

Dr. inż. Andrzej Płaskowski
Prof. Maurice s. Beck
UMIST, UK
Mgr Malcolm Byars
Process Tomography Ltd, UK
Mgr. Witold Płaskowski

TOMOGRAFIA PROCESOWA: ZASTOSOWANIA DO WIZUALIZACJI, PROJEKTOWANIA I STEROWANIA PROCESAMI WIELOFAZOWYMI

Streszczenie: W referacie przedstawimy ogólne zasady tomografii procesowej. Zostanie omówiony obecny rozwój projektowania czujników, elektroniki oraz rekonstrukcji obrazów. Podano kilka przykładów zastosowań.

Abstract: In this paper the general principles of capacitance tomography are explained. Recent developments in the design of primary sensor, the sensor electronic and the reconstruction are shown. Industrial and research applications are given.

I. Wprowadzenie

W ostatnich latach przemysł chemiczny podniósł swój standard i stawia coraz większe wymagania w zakresie bezpieczeństwa, ekologii, oszczędności energii, zabezpieczenia jakości. Stawia też coraz wyższe wymagania urządzeniom kontrolnym, pomiarowym i automatyki. Wzrosło więc zainteresowanie zastosowaniem tomografii procesowej, wywodzącej się z tomografii medycznej. Początkowo stosowano promienie gamma i X, następnie próbowano stosować tomografię optyczną jak np. holograficzne interferometry. Nowy trend zapoczątkowały prace nad wykorzystaniem elektrycznych metod pomiarowych w pracach badawczych i w przemyśle. Technika ta opiera się na wykorzystaniu własności elektrycznych poszczególnych komponentów znajdujących się w przestrzeni pomiarowej.

Wśród metod elektrycznych tomografia pojemnościowa (wykorzystująca zmiany pojemności elektrycznej) jest najbardziej rozwinięta.

Wykorzystanie tomografii pojemnościowej w pracach badawczych umożliwiło uzyskiwanie trójwymiarowej informacji o procesie, którego obraz chcemy otrzymać. Ta nowa i bardzo ścisła wiedza pozwala usprawnić projektowanie procesów oraz aparaturę procesową. Również (w fazie badań) zastosowanie korelacji umożliwia pomiar przepływu wielofazowego i uzyskanie informacji o rozkładzie przestrzennym prędkości. W efekcie ta nowa technika umożliwia rozwój nowych technologii, nowych złożonych reaktorów chemicznych i urządzeń operacyjnych.

Zastosowanie tomografii procesowej w przemyśle umożliwi dokładniejszy monitoring procesów jak również projektowanie bardziej złożonych systemów i urządzeń automatyki i pomiarów. Otwiera to nowe możliwości do uzyskania produktu wyższej jakości oraz podniesienia bezpieczeństwa operacji.

W dalszej części będą podane podstawy tomografii procesowej, jak również obecny rozwój techniki projektowania w zakresie czujników, elektroniki i techniki rekonstrukcji obrazów.

2. Ogólne podstawy tomografii procesowej

Na ogół w systemach tomografii procesowej aktualne wartości pomiarów mają charakter wartości scałkowanej, związanej z rozkładem własności elektrycznych a tym samym z rozkładem gęstości w przestrzeni komponentów znajdujących się między dwoma elektrodami. Na rys.1 pokazano nadajnik S generujący sygnał, który otrzymywany jest przez odbiornik R. Aby uzyskać dostateczne informacje o gęstości komponentu w punkcie (x,y) za pomocą scałkowanych pomiarów niezbędna jest pewna ilość niezależnych pomiarów liniowych. Ponieważ w pomiarach zawarta jest informacja o właściwości g(x,y) przy zastosowaniu techniki rekonstrukcji obrazu można uzyskać obraz rozkładu własności. Wygenerowanie zbioru niezależnych pomiarów liniowych jest możliwe przez umieszczenie wielu nadajników i odbiorników wokół objętości, w której chcemy znać rozkład własności fizycznych. Jednym z kryteriów doboru czujników jest możliwość uzyskania scałkowanego wyniku pomiaru wzdłuż linii prostej. W przypadku tomografii liniowej, która nas interesuje (rys.1) znana jest ścieżka (lub obszar) pomiaru, wzdłuż której następuje całkowanie rozkładu własności co wyraża się zależnością

