

Zbigniew Chaniecki\*, Krzysztof Grudzień\*,  
Andrzej Romanowski\*, Dominik Sankowski\*

## **Wyznaczanie charakterystyki instalacji transportu pneumatycznego materiałów sypkich przy zastosowaniu dwupłaszczyznowego systemu tomografii pojemnościowej**

### **1. Wprowadzenie**

Transport materiałów granulowanych w rurociągach za pomocą gazu jest nazywany transportem lub przepływem pneumatycznym. Metoda ta jest szeroko stosowana w przemyśle rolno-spożywczym (cukier, zboże i inne), chemicznym (półprodukty), farmaceutycznym (tabletki), przy produkcji tworzyw sztucznych (granulat plastikowy – np.: HDPE), wydobywczym czy budowlanym, między innymi do napełniania silosów służących do składowania materiałów sypkich.

Każdy system przemysłowy wymaga prawidłowego sterowania, monitorowania i diagnozowania. W przypadku systemu transportu pneumatycznego celem jest m.in. zapobieganie blokowaniu rurociągu oraz niszczeniu materiału, na skutek źle dobranych parametrów transportu. Informacja diagnostyczna uzyskana przy użyciu ECT pozwala na skuteczne sterowanie tym procesem. Polega ono na doborze prędkości i ciśnienia medium transportowego, w celu uzyskania odpowiedniego dla danego materiału typu przepływu.

Uzyskanie odpowiedniego typu przepływu możliwe jest jedynie w zamkniętym układzie regulacji, w którym, na podstawie zgromadzonej wcześniej informacji o odpowiedzi układu na zmiany nastaw dmuchawy i podajnika materiału, wypracowywane jest odpowiednie sterowanie układu.

### **2. Przemysłowe systemy tomografii**

Ciągły rozwój technologii produkcji wymaga uzyskiwania coraz dokładniejszej wiedzy na temat prowadzonych procesów [5]. Standardowe metody opierające się na pomiarze

---

\* Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka

wielkości fizycznych materiału okazały się niewystarczające. Dla prawidłowej kontroli procesu konieczne stało się posiadanie wiedzy na temat zjawisk zachodzących wewnątrz instalacji przemysłowych. Zainstalowanie standardowych przyrządów pomiarowo-kontrolnych w instalacjach, często wysokociśnieniowych (np. w rurociągu wydobywającym ropę naftową z dna oceanu), wymaga wykonania otworów, czyli inwazji w proces. Taki sposób montażu sondy powoduje osłabienie konstrukcji zbiornika oraz zakłócenie zachodzącego procesu. Pojawiła się zatem potrzeba zastosowania nieinwazyjnych metod, które umożliwiają poznanie oraz monitorowanie zjawisk zachodzących w obszarach zamkniętych, takich jak zbiorniki, komory mieszalnicze i rurociągi. Przepływy wielofazowe charakteryzują się m.in. wysokimi wymaganiami dotyczącymi ich monitorowania i diagnozowania.

