niejednorodności materiału, w którym to sposobie:
- 5 - na brzegu badanego obszaru materiału rozmieszcza się kontakty (1);
 - poprzez które wymusza się przepływ prądu;
 - i odczytuje się z nich napięcia poprzez układ przewodów (2) podłączonych pomiędzy kontaktami a układem akwizycji danych (4);
- znamienny tym, że
- 10 - określa się odwzorowanie konforemne (f) reprezentujące przekształcenie dysku do kształtu badanego obszaru;
 - umieszcza się kontakty na brzegu badanego obszaru w położeniach wyznaczonych przez działanie przekształcenia (f) na położenia równoodległe
 - zadaje się wiele położzeń dziur w badanym obszarze;
 - 15 - używając procesora (5) oraz układu akwizycji danych (4) odczytuje się się na kontaktach (1) prądy i napięcia tak, że
 - wybiera się cztery kontakty w pozycjach ($\alpha, \beta, \gamma, \delta$) i wyznacza oporności czteropunktową ($R_{\alpha\beta\gamma\delta} = V_{\gamma\delta} / j_{\alpha\beta}$),
 - wyznacza się promienie dziur w zadanych położeniach na podstawie
 - 20 - najlepszego dopasowania promieni dziur otrzymanych oporności czteropunktowych
 - i obrazuje się wyznaczone promienie dziur za pomocą układu wizualizacji (6), poprzez transformację położzeń i promieni dziur do badanego obszaru przy użyciu odwzorowania konforemnego (f).
- 25
2. Sposób według zastrz. 1 znamienny tym, że wyznacza się promienie dziur dla co najmniej dwóch zestawów losowo zadanych położzeń.
3. Sposób według zastrz. 1 znamienny tym, że wyznacza się promienie dziur
- 30 dla zadanych położzeń rozmieszczonych w regularnej sieci.

ODNOŚNIKI CYTOWANE W OPISIE

Niniejsza lista odnośników cytowanych przez zgłaszającego podana jest tylko dla wygody czytelnika. Nie stanowi ona części europejskiego dokumentu patentowego.

- Nawet mimo dużej staranności przy zestawieniu odnośników nie można wykluczyć
- 5 błędów lub przeoczeń i Europejski Urząd Patentowy zrzeka się wszelkiej odpowiedzialności w tym zakresie.

Dokumenty patentowe cytowane w opisie

- US 4617939 A [0008]
- US 5465730 A [0009]
- EP 0599877 B1 [0011]

Literatura niepatentowa cytowana w opisie

- **ANDREAS KIRSCH**. An Introduction to the Mathematical Theory of Inverse Problems. Springer Science+Business Media, LLC, 2011, 167 [0005]
- **ARMIN LECHLEITER**. A regularization technique for the factorization method. *Inverse Problems*, 2006, vol. 22, 1605-1625 [0007]
- **D. C. BARBER ; B. H. BROWN**. Applied potential tomography. *J. Br. Interplanet. Soc.*, 1989, vol. 42 (7), 391-393 [0008]
- **T. J. YORKEY ; J. G. WEBSTER ; W. J. TOMPKINS**. Comparing Reconstruction Algorithms for Electrical Impedance Tomography. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 1987, vol. BME-34 (11), 843-852 [0009]
- **E. J. WOO ; P. HUA ; W. J. TOMPKINS ; J. G. WEBSTER**. A finite element model with node renumbering for adaptive impedance imaging. *Proc. IEEE EMBC*, 1988, vol. 1, 277-278 [0010]
- **B. M. EYİBOĞLU**. An interleaved drive electrical impedance tomography image reconstruction algorithm. *Physiol. Meas.*, 1996, vol. 17 (A), 59-71 [0011]
- **N KERROUCHE ; CN MCLEOD ; W.R.B. LION-HEART**. Time series of EIT chest images using singular value decomposition and Fourier transform. *Physiol Meas.*, February 2001, vol. 22 (1), 147-57 [0011]
- **J. KAIPIO ; V. KOLEHMAINEN ; E. SOMERSALO ; M. VAUHKONEN**. Statistical inversion and Monte Carlo sampling methods in EIT. *Inverse problems*, 2000, vol. 16, 1487-1522 [0012]
- **K. R. SZYMANSKI ; C. J WALCZYK ; J. L. CIESLINSKI**. Determination of topological properties of thin samples by the van der Pauw method. *Measurement" international journal*, 28 April 2018 [0013]
- **SUN ZHENG-HANG et al.** Two-dimensional electrostatic model for the Van der Pauw method. *Physics Letters A*, vol. 381 (27), ISSN 0374-9601, 2144-2148 [0014]
- **L. V. AHLFORS**. Complex Analysis. McGraw-Hill, 1979 [0021]
- **R. FEYNMAN ; R. LEIGHTON ; M. SANDS**. The Feynman Lectures on Physics. Addison-Wesley-Longman, 1970, vol. 2 [0023]
- Nonlinear programming. **H. W. KUHN ; A. W. TUCKER**. Proceedings of 2nd Berkeley Symposium. University of California Press, 1951, 481-492 [0031]
- **K. BRYAN ; T. LEISE**. Impedance Imaging, Inverse Problems, and Harry Potter's Cloak. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, vol. 52 (2), 359-377 [0048]