$$\phi_M = \int_L g(x,y) dL \quad (1)$$

Tak więc wartość pomiaru całkowego jest związana ze znajomością ścieżki. To redukuje problem rekonstrukcji obrazu ponieważ nie występuje rozkład poza ścieżką (lub wiązką) pomiarową, oraz linearyzacja problemu forward w procesie rekonstrukcji (uzyskania bezpośrednio wyliczenia z wartości scałkowanych przy danym rozkładzie własności) jest możliwa.

Na rys.2 przedstawiono schemat układu pomiarowego tomografii procesowej. Składa się on z czujników pierwotnych, układu elektroniki mierzącego wartości pojemności oraz komputera do rekonstrukcji obrazu. Czujniki, na ogół złożone z elektrod zamontowanych na zewnątrz, są wykonane z folii miedzianej w obudowie zapewniającej stabilność mechaniczną i spełniająca rolę ekranu zabezpieczającego przed wpływem zewnętrznych zakłóceń elektrycznych. Układ elektroniczny zapewnia wybieranie sekwencyjne odpowiednich par elektrod, przesyłanie do układu pomiarowego sygnałów, które przetwarzane są w efekcie na wielkość pojemności mierzonej między wybranymi elektrodami. Zbiór uzyskanych pomiarów pojemności między możliwymi parami elektrod przesyłany jest do komputera, w którym dokonuje się rekonstrukcji obrazu. Otrzymany obraz przedstawia rozkład stałych dielektrycznych charakteryzujących dany komponent, czyli otrzymuje się obraz rozkładu gęstości komponentów w objętości zawartej między wszystkimi elektrodami czyli w płaszczyźnie przekroju instalacji np. w płaszczyźnie poprzecznej rurociągu.

Tak więc w tomografii pojemnościowej wykorzystuje się fakt, że pojemność między dwoma elektrodami jest funkcją stałych dielektrycznych komponentów w mierzonej objętości i oczywiście jest obrazem rozkładu gęstości tych komponentów. Zależności między stałymi dielektrycznymi, rozkładem przestrzennym występujących stałych dielektrycznych oraz wynikowa pojemność powiązane są równaniami Maxwella. Rozkład stałej dielektrycznej D jest związany z rozkładem przestrzennym ładunku $\rho(x,y)$ według równania Poissona

$$\text{div}(\mathbf{D}) = \rho(x,y) \quad (2)$$

Tak więc brak ładunku wyraża się przez $\rho(x,y) = 0$. Gęstość pola elektrycznego E jest zdefiniowana przez

$$D = \varepsilon(x,y)E \quad (3)$$

gdzie $\varepsilon(x,y)$ jest przestrzennym rozkładem stałych dielektrycznych. Rozkład potencjału elektrycznego $\varphi(x,y)$ zdefiniowany jest przez

$$E = -\text{grad}(\varphi(x,y)) \quad (4)$$

Wprowadzając równanie (3) i (4) do równania (2) otrzymujemy

$$\text{div}(-\varepsilon(x,y)\text{grad}(\varphi(x,y))) = 0 \quad (5)$$

lub po przekształceniu

$$\nabla^2 \varphi(x,y) + \frac{1}{\varepsilon(x,y)} \text{grad}(\varphi(x,y))\text{grad}(\varepsilon(x,y)) = 0 \quad (6)$$

Równanie 6 jest uproszczonym równaniem pola Laplace'a gdzie stała dielektryczna w objętości jest stała i wtedy

$$\text{grad}(\varepsilon(x,y)) = 0 \Rightarrow \nabla^2(\varphi(x,y)) = 0 \quad (7)$$

Pojemność C może być więc wyznaczona przez

$$C = \frac{Q}{\varphi_2 - \varphi_1} = \frac{\iint_A \varepsilon(x,y) E dA}{\varphi_2 - \varphi_1} = \frac{\iint_A \varepsilon(x,y) \text{grad}(\varphi(x,y)) dA}{\varphi_2 - \varphi_1} \quad (8)$$

gdzie $\varphi_2 - \varphi_1$ jest różnicą potencjałów między elektrodami sterującą a pomiarową natomiast A bezpośrednią powierzchnią całkowania elektrody pomiarowej.

