

Janusz GUZIK
Politechnika Śląska

O PEWNEJ KONCEPCJI ADAPTACJI METOD ELEKTRYCZNEJ TOMOGRAFII IMPEDANCYJNEJ DO DIAGNOSTYKI STANU IZOLACJI

Streszczenie. W artykule przedstawiono wprowadzenie do metod analizy rozkładu impedancji w niedostępnym wnętrzu badanego obiektu, znanych w literaturze [1] pod nazwą metod elektrycznej tomografii impedancyjnej. Przedstawiono ocenę możliwości adaptacji tych metod do nieinwazyjnego monitoringu stanu izolacji badanego obiektu.

ON CERTAIN ADAPTATION IDEA OF ELECTRIC IMPEDANCE TOMOGRAPHY METHODS TO DIAGNOSTICS OF ELECTRIC INSULATION CONDITION

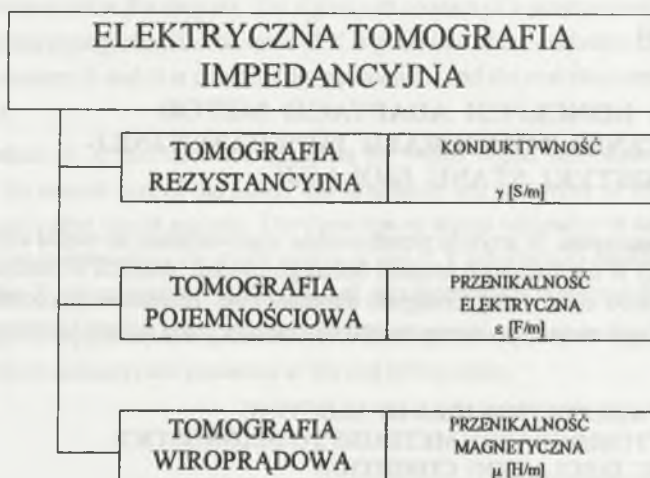
Summary. Introduction to analysis methods of impedance distribution inside inaccessible interior of the examined object, reported in the literature [1] as electric impedance tomography methods, has been presented in the paper. Evaluation of adaptation possibilities of these methods to non-invasive on-line monitoring of electric insulation condition of the examined object has been presented, as well.

1. WSTĘP

Zadaniem elektrycznej tomografii impedancyjnej jest konstrukcja obrazu niosącego informację o niedostępnym wnętrzu badanego obiektu [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8]. Obraz ten jest w istocie rozkładem gęstości wielkości, reprezentujących rozpatrywane właściwości fizyczne obiektu. Ponieważ w elektrycznej tomografii impedancyjnej nośnikiem informacji jest prąd elektryczny, to wielkościami charakteryzującymi obiekt mogą być: konduktywność γ , przenikalność elektryczna ϵ lub przenikalność magnetyczna μ . Wynika stąd następująca klasyfikacja elektrycznej tomografii impedancyjnej, jak na rys. 1.

Cechą charakterystyczną tomografii rezystancyjnej — historycznie najstarszej (1979 r.) [2] — jest zasilanie stałoprądowe. Układy tomografów rezystancyjnych znalazły głównie zastosowanie w medycynie [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8] jako alternatywna (w stosunku do klasycznej tomografii rentgenowskiej, magnetycznego rezonansu jądrowego) metoda badania zmian wybranych tkanek narządów.

Tomografia pojemnościowa [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15] znalazła z kolei zastosowanie jako metoda monitoringu przepływów cieczy w rurociągach przemysłowych, w szczególności dla przepływów dwufazowych [13], [14], [15].



Rys. 1. Klasyfikacja elektrycznej tomografii impedancyjnej z punktu widzenia nośnika informacji o stanie diagnozowanego obiektu

Fig. 1. Classification of electric impedance tomography from the point of view of the information carrier on condition the the examined object

W ostatnich latach w literaturze przedmiotu pojawiły się prace [16], [17], [18], [19], [20] poświęcone nowej dziedzinie tomografii, a mianowicie tomografii prądów wirowych, w której analizuje się zmiany impedancji cewki wytwarzającej prądy wirowe, przy czym zmiany impedancji cewki są ściśle zależne od przenikalności magnetycznej μ sprzęgniętego z cewką elementu metalowego. Z uwagi jednak na przyszły obszar zastosowań (diagnostyka stanu izolacji) tomografia prądów wirowych nie będzie w dalszym ciągu brana pod uwagę.

