

Alicja IDZIASZEK-GONZALEZ  
Stefan WÓJTOWICZ

## POMIAR SEKWENCYJNY W UKŁADZIE TOMOGRAFII OPTYCZNEJ SEPARATORA MAGNETYCZNEGO

**STRESZCZENIE** *Separację mieszaniny materiałów sypkich o różnych właściwościach magnetycznych można przeprowadzić w silnym wysokogradentowym polu magnetycznym. Jeśli składniki mieszaniny posiadają wystarczająco zróżnicowane właściwości optyczne, to do monitorowania separacji może być zastosowana tomografia optyczna. Dokładność obrazowania koncentracji różnych cząstek magnetycznych zależy od dokładności pomiaru parametrów światła emitowanego przez nadajniki i po rozproszeniu stłumieniu docierającego do odbiorników. Pomiar dotyczy słabych sygnałów i odbywa się w obecności silnych zakłóceń. Kluczowym problemem jest odtwarzanie zakłóconych sygnałów pomiarowych. Artykuł prezentuje algorytm pomiaru sekwencyjnego z ograniczoną liczbą powtórzeń. Celem pomiarowym tomografii optycznej jest konstrukcja obrazu rozkładu przestrzennego przepływającej mieszaniny materiałów. Ograniczeniem jest czas rekonstrukcji sygnału.*

**Słowa kluczowe:** *tomografia optyczna, pomiar promieniowania optycznego, wysokogradentowa separacja magnetyczna, pomiar sekwencyjny, model pomiaru, niepewność pomiaru*

---

**mgr Alicja IDZIASZEK-GONZALEZ**  
e-mail: gonzalez@iel.waw.pl

**dr inż. Stefan WÓJTOWICZ**  
e-mail: s.wojtowicz@iel.waw.pl

Zakład Systemów Pomiarowo-Diagnostycznych  
Instytut Elektrotechniki

## 1. WSTĘP

---

Separacja magnetyczna jest procesem rozdzielania materiałów o różnych właściwościach magnetycznych. Mieszanina sypka przepływa przez komorę separatora. Na cząstki mieszaniny działają siły odchylające, które zależą od podatności magnetycznej materiałów, wartości indukcji magnetycznej, gradientu indukcji magnetycznej oraz masy cząstki [1]. Prędkość przepływu mieszaniny jest sterowana parametrem skuteczności separacji.

Wysokogradientową separację magnetyczną stosuje się do wzbogacania minerałów, do oczyszczania węgla z domieszek zawierających związki siarki, w przemyśle spożywczym i farmaceutycznym [5, 8].

Metoda tomograficzna może być zastosowana, jeśli składniki mieszaniny substancji magnetycznych wykazują także wystarczające zróżnicowanie parametrów optycznych, takich jak pochłanianie i rozpraszanie [2, 6]. To pozwala na odtworzenie przestrzennego rozkładu składników mieszaniny na podstawie wielokrotnych pomiarów optycznych z sensorów rozmieszczonych w ściankach komory separacyjnej. Tomografia optyczna zapewnia nieinwazyjny ciągły pomiar parametrów przepływu nadawy.