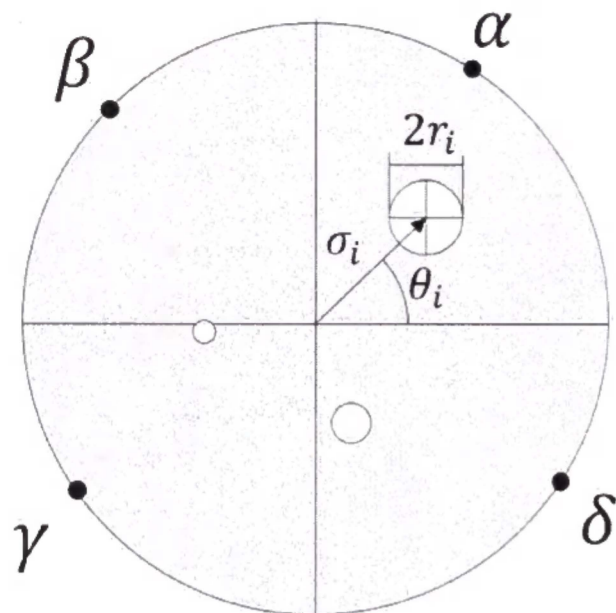


Fig. 1

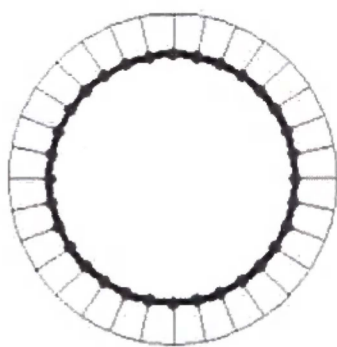


Fig. 2A

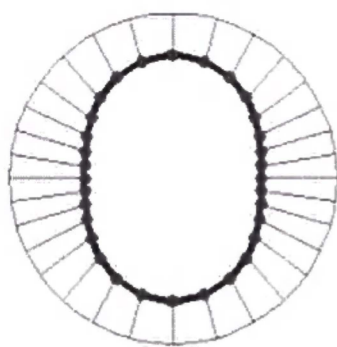


Fig. 2B

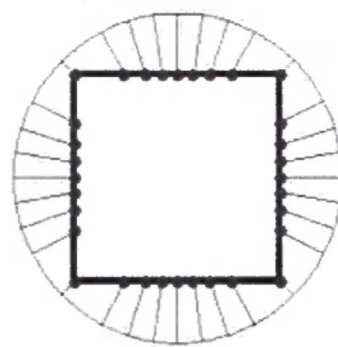


Fig. 2C

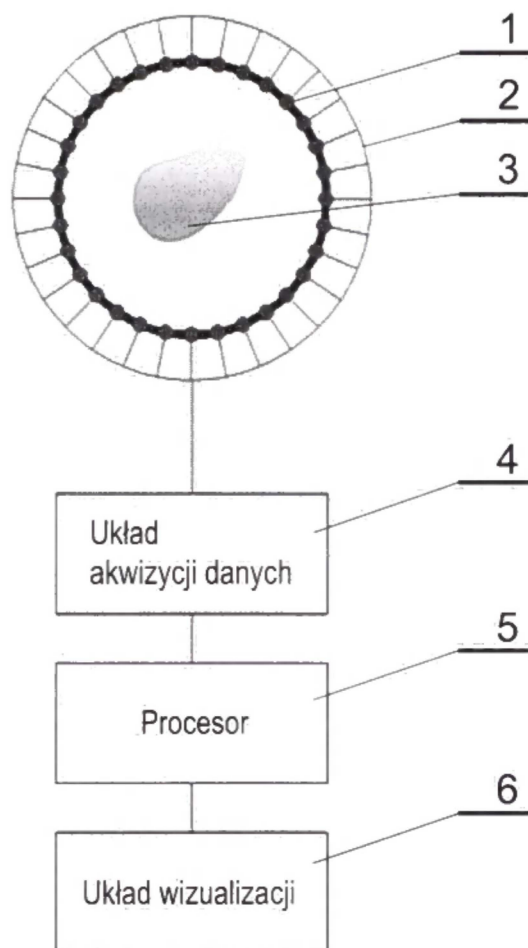