Zastosowanie do tego celu systemów opartych na kamerach CCD dostarczających szeroko pojętej informacji o zachodzących w procesie przemysłowym zjawiskach okazało się bardzo trafnym rozwiązaniem. Systemy pomiarowe oparte na analizie i przetwarzaniu informacji wizyjnej, w porównaniu z klasycznymi narzędziami pomiarowymi posiadają dwie główne zalety. Zdecydowanie lepiej uwidaczniają zjawiska fizykochemiczne (w czasie i przestrzeni), zachodzące podczas procesu przemysłowego, co pozwala na opracowanie lepszych metod kontroli i diagnozowania procesów przemysłowych. Drugą zaletą to nieinwazyjność pomiaru. Natomiast główną wadą zastosowania kamer CCD jest jednak konieczność użycia przezroczystego zbiornika, w którym odbywa się badany proces przemysłowy. Dodatkowo istnieje potrzeba swobodnego dostępu do procesu przemysłowego. Urządzenia przemysłowe w odróżnieniu od stanowisk laboratoryjnych często nie spełniają takich wymagań. Często również techniki oparte na obrazach z kamer CCD wymagają użycia cząstek znacznikowych, w celu umożliwienia obserwacji przepływu na podstawie sekwencji obrazów. Skutkuje to pewnego rodzaju inwazją w proces przemysłowy. Inną wadą tego rozwiązania polega na tym, że pomiar przepływu tą metodą daje lepszy efekt dla pomiaru płynów, natomiast dla przepływu materiałów sypkich o gęstym upakowaniu jest niewystarczający (może być obciążony choćby błędem związanym z oświetleniem materiału) i ogranicza się jedynie do warstw zewnętrznych. Wady te spowodowały wytworzenie coraz to doskonalszych narzędzi do pomiaru przepływów wielofazowych. Szukając metod, pozwalających wizualizować przepływ wielofazowy w sposób, który umożliwia „zajrzenie” do środka nieprzezroczystego naczynia, użyto technik obrazowania pacjenta w medycynie – tomografii medycznej. W połowie lat 80. nauki medyczne zaczęły również stosować tomografię impedancyjną jako bezpieczną i tanią metodę do obrazowania pracy organów wewnętrznych człowieka [1]. Okazało się, że medyczne techniki tomograficzne eliminują większość problemów, z którymi nie mogła sobie poradzić technika optyczna oparta na kamerze CCD [2, 3, 4]. Przede wszystkim możliwe stało się monitorowanie i śledzenie systemów nieprzezroczystych oraz otrzymanie ilościowej i jakościowej informacji z niedostępnych dla techniki optycznej miejsc.

### 3. System ECT

Systemy tomografii procesowej dokonują pomiaru charakterystycznych dla danego środowiska wielkości fizycznych. Przy wyborze odpowiedniego dla danego zastosowania

systemu w zależności od typu badanego procesu, szybkości działania i wymaganej rozdzielczości obrazu można kierować się kryteriami podanymi w [3]. W aspekcie niniejszych badań cenne jest opracowanie dotyczące metod elektrycznych w zastosowaniach przemysłowych [6]. Ponieważ badane materiały mają właściwości dielektryczne, najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie do badań komputerowego systemu pomiarowego elektrycznej tomografii pojemnościowej (*electrical capacitance tomography* – ECT). ECT składa się z układu pomiarowego (*measuring device*), czujnika pomiarowego (*sensor*) i komputera, który umożliwi programowanie tomografu, sterowanie wykonaniem pomiaru, rejestrację i archiwizację danych oraz przeprowadzanie procesu rekonstrukcji.

Pomiar odbywa się z użyciem czujnika pojemnościowego, składającego się z  $n_e$  elektrod (8, 16, ...), umieszczonego wokół rury lub zbiornika z badanym procesem. Dla każdej pary elektrod – nadawczej i odbiorczej – rejestrowana jest wartość pojemności międzyelektrodowej  $c_i$ , gdzie  $i = 0 \dots N - 1$ , a  $N$  jest liczbą niezależnych pomiarów obliczanych według zależności  $N = (n_e \cdot (n_e - 1))/2$ , które zebrane w każdej dyskretnej chwili czasowej, stanowią wektor pomiarowy o wymiarze  $N \times 1$ . Pomierzone wektory pojemności międzyelektrodowych, po znormalizowaniu, można poddać procesowi rekonstrukcji. W jego wyniku uzyskuje się dwuwymiarowy obraz (tomogram), będący przybliżonym rozkładem przenikalności dielektrycznej w danym przekroju. Rozkład ten jest proporcjonalny do koncentracji materiału [2, 7]. Obrazy uzyskane z użyciem metod elektrycznych charakteryzują się niską rozdzielczością, np.  $32 \times 32$  punkty. Jednak jest ona wystarczająca do zastosowań diagnostycznych. Proces rekonstrukcji jest procesem wymagającym wykonywania dużej liczby operacji obliczeniowych, co wydłuża czas analizy danych. Przyspieszenie tego etapu możliwe jest dzięki analizie nieprzetworzonych danych pomiarowych (*raw-data*) – metoda wykorzystywana w niniejszym artykule – lub zastosowaniu metod rekonstrukcji szybkich lecz o niższej jakości [12].