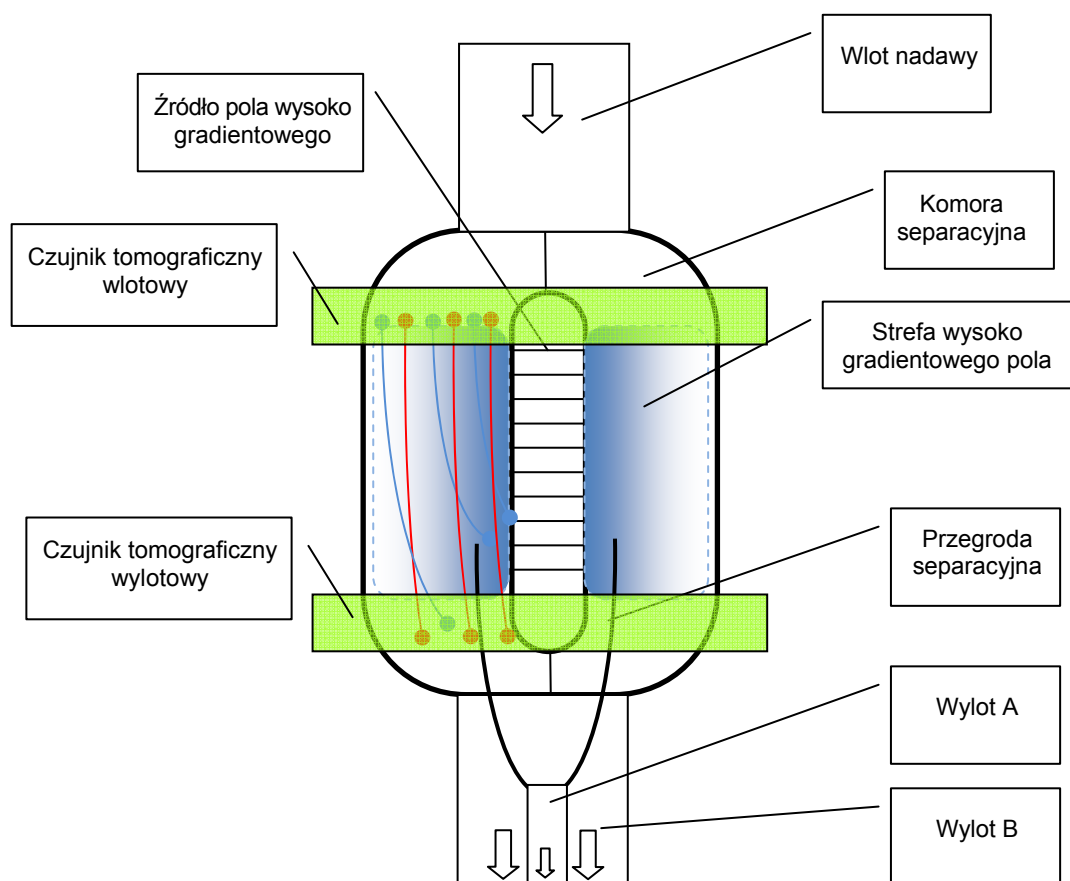
Dane pomiarowe wejściowe do wyznaczania rozkładu składników mieszaniny są silnie zakłócone. Stosunek sygnału do szumu dla wartości chwilowych maksymalnych jest mniejszy od 10. W artykule przedstawiono algorytm sekwencyjnego wielokrotnego pomiaru silnie zaszumionych sygnałów, pochodzących z sensorów fotoczułych [4, 7]. Algorytm jest kompromisem między dokładnością pomiaru a czasem pomiaru. Z punktu widzenia wydajności całego procesu separacji, ważne jest, by przepływ przez komorę separacyjną był możliwie szybki. Uzyskanie zadanej dokładności pomiaru w obecności zakłóceń wymaga czasu, który nie może być z góry określony. W rozwiązaniu przyjętym w tej pracy zastosowano dwa kryteria zakończenia sekwencji powtórzeń dla każdego pomiaru. Jest to konieczna dokładność wyrażona niepewnością standardową. Drugie kryterium wynika z dynamiki procesu separacji i z ograniczonego czasu, jaki może być przeznaczony na pomiar.

## 2. KONSTRUKCJA KOMORY SEPARACYJNEJ

---

Głównym elementem funkcjonalnym separatora jest komora z wejściem, przez które wprowadzana jest nadawa, i z wyjściami dla rozdzielonych składników. Rozdzielenie nigdy nie jest stuprocentowe. Komora separacyjna składa się z elementów pokazanych na rysunku 1. W centralnej części komory