Fig. 3

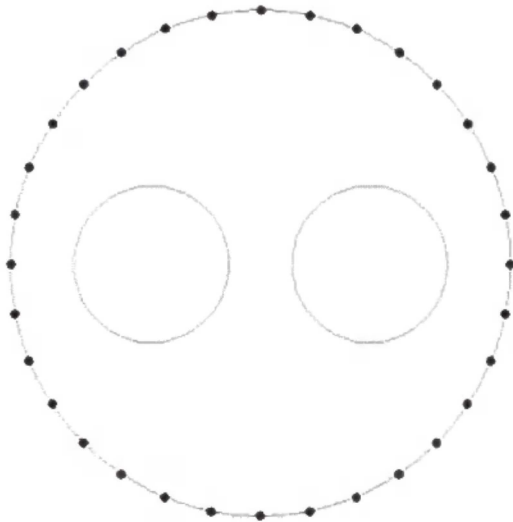


Fig. 4A

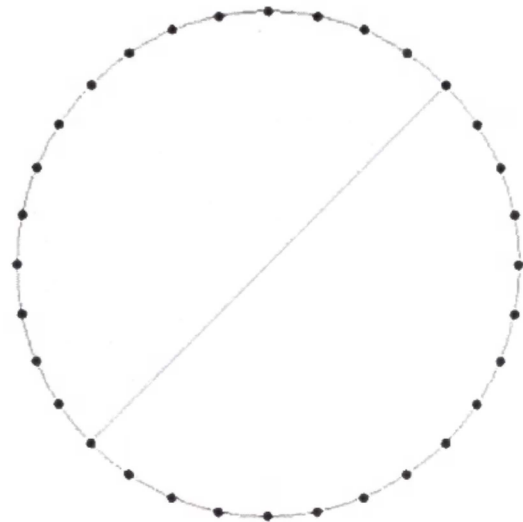


Fig. 5A

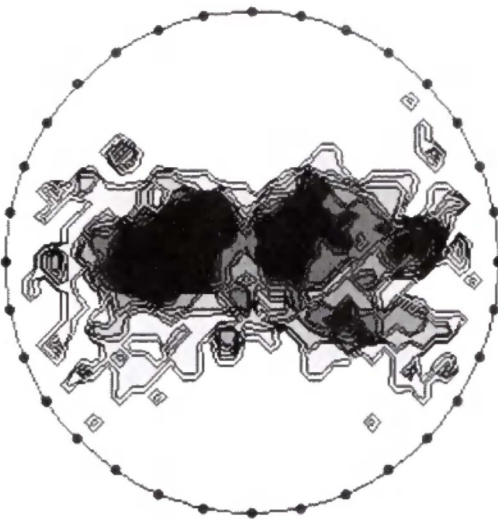


Fig. 4B

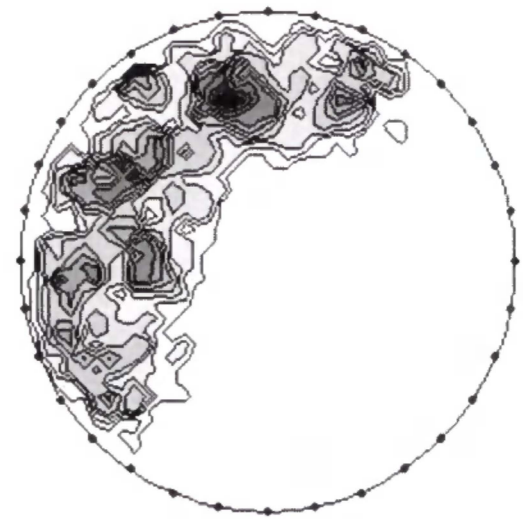


Fig. 5B