#### 4. Przepływ pneumatyczny materiałów sypkich

Wielofazowy strumień przepływu stanowią mieszaniny składające się z różnych, oddzielnych faz (w postaci gazowej, stałej, płynnej). W takiej mieszance można określić „interfejs” między fazami, który to dynamicznie zmienia się w przestrzeni i czasie w trakcie przepływu [7].

Dwa główne parametry przepływu materiałów sypkich to koncentracja i prędkość. Znajomość ich rozkładu zarówno w czasie jak i przestrzeni pozwala na kontrolę i monitorowanie przepływu. Koncentrację można określić jako proporcję przestrzeni  $V_{mieszanina}$  zajęta przez materiał  $V_{granulat}$ :

$$k = \frac{V_{granulat}}{V_{mieszanina}} \quad (1)$$

Wartości koncentracji znajdują się w przedziale  $<0, 1>$ . Gęstość materiału może zostać określona poprzez wzór:

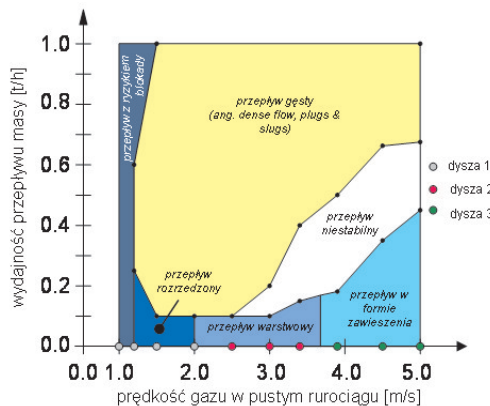
$$\rho = (1 - k)\rho_g \quad (2)$$

gdzie  $\rho_g$  jest rzeczywistą (fizyczną) wartością gęstości granulatu.

Natomiast prędkość fazy jest to średnia prędkość wszystkich cząstek granulatu w kierunku, zazwyczaj, równoległym do ścian rurociągu [2].

Przepływ pneumatyczny jest oparty na fizycznej zasadzie, że powietrze, pod pewnymi warunkami, jest w stanie przetransportować materiały w postaci stałej. W naturze, powietrze może transportować wiele substancji, takich jak piasek, śnieg, liście czy nasiona. Przepływ powoduje powietrze płynące dzięki pojawieniu się różnicy ciśnienia między początkiem i końcem rurociągu. System transportu pneumatycznego może pracować w dwóch trybach – ssącym i ciśnieniowym.

W zależności od możliwości i potrzeb średnice rurociągów w pneumatycznym transporcie zmieniają się od 10 mm (dla przemysłu przetwórczego) do 800 mm (dla potrzeby transportu dużych ilości materiału, np.: pobór ziarna ze statków). Ilość masy transportowanego materiału waha się odpowiednio od kilku kg/h do 1000 ton/h, a długości rurociągu między 10 m a 1000 m. Sama prędkość powietrza zależna jest od własności materiału, ale generalnie dla większości materiałów mieści się w przedziale od 2 m/s do 30 m/s. Zależności między gęstością cząstek granulatu a prędkością transportującego gazu pozwalają wyróżnić kilka wzorców przepływu (rys. 1). Wzorzec przepływu określa zachowanie się materiału podczas transportu – rozkład w czasie i przestrzeni przepływającego granulatu. W przypadku przepływu pneumatycznego możemy wyróżnić następujące reżimy gęsty (*dense flow – slug, plug*), zawieszony (*suspended flow*), rozcieńczony (*dilute flow*), niestabilny (*unstable*), warstwowy (*stratified flow*) [7]. Pojawiający się wzorzec jest zależny od gradientu ciśnienia i prędkości wpuszczanego powietrza oraz ilości i rodzaju transportowanego materiału.