znajduje się stos magnesów neodymowych ułożonych przeciwobnie. Wokół stosu znajduje się strefa wysokogradientowego pola separującego. Przed strefą separacji umieszczono czujnik tomograficzny wlotowy. Zakłada się, że nadawa stanowi równomierną mieszaninę substancji o znanych parametrach magnetycznych. Nadawa porusza się w komorze pod wpływem różnicy ciśnień. W komorze cząstki o różnych właściwościach mają tendencję do zmiany toru pod wpływem pola magnetycznego. Cząstki paramagnetyczne będą odchylane w kierunku wzrostu indukcji magnetycznej, a cząstki diamagnetyczne będą odchylane w przeciwnym kierunku. W dolnej części komory znajdują się przegrody separacyjne, kierujące tłoczony materiał do odpowiednich wylotów. Materiał przepływający przez wylot A zawiera zwiększoną koncentrację substancji o silniejszych właściwościach paramagnetycznych. Przez wylot B przepływa materiał o zwiększonej koncentracji substancji o silniejszych właściwościach diamagnetycznych.

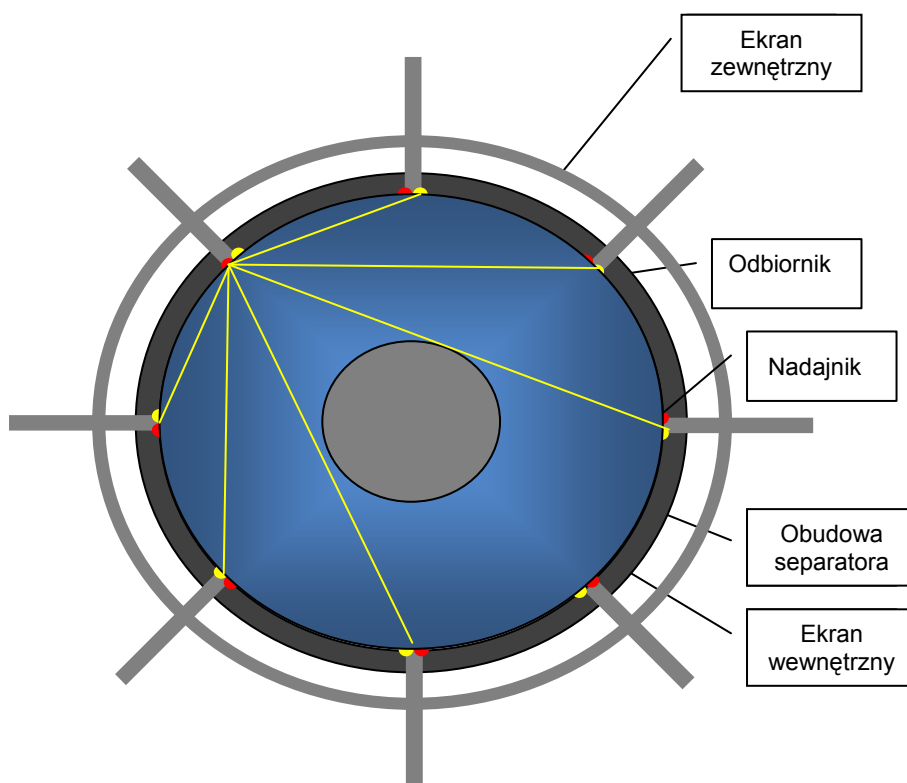


Rys. 1. Konstrukcja separatora z neodymowym stosem magnetycznym

W dolnej części komory znajduje się wylotowy czujnik tomograficzny. Zadaniem tego czujnika jest określenie na podstawie pomiarów wielokrotnych, jaki jest rozkład stężenia poszczególnych substancji w obszarze wylotowym separatora.

### 3. OPTYCZNY CZUJNIK TOMORAFICZNY

Układ optycznej głowicy tomograficznej złożony jest z rozmieszczonych na obwodzie komory separacyjnej nadajników i odbiorników optycznych [3]. Sygnał wysyłany z nadajnika jest tłumiony i rozpraszany we wnętrzu komory separatora wypełnionym mieszaniną materiałów sypkich. W zależności od koncentracji składników w różnych miejscach komory, do odbiorników na obwodzie docierają różne sygnały. Poziom tych sygnałów jest mierzony jednocześnie.