2. ELEKTRYCZNA TOMOGRAFIA IMPEDANCYJNA

Idea elektrycznej tomografii impedancyjnej jest następująca: Do elektrod zasilających a , b w sposób jak na rys.2 doprowadzony jest prąd stały lub zmienny, natomiast do pozostałych elektrod podłączany jest woltomierz V . Następnie prąd I doprowadzany jest do sąsiednich elektrod i procedura pomiaru napięć ulega powtórzeniu. Po wypełnieniu wszystkich kombinacji

połączeń ostatecznie na podstawie znajomości zbioru zmierzonych napięć można na drodze obliczeniowej [2], [3], [4], [5] dokonać oceny rozkładu impedancji ξ wewnątrz obszaru Ω .



Rys.2. Idea elektrycznej tomografii impedancyjnej: I — prąd zasilający, a, b — elektrody zasilające, ••• — elektrody pomiarowe

Fig.2. Idea of electric impedance tomography: I — supplying current, a, b — supplying electrodes, ••• — measuring electrodes

Przy rekonstrukcji obrazu rozkładu impedancji ξ wewnątrz obszaru Ω należy zatem rozwiązać równanie

$$V = f(\xi), \quad (1)$$

gdzie: V — rozkład potencjału na brzegu obszaru Ω ,

ξ — rzeczywisty rozkład impedancji wewnątrz obszaru Ω .

Wewnątrz obszaru Ω spełnione jest równanie Laplace'a dla potencjału V:

$$\nabla^2 V = 0, \quad (1a)$$

natomiast na brzegu Γ obszaru Ω dany jest rozkład potencjału:

$$V|_{\Gamma} = V(x, y, z), \quad (1b)$$

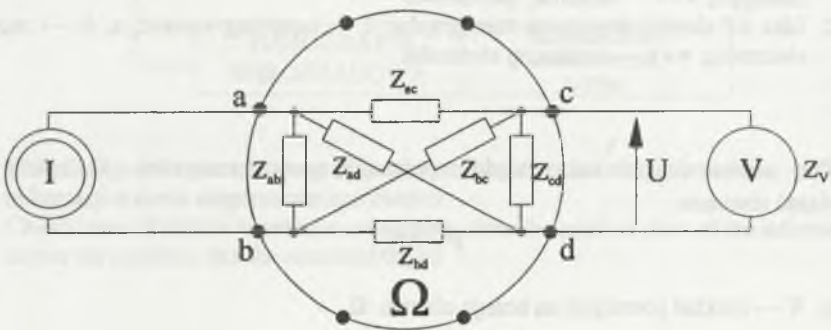
gdzie: x, y, z — współrzędne punktu o potencjale V.

Należy zatem dokonać oceny rozkładu potencjału wewnątrz obszaru Ω , a następnie w oparciu o ten rozkład wyznaczyć rozkłady: konduktywności $\gamma = \gamma(x, y, z)$, przenikalności elektrycznej $\epsilon = \epsilon(x, y, z)$ lub przenikalności magnetycznej $\mu = \mu(x, y, z)$. Tak zdefiniowane zagadnienie jest tzw. problemem odwrotnym (źle uwarunkowanym), na którego temat istnieje dość bogata literatura dotycząca odpowiednich algorytmów numerycznych (np. [1], [2], [3], [4]) potrzebnych do utworzenia obrazu rozkładu impedancji ξ . Wadą algorytmów rekonstrukcji obrazów rozkładu

impedancji jest konieczność dokonywania dużej liczby iteracji celem uzyskania obrazu o odpowiedniej rozdzielczości [3], co pociąga za sobą duży czas oczekiwania na wynik pomiaru. Narzuca to konieczność odpowiedniej optymalizacji algorytmu rekonstrukcji obrazu rozkładu impedancji w przypadku adaptacji metod tomografii impedancyjnej do diagnostyki stanu izolacji badanego obiektu.

3. ADAPTACJA METOD TOMOGRAFII IMPEDANCYJNEJ DO BADAŃ STANU IZOLACJI

Z elektrycznego punktu widzenia w elektrycznej tomografii impedancyjnej wyznaczone są wartości impedancji pomiędzy odpowiednimi parami elektrod. Odpowiedni schemat zastępczy przedstawiono na rys.3.