**Rys. 1.** Wzorce przepływu w sekcji poziomej transportu pneumatycznego przy określonej prędkości gazu i wydajności przepływu masy [7]

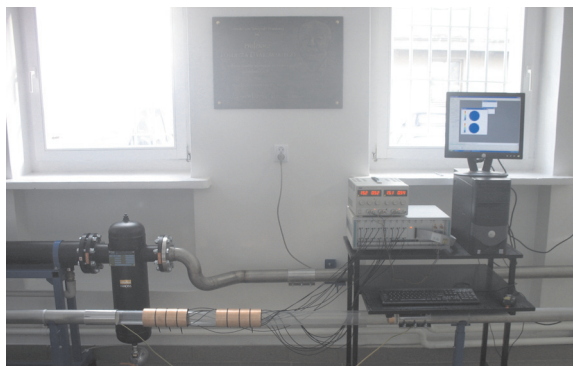
Optymalnym sposobem transportu pneumatycznego materiału sypkiego w odcinku pionowym rurociągu jest transport w postaci korków (*plugs*), tzn. obszarów o zwiększonej koncentracji materiału.

## 5. Opis stanowiska badawczego

Badania wykonano w półprzemysłowym stanowisku badawczym transportu pneumatycznego (rys. 2). Instalacja znajduje się w laboratoriach im. Tomasza Dyakowskiego w Katedrze Informatyki Stosowanej i została zbudowana w ramach grantu badawczego (167/6, PR UE/2007/7). W odcinku poziomym instalacji (rys. 3) zamontowano sekcję z pleksi, na której zabudowano dwupłaszczyznowy czujnik pojemnościowy (2×8 elektrod). Za pomocą tomografu ECT wykonano pomiary pojemności międzyelektrodowych. Zbiór pomierzonych pojemności (raw data) został poddany uśrednianiu i przedstawiony w formie wykresów z obu płaszczyzn w celu określenia właściwości transportu dla danych parametrów procesu.



**Rys. 2.** Fotografia przedstawia półprzemysłowe stanowisko badawcze transportu pneumatycznego w laboratorium im. Tomasza Dyakowskiego w Katedrze Informatyki Stosowanej



**Rys. 3.** Fotografia odcinka poziomego instalacji transportu pneumatycznego przedstawia stanowisko pomiarowe tomografu pojemnościowego i sekcję z pleksi, na której zabudowano dwupłaszczyznowy czujnik pojemnościowy

Materiał, w tym przypadku tworzywo sztuczne (np. granulaty poliamidowy) zasypywany jest ręcznie z worków do zbiornika buforowego dolnego (nad dozownikiem celkowym). W dalszej kolejności dozownik celkowy poprzez eżektor dozuje materiał do rurociągu transportowego. Prędkość obrotów dozownika celkowego regulowana jest za pomocą falownika. Dmuchawa w obudowie dźwiękochłonnej tłoczy powietrze, które transportuje pneumatycznie materiał rurociągiem DN 65 do zbiornika buforowego górnego umieszczonego na wadze. Powietrze tłoczone przez dmuchawę może się bardzo nagrzać, dlatego zanim zostanie skierowane do instalacji transportu pneumatycznego jest przepuszczane przez wymiennik ciepła – chłodnicę wodną i następnie przez separator wilgoci. Materiał ze zbiornika na wadze jest opróżniany grawitacyjnie poprzez przesyp dwudrogowy z powrotem do zbiornika nad dozownikiem celkowym lub do innego układu odbiorczego (np. silos). Powietrze wypływające ze zbiornika buforowego odpylane jest za pomocą filtra workowego.

Z procesowego punktu widzenia istotne są dwie wielkości: masowe natężenie przepływu fazy stałej i fazy gazowej (powietrza).