Z równ. 6 wynika jasno, że rozkład potencjału i rozkład stałych dielektrycznych jest zależnością nieliniową. Niemożliwe jest obliczenie pola elektrycznego (równ.4) bez znajomości rozkładu przenikalności dielektrycznych.

Elektrody, które zostały wykorzystane do pomiaru umieszczone są na zewnątrz wokół objętości pomiarowej. Przyjmując, że jedna elektroda jest nadajnikiem a druga odbiornikiem obie elektrody są wykorzystane do wytworzenia pola elektrycznego, które jest zakłócone przez rozkład przenikalności dielektrycznej wewnątrz objętości zawartej między elektrodami. W praktyce, zależnie od przyrządu pomiarowego pojemności, mówi się o elektrodzie sterowanej i pomiarowej. Wygenerowanie wielu niezależnych pomiarów liniowych jest uzyskiwane przez sekwencyjne pomiary pojemności między dwoma elektrodami (rys.3). W pierwszym cyklu (rys.3a) pojemność mierzona jest między elektrodami 1-2, w drugim cyklu (rys.3b) między 1-3, w trzecim cyklu (rys.3c) między elektrodami 1-4 itd. Tak więc uzyskuje się zbiór niezależnych pomiarów liniowych.

3. Stan obecny i rozwój

Ilość elektrod wokół mierzonej objętości zależy od potrzeb. Początkowo, pierwszy system oparty był na zastosowaniu ośmiu elektrod. Po opanowaniu techniki tomografii procesowej pojawiły się rozwiązania z zastosowaniem sześciu elektrod, dwunastu, szesnastu a nawet trzydziestu dwóch.

Ilość m niezależnych kombinacji pomiarów liniowych dla wybranej ilości n elektrod można wyrazić przez

$$m = n(n-1)/2$$

np. dla $n = 8$ elektrod otrzymujemy $m = 28$ pomiarów.

Ze wzrostem ilości elektrod występuje problem malenia poziomu sygnału i wzrostu efektu krawędzi. Na poziom sygnału wpływa również odległość między elektrodami czyli średnica urządzenia na którym umieszczone są elektrody.

W celu usunięcia wpływu elektromagnetycznych pól zewnętrznych na pomiar stosuje się ekran który jest uziemiony. Na rys.4 podano schematycznie zastosowanie ekranu łącznie z ekranowaniem między elektrodami. Takie rozwiązania wymaga większego wysiłku przy projektowaniu ale zapewnia bardziej efektywne ekranowania. Stosuje się również ekranowanie pełnymi pierścieniami z dwóch stron elektrod pomiarowych. Innym rozwiązaniem jest zasilanie (sterowanie) ekranu podzielonego analogicznie do elektrod i w ten sposób generuje się jednorodne pole elektryczne w objętości pomiarowej.

Pojemności o bardzo małej wartości, które są mierzone w tomografii procesowej są rzędu kilku lub nawet częścią femofarrada przy dużej częstotliwości pomiaru wynoszącej rzędu 5 - 15 kHz. Jest to bardzo trudny problem i od jego rozwiązania zależał sukces wprowadzenia tomografii.