Rys.3. Schemat zastępczy rozkładu impedancji ξ wewnątrz obszaru Ω dla pary elektrod zasilających (a, b) i pomiarowych (c, d)

Fig.3. Equivalent schematic diagram of impedance distribution ξ inside the object interior Ω for a pair of supplying (a,b) and measuring (c,d) electrodes

Widać stąd, że dla pary elektrod zasilających (a, b) i pomiarowych (c, d) występuje aż 6 impedancji koniecznych do identyfikacji, przy czym ogólnie dla N elektrod liczba wszystkich impedancji jest równa

$$\frac{N \cdot (N - 1)}{2}$$

W dalszym ciągu możliwości zastosowania metod elektrycznej tomografii impedancyjnej w diagnostyce stanu izolacji ocenia się przez sprawdzenie:

- a) rodzaju zasilania (źródło stałoprądowe lub zmiennoprądowe),
- b) sposobu zasilania (wymuszenie prądowe lub napięciowe),
- c) sposobu rozmieszczenia elektrod pomiarowych.

Ad a) Mając na uwadze ciągły (on-line) monitoring stanu izolacji obiektu, należy w pierwszym rzędzie rozpatrzyć zasilanie zmiennoprądowe o częstotliwości sieciowej 50 Hz, pozostawiając opcję zasilania stałoprądowego do badań rozkładu rezystancji (konduktywności γ) podczas wyłączenia badanego obiektu z ruchu, np. przy pomiarach na stacji prób.

Ad b) Cechą charakterystyczną występującą przy badaniach izolacji są wartości rezystancji rzędu $M\Omega$ i pojemności rzędu nF, co niejako automatycznie narzuca napięciowy charakter wymuszenia sygnału (przyłożonego do elektrod zasilających (a, b) wg rys.1). Wówczas zamiast pomiarów spadków napięć V (znanych z niedomiarem wskutek bocznikującego działania impedancji Z_r woltomierza — por. rys. 3) należy dokonać pomiaru prądów płynących od danych elektrod pomiarowych do elektrody odniesienia (najczęściej o potencjale równym zero).

Ad c) Elektrody pomiarowe powinny być rozmieszczone symetrycznie na brzegu Γ obiektu Ω (por. rys.1), przy czym w sytuacji gdy analizowany jest przestrzenny, trójwymiarowy rozkład impedancji ξ — elektrody mogą być rozmieszczone w równych odstępach na jednej lub na kilku wysokościach (np. kadzi transformatora [12]).

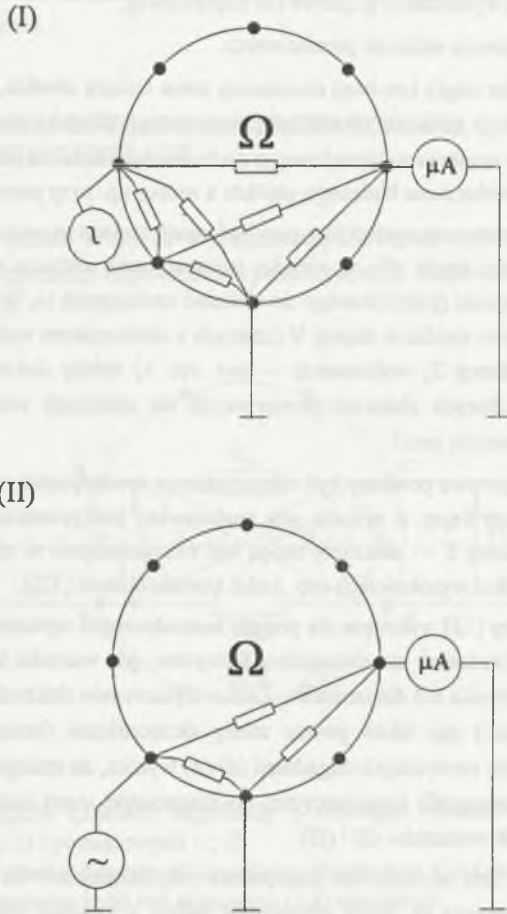
Odpowiednie analizy [13] wykonane dla potrzeb biomedycznych wykazały, że rozmieszczenie elektrod na kilku wysokościach jest szczególnie korzystne, gdy wartości impedancji są bardziej typowe dla (pół)przewodnika niż dla izolatora. Zatem usytuowanie elektrod na jednej wysokości (w równych odstępach) ma także pewne zalety ekonomiczne (mniejsza liczba elektrod pomiarowych). Z analizy powyższych zagadnień (a)-(c) wynika, że istnieje możliwość adaptacji metod elektrycznej tomografii impedancyjnej do diagnostyki stanu izolacji pod warunkiem przyjęcia następujących wariantów (I) i (II):

- (I) — w wariantcie tym wymuszenie napięciowe jest przyłożone do sąsiednich elektrod, natomiast mierzone są prądy płynące do jednej z elektrod odniesienia (0). Liczba zebranych danych pomiarowych wynosi tutaj $N(N-2)$.
- (II) — w wariantcie tym wymuszenie napięciowe jest przyłożone pomiędzy daną elektrodą a elektrodą odniesienia (0), względem której mierzone są odpowiednie prądy. Liczba zebranych danych pomiarowych wynosi tutaj $(N-1)(N-2)$.

