

DOI: 10.5604/20830157.1121349

## NIEINWAZYJNE METODY KONTROLNO-POMIAROWE W ZASTOSOWANIACH PRZEMYSŁOWYCH

**Grzegorz Rybak, Zbigniew Chaniecki, Krzysztof Grudzień, Andrzej Romanowski, Dominik Sankowski**

Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki Elektroniki Informatyki i Automatyki, Instytut Informatyki Stosowanej

**Streszczenie.** Systemy kontrolno-pomiarowe stanowią istotną grupę narzędzi diagnostycznych wykorzystywanych w przemyśle. Prawidłowo dobrane do charakteru procesu pozwalają na wczesne wykrywanie niepożądanych stanów procesu, dzięki czemu możliwe jest np. zapobieganie katastrofom przemysłowym. Nieustanny rozwój tych systemów powoduje, że są one coraz bardziej precyzyjne i efektywne, jednak od dokładności urządzeń często ważniejsze jest zgłębianie stanu wiedzy na temat natury badanych procesów. Na podstawie procesu grawitacyjnego przepływu substancji sypkich opisany został system pomiarowo-kontrolny, w skład którego wchodzi takie narzędzia jak: tensometry, akcelerometry oraz tomograficzne czujniki pojemnościowe. Wstępne wyniki przeprowadzonych eksperymentów potwierdzają skuteczność proponowanego systemu w odniesieniu do monitorowania przemysłowej instalacji przechowywania i rozładowywania materiałów sypkich, znajdującej się w Laboratorium Tomografii Procesowej im. T. Dyakowskiego Instytutu Informatyki Stosowanej.

**Słowa kluczowe:** pomiary, akcelerometr, tensometr, tomograf pojemnościowy, przemysł, sterowanie, transport, substancje sypkie

### NON-INVASIVE METHODS OF INDUSTRIAL PROCESSES CONTROL

**Abstract.** Monitoring and control systems constitute an important group of diagnostic tools used in the industry. When selected properly, they allow for the early detection of adverse conditions of the process, making it possible to prevent catastrophes. While these systems are becoming more precise and effective it is essential to exploring the state of knowledge about the nature of the processes that are the domains of their proper execution. Based on a process of gravitational flow of solids proposed measuring and control system is described, which includes tools such as strain gauges, accelerometers and capacitance tomography sensors. Preliminary results of conducted tests confirmed the efficiency of the proposed system for the monitoring of an installation for storage and unloading of bulk solids. The flow rig is located in the Tom Dyakowski Process Tomography Lab at the Institute of Applied Computer Science.

**Keywords:** measurements, accelerometer, strain gauge, capacitance tomography, industry, control, conveying, solid materials

### Wstęp

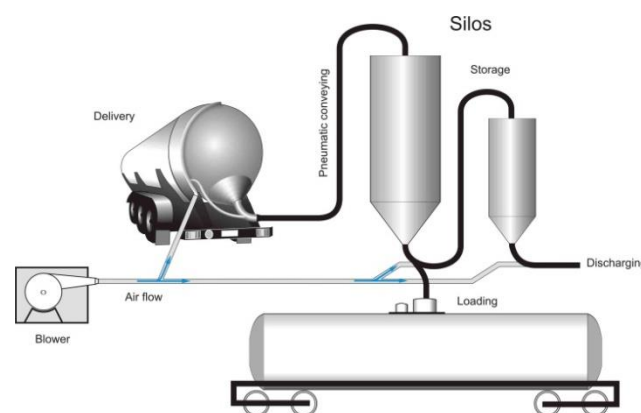
System sterowania, którego działanie opiera się na danych pomiarowych wielkości fizyko-chemicznych zjawisk towarzyszących kontrolowanemu procesowi, wymaga zastosowania odpowiedniego zestawu różnego rodzaju czujników. Zaś złożone algorytmy umożliwiające analizę stanu procesu. Czujnikami mierzone są np. wartości drgań i naprężeń konstrukcji, rozkładu materiału w zbiorniku czy rurociągu. Dzięki temu, możliwe jest wyznaczenie między innymi trajektorii ruchów ramienia robota, zmian ilości podawanego materiału w procesach przemysłowych czy chociażby wykrywaniu nieprawidłowości podczas badania diagnostycznego. Sensory pozwalają rejestrować niewyczuwalne przez człowieka zjawiska. W trakcie trwania każdego procesu, niezbędna jest kontrola wszystkich znaczących parametrów, dlatego niezwykle ważnym jest dobór odpowiednich narzędzi pomiarowych, zarówno inwazyjnych, jak i nieinwazyjnych. Poniżej opisany został system pomiarowo-kontrolny, wspierający proces transportu materiałów sypkich. To, co odróżnia go od innych rozwiązań, to właśnie nieinwazyjność.