W UMIST powstały pierwsze układy pomiarowe. Układy te były oparte na zasadzie przesyłania ładunków [5]. Przelączniki CMOS, S1 i S4 pracujące z częstotliwością 1,25 lub 2,5 MHz umożliwiają cykliczne ładowanie i rozładowywanie kondensatorów o nieznannej pojemności. Wynikowy prąd jest wzmacniany i przetwarzany na różnicę potencjałów $V_2 - V_1$. Uzyskiwana rozdzielczość wynosi rzędu 0,3-1 fF przy częstotliwości 1,1 kHz. (100 zbiorów pomiarowych na 1 msec 66-ciu niezależnych pomiarach w układzie 12 elektrodowym).

W UMIST opracowano również analogowy mostek pojemnościowy prądu zmiennego podany na rys.6. Generator sygnału zasila jedną elektrodę nieznannej pojemności. Prąd powstający przy pozostałych elektrodach jest przekształcany na napięcie a następnie wzmacniany. Stosując 90° przesunięcie fazowe napięcia odniesienia możliwa jest demodulacja i otrzymanie sygnału analogowego proporcjonalnego do mierzonej pojemności.

Przy wszystkich stosowanych metodach pomiarowych dokładność rośnie z maleniem częstotliwości przełączeń, ze wzrostem wielkości powierzchni elektrod oraz maleniem odległości między elektrodami. Pierwsze jest związane z prędkością zmian zachodzących w badanym procesie oraz możliwościami fizycznymi uzyskania wymaganej częstotliwości elektronicznych przełączników natomiast następne dwa wynikają z fizycznych wymiarów badanego urządzenia.

Z równań (6) i (8) wyraźnie wynika, że bezpośrednie wyliczenie pojemności z otrzymanych wyników wartości scalkowanych nie jest możliwe. Natomiast możliwym rozwiązaniem jest zastosowanie tzw. problemu inwersji i metoda ta jest powszechnie stosowana w tomografii procesowej [1]. Wynika to z faktu, że spotykamy się z występowaniem wielu niedostatecznie zdeterminowanych układów równań. Stosunek znanych do nieznanych zmiennych może wynosić nawet 0.05 do 0.155. Dodatkowo występują nieliniowości i konieczność stosowania metod iteracyjnych i procedur linearyzacyjnych co wpływa na błędy rekonstrukcji.

Stosunkowo prostą metodą jest tzw. metoda Backprojection zastosowana w pierwszych pracach i jest ona metodą najczęściej obecnie stosowaną. Ogólna zasada podana jest na rys. 7a. Zbiór wartości pomierzonych ϕ_M jest rozłożony wzdłuż płaszczyzny pomiarowej zgodnie z macierzą przypisanych wag. Ten rozkład czułości $S_i(x,y)$ dla i kombinacji elektrod jest jedyny i otrzymuje się a' priori z

$$S_i(x,y) = \frac{\Delta C_i}{\varepsilon A} \quad \Big| \quad \text{tzn } \phi_{M,i} = \sum_{(x,y)} \Delta C_i =$$

$$= \sum S_i(x,y) \varepsilon(x,y) \quad (9)$$

Powyższa zależność przedstawia wzmocnienie przestrzenne układu czujników (ΔC) w obszarze A o przenikalności dielektrycznej ε w objętości cząstkowej równej zeru ($\varepsilon A \rightarrow 0$). Rozkład czułości, również wykorzystywany w technice iteracyjnej, jest źródłem błędów w rekonstrukcji spowodowanych niepewną linearyzacją. Istnieje kilka prób linearyzacji pola elektrycznego które można znaleźć w cytowanej literaturze.

Inną metodą rekonstrukcji jest algorytm tzw. Algebraic Reconstructon Technique ART podany schematycznie na rys. 7b. W tym przypadku przypisuje się początkowy rozkład właściwości i dokonuje się wyliczenia forward. Ze względu na prędkość rekonstrukcji stosuje się równania liniowe w celu wykorzystania rozkładu czułości podanych w równ. 9. Przy forward calculation otrzymuje się wynikową wartość pomiaru. Ta wartość jest porównywana do aktualnej wartości mierzonej i wylicza się błąd rekonstrukcji. Przy zastosowaniu optyimizatora błąd jest rozłożony i uzyskuje się nowy rozkład pozwalający na ponowną iterację. Procedurą jest powtarzana aż błąd osiągnie wartość poniżej przyjętej wartości dopuszczalnej.