W obydwu powyższych wariantach (I) i (II) liczba zebranych danych pomiarowych występuje z nadmiarem, ponieważ zachodzi:

$$N \cdot (N - 2) > \frac{N \cdot (N - 1)}{2} \quad i \quad (N - 1) \cdot (N - 2) > \frac{N \cdot (N - 1)}{2}.$$

Odpowiednie schematy zastępcze (np. rozkładu admityncji ξ) wewnątrz obszaru Ω dla przyjętych wariantów (I) i (II) przedstawiono na rys. 4.



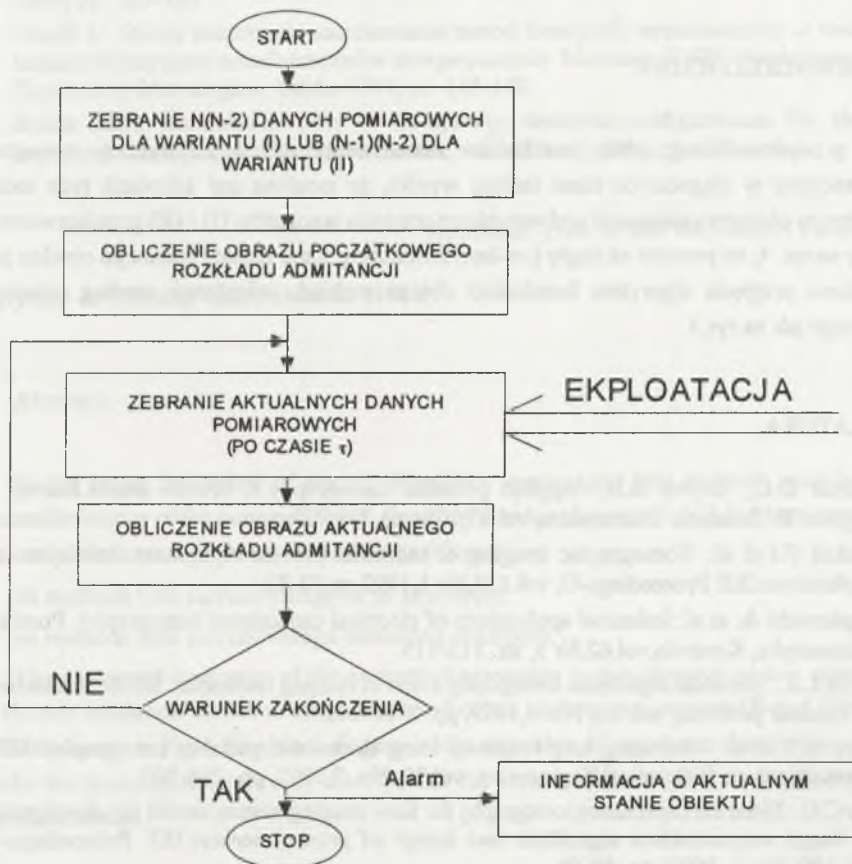
Rys. 4. Schematy zastępcze rozkładu admityncji ξ wewnątrz obszaru Ω dla przyjętych wariantów (I) i (II)

Fig. 4. Equivalent schematic diagram of impedance distribution ξ inside the interior Ω for the assumed variants (I) and (II)

4. KONCEPCJA ALGORYTMU KONSTRUKCJI OBRAZU ROZKŁADU ξ ADMITANCJI

Algorytm konstrukcji obrazu jest następujący:

- na stacji prób uzyskuje się zbiór $N(N-2)$ lub $(N-1)(N-2)$ (odpowiednio dla przyjętego wariantu (I) lub (II)) danych pomiarowych, na podstawie których w oparciu o algorytmy iteracyjne (np. [1], [2], [3], [4], [6]) otrzymuje się początkowy rozkład admitancji ξ wewnątrz obszaru Ω diagnozowanego obiektu,



Rys.5. Schemat blokowy algorytmu konstrukcji obrazu rozkładu admitancji ξ wewnątrz obszaru Ω dla przyjętych wariantów (I) i (II)

Fig.5. Block diagram of the algorithm of admittance image structure ξ inside the interior Ω for the assumed variants (I) and (II)

- w trakcie eksploatacji obiektu dokonuje się pomiaru niektórych prądów (płynących pomiędzy daną elektrodą a elektrodą odniesienia dla obydwu wariantów (I) i (II) według rys.4), na podstawie których i znajomości przechowywanego w pamięci komputera początkowego rozkładu admitancji - na bieżąco jest aktualizowany odpowiedni rozkład admitancji, będący funkcją stanu izolacji badanego obiektu.