### 1. Transport substancji sypkich

Proces transportu substancji sypkich można dzielić według różnych kryteriów. Zgodnie z podziałem na sposób, w jakim jest transportowany materiał można wydzielić dwa zasadnicze typy. Pierwszy to proces transportu pneumatycznego, który polega na przemieszczaniu porcji materiału, granulatu, pod wpływem ruchu czynnika transportowego, najczęściej powietrza sprężanego w instalacji rurociągowej. Kolejnym jest przemieszczanie, substancji pod wpływem siły grawitacji. Najczęściej jest to opróżnianie zbiornika przechowującego materiał sypki. Często w zastosowaniach przemysłowych oba wymienione procesy występują w jednym systemie transportu materiałów sypkich, co schematycznie zobrazowano na rys. 1.

W przypadku przepływu pneumatycznego, diagnostyka i monitorowanie systemu ma za zadanie m.in. zapobieganie blokowaniu rurociągu czy niszczeniu materiału, na skutek źle dobranych parametrów procesu. Natomiast w procesie przepływu grawitacyjnego, dotyczy analizy efektów dynamicznych, powstających w silosach w wyniku rezonansu między częstotliwościami samowzbudnych drgań przepływającego

materiału sypkiego, a częstotliwościami drgań własnych konstrukcji silosowej. Innymi niepożądanymi zjawiskami są np.: tworzące się łuki materiału nad otworem wylotowym blokującym wypływ materiału czy zjawisko powstawania dziury materiału (ang. rathole) w obszarze przepływu.



Rys. 1. Schemat przykładowej instalacji systemu transportowego materiałów sypkich

Brak kontroli przepływu może powodować straty finansowe, związane z koniecznością przerwania produkcji, a w sytuacjach skrajnych nawet katastrofy przemysłowe, gdzie zniszczeniu ulegają całe instalacje i infrastruktura konstrukcyjna, co może mieć również wpływ również na naturalne środowisko. Wszelkie wspomniane zjawiska, występujące w procesach transportu materiałów sypkich, związane są ze zmianami koncentracji materiałów sypkich. Analiza rozkładu materiału w badanym obiekcie dostarcza wiedzy na temat stanu procesu, co pozwala na poprawną diagnostykę procesu przepływu [2 - 6, 10, 11].

### 2. Nieinwazyjne metody pomiarowe

W przemyśle istnieje wiele implementacji systemów zarówno pomiarowych jak i kontrolnych. Jednak przeważnie systemy te w znaczący sposób ingerują w badany proces, tym samym powodując niepożądane skutki uboczne, w postaci zniszczenia materiału czy obciążenia eksploatacyjnego urządzeń danego procesu. Naprzeciw potrzebom przemysłu stają metody

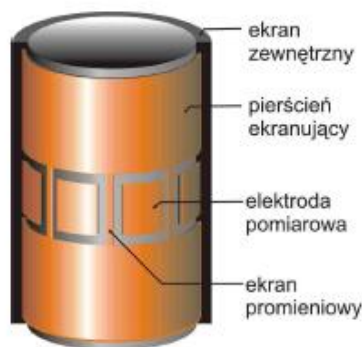
nieinwazyjne. Charakteryzują się brakiem jakiegokolwiek ingerencji w badany proces. Dzięki ich zastosowaniu nie jest konieczne, na przykład, dodawanie znaczników do materiałów transportowanych, montowanie czujników wewnątrz rur przesyłowych czy podobnych zabiegów umożliwiających prawidłową kontrolę procesów.

Jedną z nieinwazyjnych metod, wspierających proces transportu substancji sypkich jest tomografia procesowa. Nazwa tomografia pochodzi od greckich słów „tomoś” oraz „grafos”, co odpowiednio oznaczają: dzielić i zapisywać. Jest to metoda umożliwiająca badanie rozkładu materiału w przekroju poprzecznym obiektów, zwracając wyniki w formie obrazów. Jedną z najszybszych, a zarazem najłatwiej adoptowalnych do warunków przemysłowych, jest elektryczna tomografia pojemnościowa ECT (ang. electrical capacitance tomography). Ten rodzaj tomografii bazuje na pomiarze pojemności elektrycznej między parą elektrod znajdujących się na obrzeżach badanego obiektu. ECT umożliwia skuteczny pomiar przepływów materiałów dielektrycznych, czyli m.in. materiały sypkie, takie jak granulaty plastikowy, czy zboże. Główne elementy układu diagnostycznego to czujnik ECT oraz jednostka pomiarowa ECT. Czujnik ECT, w skład którego wchodzi pewna liczba elektrod, rozłożona wokół badanego obiektu. W przypadku transportu pneumatycznego jest to zazwyczaj kształt cylindryczny i 8 lub 16 elektrod. Na rys. 2 pokazano schemat czujnika ECT. Z zewnątrz czujnik pokryty jest ekranem eliminującym wpływ czynników zewnętrznych na pomiar. Pomiar pojemności elektrycznej dokonywany jest między każdą parą elektrod, w przypadku czujnika 8-elektrodowego wektor pomiarowy składa się z 28 niezależnych pomiarów,  $C=[C_{1,2}, C_{1,3}, \dots, C_{1,8}, C_{2,3}, C_{7,8}]$ . W tym przypadku pojemność jest określana jak we wzorze 1.