Powyższa metoda została ulepszona poprzez wprowadzenie metody elementów skończonych co powoduje zniwelowanie błędu linearyzacji. Odbywa to się jednak kosztem czasu rekonstrukcji.

Zupełnie odmienną metodą obecnie rozwijaną jest metoda sieci neuronów typu preceptorów wielowarstwowych zawierających trzy warstwy poświęcone rekonstrukcji. Neural network uczy się wzorców rozkładu przenikalności dielektrycznej i związanego z tym zbioru pojemności. Wprawdzie rekonstrukcja staje się prosta i szybka metoda ta jeszcze wymaga dopracowania.

W pierwszych latach rozwoju tomografii procesowej, w celu uzyskiwania szybkiej rekonstrukcji obrazu wykorzystywano układy transputerowe. Przy obecnym rozwoju mikrokomputerów nie ma potrzeby stosowania tej techniki.

Zastosowania

Tomografia procesowa znajduje coraz szersze zastosowanie w przemyśle. Poniżej zostaną krótko omówione przykładowe zastosowania, których opis można znaleźć w literaturze. Natomiast zastosowania w zakresie ochrony środowiska są obecnie w stadium badań choć niektóre wprowadza się już w realnych warunkach.

Zastosowanie tomografii do otrzymywania obrazów w dwóch lub więcej płaszczyznach umożliwia uzyskanie pomiaru rozkładu prędkości jak również uzyskania obrazu pseudo trójwymiarowego.

Główne kierunki zastosowań przemysłowych:

- transport pneumatyczny - pomiar przepływu ciała stałego, uzyskano 100 obrazów/sek.

- rurociągi na polu wydobywania ropy- pomiar stosunku gazu do ropy oraz wyznaczanie reżimów przepływu - 200 obrazów/sek
- złoża fluidalne - duża prędkość uzyskiwania obrazów gaz/masa fluidalna oraz prędkość pęcherzyków gazu
- hydrocyklony - pomiar profili stężenia i stabilności rdzenia powietrza w przemysłowych separatorach

Zainteresowanie tomografią procesową wynikało z coraz większych wymagań przemysłu wynikających z konieczności lepszego wykorzystania surowców i energii oraz podnoszenia jakości ze zwróceniem uwagi na ochronę środowiska.

Zakończenie

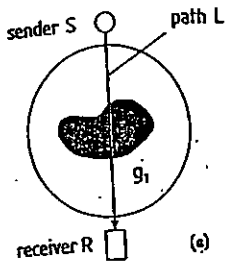
Tomografia procesowa jest typowym przykładem rozwiązań multidyscyplinarnych. Najtrudniejszym problem jest praca na styku technolog - specjalista od tomografii. Technolog musi dobrze zdefiniować czego się spodziewa, a jednocześnie musi opisać zmiany własności fizycznych w zachodzącym procesie. W końcu musi być zdolny do interpretacji uzyskanych obrazów. Te właśnie wymagania powodują, że tomografia procesowa znajduje tam zastosowanie gdzie istnieją dobrze przygotowane zespoły technologów, głównie specjalistów po inżynierii chemicznej. Dlatego też jest głównie wykorzystywana na wydziałach inżynierii chemicznej do opracowywania nowych procesów lub nowej, względnie modernizowania istniejącej aparatury chemicznej. Jednym słowem głównymi odbiorcami tomografii procesowej są uczelnie, laboratoria wielkich koncernów. Dowodem zrozumienia tego problemu jest powołanie w Anglii konsorcjum w którym bierze udział rząd, uczelnie i kilka wielkich koncernów w celu zbliżenia tego nowego narzędzia do przemysłu.