Masowe natężenie przepływu fazy stałej wyznaczane jest w oparciu o pomiar masy granulatu zasypywanego do górnego zbiornika w określonym (mierzonym) czasie.

Masowe natężenie przepływu powietrza wyznaczane jest w oparciu o pomiar ciśnienia dynamicznego przepływającego powietrza w rurze dolotowej (średnica wewnętrzna 76 mm).

W dalszych pracach planuje się realizację systemu automatycznej kontroli i sterowania pracą w/w instalacji z zastosowaniem układów pomiarowych bazujących na układzie pomiarowym elektrycznego tomografu pojemnościowego.

Monitorowanie i diagnostyka systemów przemysłowych mają na celu określenie stanu procesu na podstawie sygnałów diagnostycznych. Porównanie stanu bieżącego z wzorcowym, znajdującym się w bazie wiedzy, umożliwi automatyczne określenie nastaw regulatorów, decydujących o dalszym sposobie prowadzenia procesu czy sprawności urządzenia, co w stosunku do diagnostyki realizowanej przez operatora umożliwi skrócenie czasu wykrycia i lokalizacji awarii. Zadaniem komputerowych systemów diagnostycznych, w przypadku procesów przebiegających w rurociągach oraz zbiornikach zamkniętych, jest wykrycie stanów awaryjnych (uszkodzeń, nieprawidłowości w przebiegu procesu, identyfikacja zatorów), sygnalizacja wystąpienia ich symptomów (przewidzenie niebezpieczeństwa wyjścia stanu procesu poza prawidłowy zakres pracy), jak również rejestracja uzyskanych informacji oraz automatyczne podejmowanie decyzji lub wspomaganie obsługi w stanach awaryjnych.

W 2008 roku w laboratorium tomografii procesowej rozpoczęto implementację systemu sterowania dla instalacji transportu pneumatycznego. Sprzętową część sterowania można podzielić na dwie główne grupy funkcjonalne:

- 1) układ sterowania z nastawianymi parametrami pracy procesu,
- 2) układ pomiarowy zbierający informację o stanie procesu z kontrolowanej instalacji.

Instalacja posiada dwa główne elementy zadające parametry pracy transportu. Jednym z nich jest dmuchawa ustalająca parametr medium transportowego – odbywa się to za pośrednictwem falownika sterowanego z panelu operatora lub (docelowo) z centralnego sterownika. Drugim elementem zadającym parametry procesu transportu jest podajnik celkowy – zasilany z falownika. W tym przypadku możliwa jest zmiana ilości podawanego materiału. Na tę chwilę regulacja tego parametru odbywa się manualnie z panelu sterowniczego falownika. Docelowo funkcję tą przejmie zintegrowany sterownik.

Część mierząca parametry pracy procesu transportu to ciśnieniomierz wartości bezwzględnej (odczytywany z panelu operatora) oraz miernik szybkości przepływającego powietrza oparty na sondzie Prandtla. Ponadto istnieje możliwość pomiaru masy transportowanego materiału. W przyszłości elementy te zostaną zintegrowane w jednym sterowniku udostępniającym interfejs do sterowania instalacją z poziomu komputera PC.

Jednakże najważniejszym elementem diagnostycznym będzie system pomiarowy tomografii procesowej. Na podstawie informacji z tomografu możliwa będzie implementacja opracowanych algorytmów sterowania pracą instalacji w kierunku jej optymalizacji oraz zapobiegania powstawaniu niebezpiecznych zjawisk w przypadku profili zamkniętych.

## 6. Analiza wyników pomiarów

Stosowanie metod analizy opartych na danych pomiarowych i zrekonstruowanych pozwalają uzyskiwać zbliżone wyniki identyfikacji parametrów procesu, co jest wystarczające w tym przypadku. Wyniki uzyskane z zastosowaniem opracowanych przez autorów algorytmów [8, 9, 11, 13] analizy danych pomiarowych wskazują, że możliwa jest rezygnacja z często zbędnego w procesie przemysłowym etapu rekonstrukcji obrazów, który zwiększa ilość wykonywanych operacji, wydłużając (czasem wielokrotnie) proces analizy *on-line*, a tym samym zwalniając proces diagnostyczny i zwiększając niedokładność wyniku.