Rys. 2. Konstrukcja czujnika tomograficznego

Pomiary są powtarzane we wszystkich konfiguracjach dla kolejnych kątów projekcji. Dla każdego pomiaru wyznaczany jest wynik pomiaru, składający się ze statystycznego oszacowania wartości oczekiwanej i odchylenia standardowego przy rozkładzie gęstości prawdopodobieństwa określonym na podstawie informacji apriorycznej. Wyniki gromadzone są w pamięci i służą do konstrukcji obrazu rozkładu koncentracji składników.

## 4. MODEL POMIARU

---

Wartość sygnału elektrycznego na wyjściu przetwornika optycznego (odbiornika sygnału optycznego) pozostaje w znanej relacji z wartością mierzonej wielkości fizycznej, charakteryzującej właściwości optyczne materiału znajdującego się w komorze separacyjnej. Podstawowymi parametrami charakteryzującymi przetworniki optyczne są czułość i detekcyjność. W przeważającej liczbie zastosowań detektory promieniowania optycznego pracują w zakresie, gdzie sygnał elektryczny jest w przybliżeniu proporcjonalny do padającego promieniowania optycznego. Czułością jest stosunek przyrostów tych sygnałów. Czułość zależy od długości fali promieniowania, częstotliwości modulacji, powierzchni światłoczułej i od elektrycznych parametrów obwodu wyjściowego. Moc równoważna szumom NEP (*Noise Equivalent Power*) określana jest jako najmniejsza moc promieniowania, jaka może być odebrana przez urządzenie pomiarowe. Jest to taka moc padająca na fotodetektor, dla której stosunek sygnału do szumu jest równy jedności. Relacja między mocą promieniowania a sygnałem na wyjściu odbiornika jest wyznaczana w procesie wzorcowania.

$$v(t) = G(P_e(t))$$

gdzie:

- $v(t)$  – sygnał na wyjściu odbiornika;
- $P_e(t)$  – moc promieniowania optycznego;
- $G(.)$  – charakterystyka przetwarzania.

Sygnał obserwowany na wyjściu odbiornika można wyrazić zależnością, która tworzy model pomiaru:

$$v_{ij}(t) = s_{ij}(t) + w_{ij}(t) + n_{ij}(t)$$

gdzie:

- $i$  – numer projekcji;
- $j$  – numer odbiornika;
- $v_{ij}(t)$  – sygnał losowy na wyjściu odbiornika;
- $s_{ij}(t)$  – deterministyczny nieznan sygnał na wejściu odbiornika;
- $w_{ij}(t)$  – błąd losowy wprowadzany przez wielkości wpływające;
- $n_{ij}(t)$  – losowy sygnał zakłócający.

Dla każdej projekcji pobudzenie jest impulsem prostokątnym o określonym czasie trwania. Zakładając, że obiekt jest układem optycznym bezinercyjnym, wartość sygnału  $s_{ij}(t)$  na wyjściu odbiornika będzie stała w czasie pobudzenia. Dla pomiaru jednokrotnego model pomiaru ma postać:

$$v_{ij} = s_{ij} + w_{ij} + n_{ij}$$

gdzie:

- $v_{ij}$  – wartość odczytana wielkości mierzonej;
- $s_{ij}$  – poszukiwana wielkość mierzona;
- $w_{ij}$  – błąd wprowadzany przez wielkości wpływające dane rozkładem gęstości;
- $n_{ij}$  – losowy sygnał zakłócający określony rozkładem gęstości.

Wartość poszukiwana wielkości mierzonej jest zmienną losową, której rozkład można wyznaczyć jako splot rozkładów gęstości prawdopodobieństwa wielkości wpływających i zakłóceń:

$$f_{vij} = f_{wij} * f_{nij}$$

Przyjmując oszacowanie normalne rozkładu o odchyleniu standardowym  $\sigma_{vij}$  można przyjąć stosunek sygnału do szumu jako miarę jakości pomiaru:

$$\lambda_{ij} = \frac{s_{ij}}{\sigma_{vij}}$$

Dla pomiarów wielokrotnych, przy założeniu niezależności statystycznej kolejnych pomiarów, otrzymano:

$$\lambda_{nij} = \frac{\sqrt{ns_{ij}}}{\sigma_{vij}}$$

Maksymalna dopuszczalna liczba powtórzeń pomiarów jest ograniczona i wynika z dynamiki procesu separacji oraz z pasma częstotliwości procesów losowych generowanych przez wielkości wpływające i zakłócające. Minimalny stosunek sygnału do szumu, który powinien być osiągnięty określany jest na podstawie wymagań dokładności wartości wejściowych do przetwarzania tomograficznego. W przypadku, gdy liczba powtórzeń jest mniejsza od maksymalnej i jednocześnie oszacowany stosunek sygnału do szumu nie osiąga wartości minimalne wykonywany jest następny pomiar:

$$(n < n_{\max}) \wedge (\hat{\lambda}_{nij} < \lambda_{ij \min}) \Rightarrow n := n + 1$$

Jeżeli pożądaný stosunek sygnału do szumu zostanie osiągnięty w mniejszej liczbie kroków, sekwencja jest przerywana:

$$(n < n_{\max}) \wedge (\hat{\lambda}_{nij} \geq \lambda_{ij \min}) \Rightarrow (\text{stop})$$

Jeśli mimo osiągnięcia maksymalnej dopuszczalnej liczby powtórzeń nie uzyskuje się wyniku z minimalną dokładnością, sekwencja jest przerywana:

$$(n = n_{\max}) \Rightarrow (\text{stop}), (\hat{\lambda}_{nij} = \frac{\sqrt{n} \hat{s}_{ij}}{\hat{\sigma}_{vij}})$$

W każdym z powyższych przypadków sekwencja pomiarowa kończy się co najwyżej po  $n_{\max}$  pomiarach, lecz wynik nie gwarantuje zakładanej dokładności. Algorytm sekwencyjny z ograniczoną liczbą powtórzeń umożliwia maksymalne wykorzystanie czasu pomiaru do osiągnięcia maksymalnej dokładności. Wynik pomiaru uzyskany w powyższej procedurze zawiera oszacowaną wartość oczekiwaną oraz niepewność rozszerzoną, określającą przedział ufności dla przyjętego poziomu ufności.

## 5. WNIOSKI

---

W rozważanym systemie skuteczność procesu separacji magnetycznej oceniana jest na podstawie obrazów tomograficznych przestrzennego rozkładu składników mieszaniny. Nośnikiem informacji o rozkładzie przestrzennym jest promieniowanie optyczne. Obraz uzyskiwany jest na drodze przetwarzania wielopunktowego pomiaru mocy promieniowania optycznego dla zmieniającego się usytuowania źródła promieniowania. W tomografii przetwarzane są duże bloki danych pomiarowych oraz danych apriorycznych. Wyniki pomiarów obarczone są błędami, które mogą przenosić się na obraz wyjściowy, powodując zniekształcenia i rozmycia. Tomografia wymaga dokładnych danych lub danych o oszacowanej dokładnie niepewności.

Zastosowanie przedstawionego w zarysie algorytmu sekwencyjnego pozwala zmniejszyć wpływ zakłóceń i losowych czynników wpływających na rekonstruowany obraz.

W separacji magnetycznej ważny jest czynnik czasu. Proces jest dynamiczny. Należy mierzyć i równocześnie przetwarzać wyniki. Otrzymywane obrazy służą do sterowania prędkością przepływu oraz ustawieniem przegrody separującej. Algorytm sterowania uwzględnia zmianę obrazu w czasie.

Szczególnie przy detekcji zmian obrazu istotne jest dokładne uwzględnienie niepewności pomiaru. Przedstawiony algorytm daje możliwość adaptacyjnego wykorzystania czasu, który może być przeznaczony na pomiar.