Niezależnie od posunięć organizacyjnych niezbędne jest aby tomografia procesowa stała się w przyszłości bardziej komercyjnie atrakcyjna. W tym celu konieczne jest wyprodukowanie tanich systemów, o większej niezawodności.

Przyszły postęp zależy od dalszych sukcesów w rozwoju urządzeń tomografii procesowej i współpracy w takich układach jak European Union Process Tomography Network.

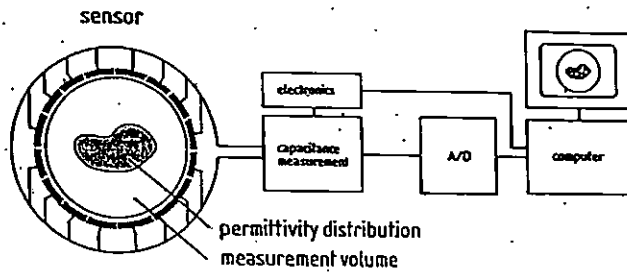
Literatura

- [1] Imaging Industrial Flows Application Of Electrical Process Tomography - A. Płaskowski, M.S.Beck, R.Thorn, T.Dyakowski - Wydawca: IOP Bristol, Philadelphia 1995 stron 214
- [2] Cross Correlation Flowmeters - Their Design and Application - M.S.Beck, A.Płaskowski, Wydawca: A.Hilger Publisher, Bristol 1987 stron 240
- [3] Beck M.S. and Williams R.A. - Sensor Design and Selection in Frontiers of Industrial Process Tomography, (New York Engineering Foundation) 1995
- [4] Beck M.S., Williams R.A. , Hoyl B.S. Morris M.A. Waterfall R.C. (eds) - Process Tomography '95 Implementation for Industrial Process (Manchester UMIST) 1995
- [5] Huang S.M. - Impedence Sensors - Dielectric Systems, Process Tomography - Principles, Techniques ana Applications ed.ed.R.A. Williams and M.S.Beck (Oxford:Butterworth - Heineman) 1995 pp.49-62
- [6] Xie C.G. et al 1993 - tomographic Techniques for Process Design and Operations - ed.M.S.Beck - CEC Brite Euram Computational Mechanics Publication
- [7] MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY - Institut of Physic Publishing- Special issue: Process Tomography March 1996
- [8] Process tomography: a European innovation and its applications - M.S. Beck and R.A.Williams pp 215-224
- [9] Hardware design of electrical capacitance tomography systems - W.Q. Yang pp.225-232

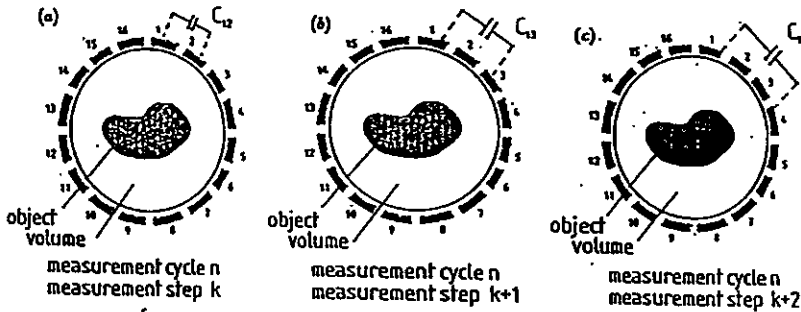


Rys.1. Schemat liniowy tomografii

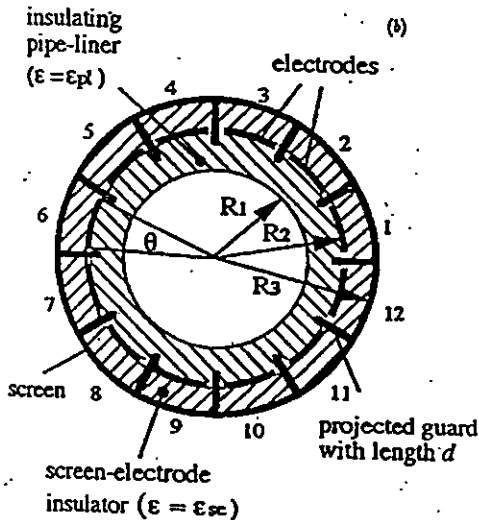
- S - nadajnik
- L - ścieżka
- R - odbiornik