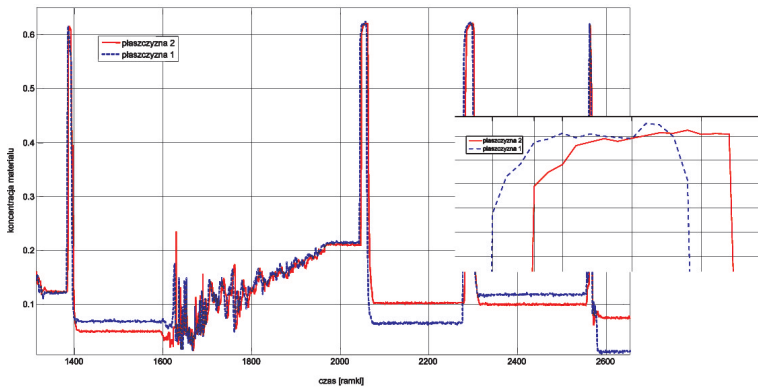
Przeprowadzono szereg pomiarów różnych reżimów przepływu materiału (tab. 1), w celu wyodrębnienia charakterystycznych sytuacji w przepływie materiału.

**Tabela 1**  
Nastawy falowników sterujących dmuchawą i rotorem

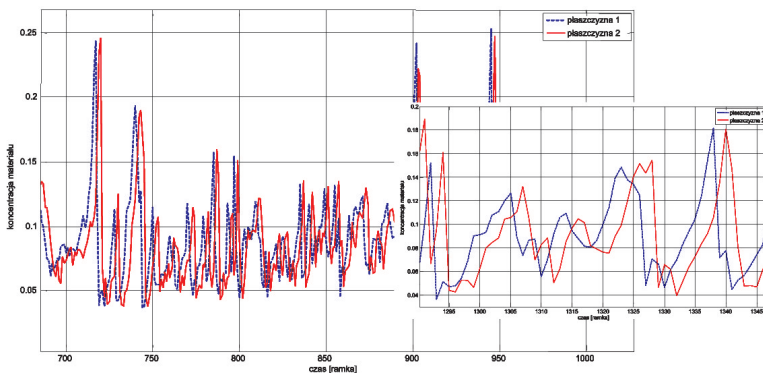
Numer rysunku	Częstotliwość pracy [Hz]	
	dmuchawa	rotator
4	17,0	100
5	19,5	100
6	22,0	100
7	19,5	80
8	17,0	60

Na rysunku 4 można zaobserwować charakterystyczne przesunięcie  $t_d$  wykresów, wynikające z odległości między płaszczyznami pomiarowymi. Kolejne rysunki pozwalają zauważyć, że rejestrowane zmiany koncentracji wykazują powtarzalność, która może być wykorzystana do kolejnego etapu przetwarzania danych tzn. określenia parametrów procesu z użyciem technik korelacyjnych.

Na rysunkach 4–6 można zaobserwować, że wzrost częstotliwości falownika sterującego dmuchawą (wzrost prędkości powietrza), przy stałej prędkości podawania materiału skutkuje przejściem metody transportu od korkowego do materiały od korkowego do rozrzedzonego. Z rysunku 7 można wnioskować o równomiernym transporcie materiału w niewielkich porcjach materiału. Dalsze zmniejszanie nastaw falowników skutkuje w zwiększeniu nierównomierności przepływu. Dalsze obniżanie wartości częstotliwości skutkuje w zablokowaniu materiału w rurociągu, czego należy unikać.