Jeśli różnice pomiędzy początkowym a bieżącym rozkładem admitancji dla przyjętych wariantów są zbyt duże, to oznacza to, że nastąpiło pogorszenie stanu izolacji badanego obiektu. Odpowiedni schemat blokowy algorytmu konstrukcji obrazu rozkładu admitancji przedstawiono na rys.5.

5. UWAGI KOŃCOWE

Z przeprowadzonej oceny możliwości zastosowania metod elektrycznej tomografii impedancyjnej w diagnostyce stanu izolacji wynika, że możliwa jest adaptacja tych metod w wybranym obszarze zastosowań pod warunkiem przyjęcia wariantów (I) i (II) przedstawionych w pracy na rys. 4, co pozwala na ciągły (on-line) monitoring stanu izolacji badanego obiektu pod warunkiem przyjęcia algorytmu konstrukcji obrazu rozkładu admitancji według schematu blokowego jak na rys.5.

LITERATURA

1. Barber D.C., Brown B.H.: Applied potential tomography: A review article. *Journal of Physics: E: Scientific Instruments*, vol.17, 1984, pp.723-732.
2. Dickin F.J. et al.: Tomographic imaging of industrial process equipment: techniques and applications. *IEE Proceedings-G*, vol.139, No.1, 1992, pp.72-82.
3. Płaskowski A. et al.: Industrial applications of electrical capacitance tomography. *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, vol.62, Nr 5, str. 113-115.
4. Pryce L.R.: Electrical impedance tomography: a new CT imaging technique. *IEEE Transactions on Nuclear Sciences*, vol. 26, No. 6, 1979, pp. 2736-2739.
5. Woo E.J. et al.: Measuring lung resistivity using electrical impedance tomography. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol.39, No. 7, 1992, pp. 756-760.
6. Xie C.G.: Electrical capacitance tomography for flow imaging: system model for development of image reconstruction algorithms and design of primary sensors. *IEE Proceedings-G*, vol. 139, No. 1. 1992, pp. 89-98.
7. Andruszkiewicz A., Zator S.: Tomografia procesowa w pomiarach przepływów, *ZN WSI Opole, Elektryka*, z. 37, 1993, str. 7-10.

8. Gajewski J.B.: Elektrostatyczna, bezkontaktowa metoda ciągłego pomiaru średniej masy i średniej prędkości w przepływach dwufazowych gaz-ciało stałe. Prace Naukowe Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej nr 49, Monografie nr 26, Wrocław 1995.
9. Kamińska A. i in.: Tomografia wiroprądowa w obszarach o brzegu otwartym. Materiały XX Seminarium z „Podstaw elektrotechniki i teorii obwodów”, 1997, str. 105-108.
10. Sikora R. i in.: Nieniszczące elektromagnetyczne badania w technice i biologii. Materiały Konferencji pt. "Podstawy fizyczne badań nieniszczących", Politechnika Śląska, Gliwice 1995, str. 139-148.
11. Fulton W.S., Lipczyński R.T.: Optimising the time to solution in electrical impedance tomography. IEE Proceedings in Science and Measurement Technology, vol. 142, No. 6, 1995, pp. 433-441.
12. Guzik J.: Ocena możliwości zastosowania metod tomografii impedancyjnej w badaniach izolacji elektrycznej transformatorów energetycznych. Materiały XXIX Międzyuczelnianej Konferencji Metrologów, Lublin 1997, str. 165-170.
13. Booth M.J., Basarab-Horwarh I.: Comparing electrode configurations for electrical impedance tomography. Electronics Letters, vol.32, No.7, 1996, pp. 648-649.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Danuta Turzeniecka

Wpłynęło do Redakcji dnia 2 kwietnia 1998 r.

Abstract

In the paper the review of electric impedance tomography (eit) methods describing the inaccessible interior of the examined object (based on the idea shown in Fig.1) has been presented. General classification of the eit methods is as follows:

- eit methods with current/voltage dc or ac sources,
- eit methods with current/voltage measuring electrodes.

The suggested evaluation of the eit method adaptation to non-invasive on-line monitoring of electric insulation condition of the examined object leads to two variants (I) and (II) of the methods shown in Fig.4. The block diagram of the algorithm of impedance distribution image ξ inside the inaccessible interior of the object Ω for variants (I) and (II) (see Fig.5) has been described as well.