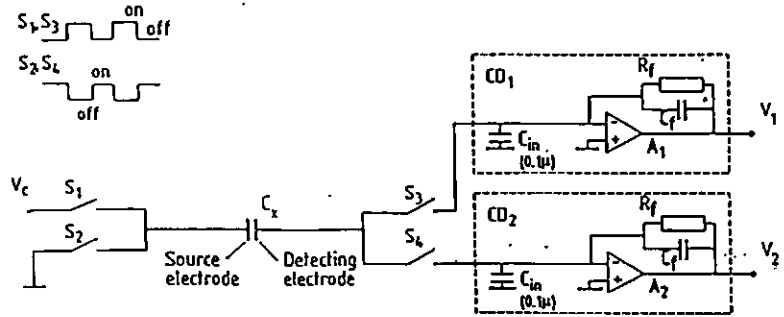
Rys.2 Układ tomografii procesowej



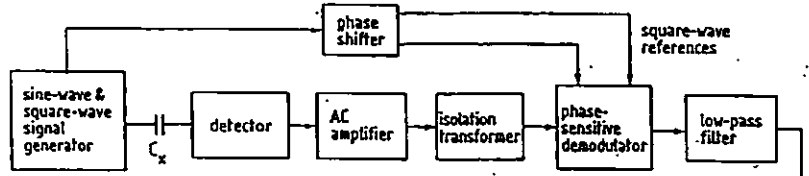
Rys. 3 Przykłady kolejnych połączeń elektrod.



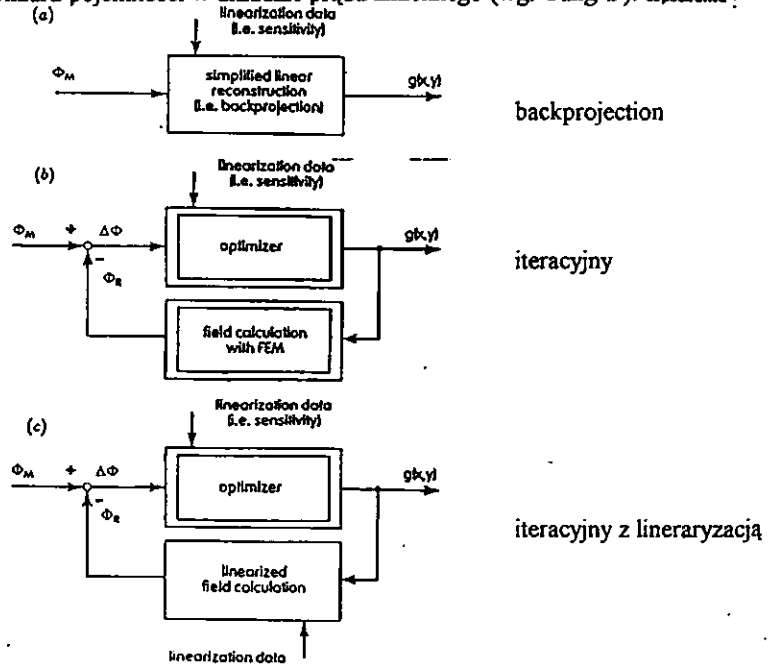
Rys. 4 Przykład ekranowania elektrod z uwzględnieniem ekranu między elektrodami.



Rys. 5 Schemat pomiaru pojemności w układzie zmian ładunku elektrycznego (wg. Xie oraz Huansj'a).



Rys. 6 Schemat pomiaru pojemności w układzie prądu zmiennego (wg. Yang'a).



Rys. 7 Schemaryczne przedstawienie algorytmu rekonstrukcji obrazu.