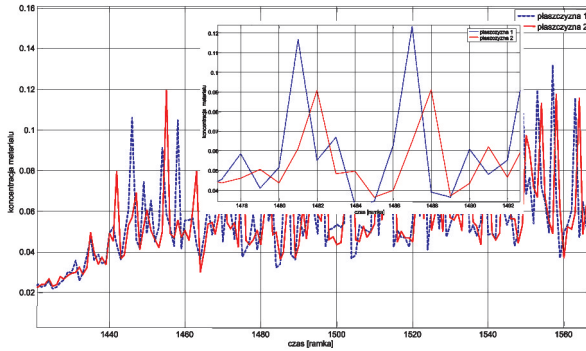


**Rys. 4.** Charakterystyka średniej koncentracji materiału w obu płaszczyznach przekroju. Na powiększeniu zaznaczono przesunięcie  $t_d$  wykresów, wynikające z odległości między płaszczyznami pomiarowymi. Nastawy falowników: dmuchawa 17 Hz, rotator 100 Hz

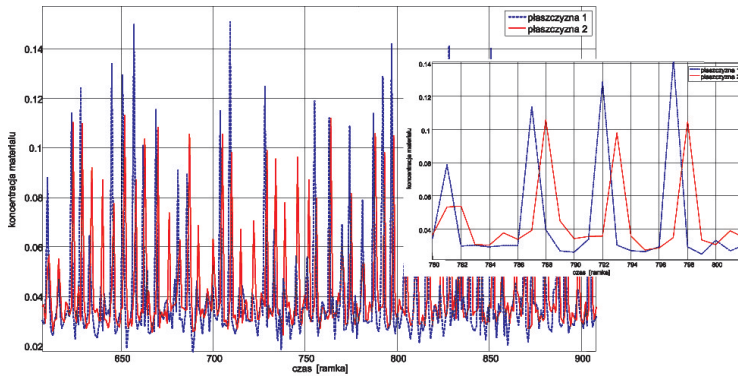


**Rys. 5.** Charakterystyka średniej koncentracji materiału w obu płaszczyznach przekroju. Nastawy falowników: dmuchawa 19,5 Hz, rotator 100 Hz

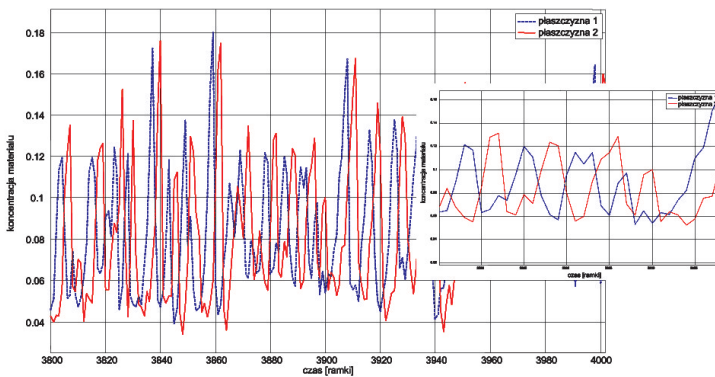




Rys. 6. Charakterystyka średniej koncentracji materiału w obu płaszczyznach przekroju.  
Nastawy falowników: dmuchawa 22 Hz, rotator 100 Hz



Rys. 7. Charakterystyka średniej koncentracji materiału w obu płaszczyznach przekroju.  
Nastawy falowników: dmuchawa 19,5 Hz, rotator 80 Hz



Rys. 8. Charakterystyka średniej koncentracji materiału w obu płaszczyznach przekroju.  
Nastawy falowników: dmuchawa 17 Hz, rotator 60 Hz

## 7. Wnioski

Metoda ECT charakteryzuje się wysoką, dla warunków przemysłowych, dokładnością na poziomie 5%. Uzyskane wyniki mogą być wykorzystane do określenia charakterystyki przepływu instalacji transportu pneumatycznego. Na podstawie pomiarów przepływu dla różnych nastaw falowników sterujących dmuchawą powietrza i rotora podajnika materiału, buduje się charakterystykę stanów pracy instalacji transportu pneumatycznego przy określonej prędkości gazu i wydajności przepływu masy.