## LITERATURA

1. Cieśla A.: Dynamiczne działanie pól: elektrycznego i magnetycznego w elektrotechnologiach, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 233, 2007.
2. Grzywacz T., Sikora J., Wójtowicz S.: Substructuring methods for 3D BEM multilayered model for Diffuse Optical Tomography problems, COMPUMAG'07, June 24-28, 2007, Aachen, Germany, pp. 1111-1112.
3. Nita K., Wójtowicz S.: Multichannel Measuring Setup in Application to Impedance Tomography. Chapter 11 in: Industrial and Biological Tomography, Theoretical Basis and Applications. Electrotechnical Institute Publishing House, Warsaw 2010.
4. Sikora J.: Algorytmy numeryczne w tomografii impedancyjnej i wiroprowodowej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2000.
5. Svoboda J., Fujita T.: Recent developments in magnetic methods of material separation, Minerals Engineering 16 (9), 785-792, 2003.
6. Wójtowicz S., Grzywacz T., Biernat K.: Łączenie (fuzja) informacji w dyfuzyjnej tomografii optycznej i impedancyjnej, Konferencja POOMT 2008, 28-30.05.2008 r., Karniety.
7. Wójtowicz S.: Estimation of uncertainty in measurement using Monte Carlo simulation, International Conference Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials, APTDAM 2007, September 26-28, 2007, Wrocław, pp. 78-82.
8. Yavuz C.T., Prakash A., Mayo J.T., Colvin V.L.: Magnetic Separations: From steel plants to biotechnology, Chemical Engineering Science 64, 2009, pp. 2510-2521.

*Rękopis dostarczono dnia 16.04.2012 r.*

## SEQUENTIAL MEASUREMENT IN OPTICAL TOMOGRAPHY SYSTEM INTEGRATED WITH MAGNETIC SEPARATOR

Alicja IDZIASZEK-GONZALEZ, Stefan WÓJTOWICZ

**ABSTRACT** *Magnetic separation of pulverized mixture of materials with various magnetic properties can be performed in high-gradient magnetic field. If magnetic ingredients possess sufficiently different optical properties optical tomography can be used as a tool for process monitoring. The imaging precision of magnetic particle con-*



*centration depends on accurateness of optical signal measurement emitted by the transmitters along with the signal measured getting to the detectors. The whole measurement involved very weak signals and takes place in the presence of strong signal distortion. The key issue is the diformed signal reconstuction. The paper presents the sequential measurement algorithm with limited number of repetition. The objective of integrating the optical tomography system is to create the image of mixture spatial distribution. The limitation is the time needed for image reconstruction.*

**Keywords:** *optical tomography, optical measurement, high gradient magnetic separation, sequential measurement, uncertainty of measurement*

**Mgr Alicja IDZIASZEK-GONZALEZ** – ukończyła studia w Szkole Nauk Ścisłych. Otrzymała także dyplom magistra fizyki z Texas Tech University w Lubbock, USA. Pracowała jako wykładowca na Wydziale fizyki Texas Southern University w Houston. Obecnie jest zatrudniona na stanowisku fizyka w Zakładzie Systemów Pomiarowo-Diagnostycznych Instytutu Elektrotechniki w Warszawie, gdzie zajmuje się zjawiskiem separacji magnetycznej oraz pomiarami tomograficznymi w zastosowaniach przemysłowych.



**Dr Stefan S. WÓJTOWICZ** ukończył Wydział Elektryczny Politechniki Szczecińskiej w 1973 roku. Pracował w Instytucie Automatyki Przemysłowej Politechniki Szczecińskiej, jako asystent i adiunkt. Od 1978 r. zatrudniony jest w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie. Jego zainteresowania naukowe związane były z systemami pomiarowymi i diagnostycznymi. Jest autorem i współautorem ponad 150 publikacji, w tym książek, monografii, artykułów i referatów naukowych i publicystycznych. Pełnił różne funkcje związane z zarządzaniem zespołami badawczymi, kierował Zakładem Naukowym Instytutu, pełnił funkcje Zastępcy Dyrektora ds. Naukowych oraz Zastępcy Dyrektora ds. Wdrożeń i Transferu Technologii w Instytucie Elektrotechniki, był członkiem Rady Naukowej Instytutu Elektrotechniki, Redaktorem Naczelnym Kwartalnika Naukowego „Prace Instytutu Elektrotechniki”, członkiem komitetu redakcyjnego miesięcznika „Nowa Elektrotechnika”, członkiem Sekcji Kształcenia i Rozwoju Kadry Naukowej Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN oraz Sekcji Podstaw Metrologii Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN.