Przeprowadzone badania dla większej liczby nastaw zostaną zebrane w bazie wiedzy, która posłuży do sterowania instalacją transportu pneumatycznego. Wypracowanie odpowiedniego sterowania ma szczególne znaczenie nie tylko dla zapobiegania blokowania instalacji, co zawsze związane jest z przestojem linii produkcyjnej, kosztami związanymi z usunięciem zatoru, ale także wzrostem zużycia energii podczas nieprawidłowej pracy instalacji. Doświadczenia zdobyte w trakcie eksperymentów oraz algorytmy sterowania opracowane dla badanej instalacji pomogą w przyszłości opracować podobne rozwiązania dla innych, przemysłowych instalacji. Uzyskanie optymalnego sposobu transportu materiału, często charakterystycznego dla danego materiału jest konieczne dla zapewnienia prawidłowego przebiegu procesu czy też uniknięcia degradacji materiału.

## Podziękowania

*Autorzy dziękują za wsparcie badań poprzez grant badawczy (167/6, PR UE/2007/7).*

## Literatura

- [1] Brown B.H., Barber D.C., Seagar A.D., *Applied potential tomography: possible clinical applications*. Clin. Phys. Physiol. Meas., vol. 6, 1985, 109–121.
- [2] Płaskowski A., Beck M.S., Thorn R., Dyakowski T., *Imaging Industrial flows, applications of electrical process tomography*. Institute of Physics Publishing, Bristol, 1995, 214.
- [3] Williams R.A., Beck M.S. (eds.), *Process Tomography: Principles, Techniques and Applications*. Butterworth-Heinemann, Oxford UK, 1995, 581.
- [4] Scott D.M., McCann H., *Process Tomography*. Edit by Scott & McCann, Process Imaging for Automatic Control, Taylor and Francis Group, 2005, 85–126.
- [5] Korbicz J., Kościelny J.M., Kowalczyk Z., Cholewa W. (red.), *Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania*. WNT, 2002, 828.
- [6] York T., *Status of electrical tomography in industrial applications*. Journal of Electronic Imaging, 10, 3, 2001, 608–619.
- [7] Jaworski A.J., Dyakowski T., *Investigations of flow instabilities within the dense pneumatic conveying system*. Powder Technology, vol. 125, 2002, 279–291.
- [8] Chaniecki Z., Sankowski D., *Monitorowanie i diagnozowanie stanów dynamicznych z użyciem tomografii procesowej*. Diagnostyka Procesów i Systemów, DPS 2007, materiały konferencyjne Słubice, 10–12 września 2007, ISBN 978-83-60434-31-4, 2007, 387–394, 456.
- [9] Chaniecki Z., *Algorytmy przetwarzania i analizy danych pomiarowych elektrycznej tomografii pojemnościowej w diagnostyce wybranych procesów przemysłowych*. Politechnika Łódzka, 2006, 210 (Rozprawa doktorska).

- 
- [10] Grudzień K., Romanowski A., Sankowski D., Aykroyd R., Williams R., *Advance statistical Computing for capacitance Tomography as a monitoring and control tool*. 5th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, IEEE, Wroclaw, September 8–10, 2005, 49–54.
- [11] Romanowski A., Grudzien K., Williams R.A., *Analysis and Interpretation of Hopper Flow Behaviour Using Electrical Capacitance Tomography*. Particle & Particle Systems Characterization, vol. 23, Issue 3–4, 2006, 297–305.
- [12] Chaniecki Z., Dyakowski T., Niedostatkiewicz M., Sankowski D., *Application of Electrical Capacitance Tomography for Bulk Solids Flow Analysis in Silos*. Particle & Particle Systems Characterization, vol. 23, 3–4, 2006, 306–312.
- [13] Grudzień K., *Algorytmy segmentacji dla potrzeb wizualizacji parametrów diagnostycznych przepływów wielofazowych w wybranych systemach przemysłowych*. Politechnika Łódzka, 2007, 198 (Rozprawa doktorska).