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\epsilon \epsilon_0 P}{d} \quad (1)$$

gdzie:  $P$  – pole powierzchni okładek,  $d$  – odległość między nimi.

Napięcie  $U$  doprowadzone do okładek kondensatora powoduje zgromadzenie na jednej z nich ładunku  $+Q$ , na drugiej  $-Q$ . Pojemność kondensatora  $C$  jest to stosunek zgromadzonego ładunku  $Q$  do różnicy potencjałów między okładkami kondensatora. Poniższy wzór opisuje zależność pojemności od fizycznych parametrów kondensatora.

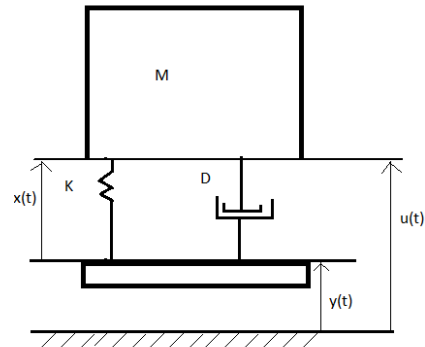


Rys. 2. Schemat jednopłaszczyznowego czujnika ECT

Pojemność elektryczna zależna jest od wartości przenikalności elektrycznej materiału, znajdującego się między elektrodami. Natomiast zmiany koncentracji materiału w obszarze czujnika wpływają bezpośrednio na zmiany wartości przenikalności dielektrycznej. Ta cecha powoduje, że koncentracja materiału sypkiego może być wyznaczona na podstawie mierzonych wartości pojemności elektrycznych. Fakt ten wykorzystywany jest w systemach tomografii, gdzie na bazie wektora pomiarowego konstruowany jest obraz rozkładu koncentracji materiału sypkiego w czujniku.

Innymi stosowanymi w omawianych procesach czujnikami nieinwazyjnymi są akcelerometry. Ich zasada działania bazuje na pomiarze drgań konstrukcji urządzenia, wykorzystując drugą zasadę dynamiki Newtona. W momencie przyłożenia siły,

elementy dynamiczne pozostają w miejscu w odniesieniu do zewnętrznego punktu odniesienia. Względem obudowy akcelerometru ulegają przemieszczeniu, co wpływa na zmianę wartości pomiaru według poniższego modelu [12].



Rys. 3. Model mechaniczny sensora przyspieszenia [1]

Sygnał przyspieszenia czujnika względem nieruchomego układu odniesienia zgodna z powyższym modelem ma opisany jest zależnością (2).

$$a(t) = \frac{d^2 y(t)}{dt^2} \quad (2)$$

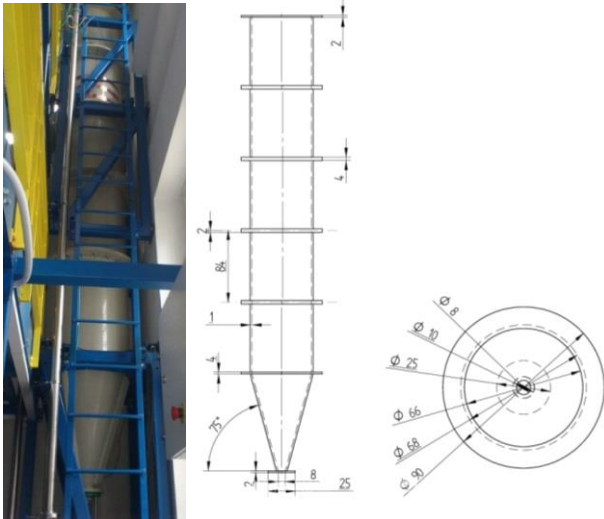
gdzie (patrz rys. 3 i zależność (2)):  $M$  – masa,  $K$  – stała sprężyny,  $D$  – współczynnik tarcia lepkiego tłumika,  $y(t)$  – położenie obudowy czujnika względem nieruchomego układu odniesienia,  $u(t)$  – położenie masy  $M$  względem nieruchomego układu odniesienia,  $x(t)$  – położenie masy  $M$  względem obudowy czujnika.

Akcelerometry oprócz pomiaru przyspieszenia materiału, mogą również służyć do badania jego wibracji. W przedstawianej instalacji transportu materiałów sypkich, stosuje się zestaw takich czujników, umieszczonych na obwodzie zbiornika, w celu uzyskania dodatkowych parametrów przepływu - drgań zbiornika. Dzięki uzyskaniu precyzyjnych informacji na temat efektów dynamicznych, rejestrowanych podczas trwania procesu, przy zastosowaniu algorytmów analitycznych, wyznacza się charakterystyczne stany przepływu, poprzedzające sytuacje niepożądane. Podejście to może stanowić znaczący wkład w prace nad mechanizmami zabezpieczającymi konstrukcje systemów transportowych.

### 3. Przepływ grawitacyjny materiałów sypkich

W Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej prowadzone są m.in. badania z zakresu transportu substancji sypkich [3, 4, 6]. W tym celu zbudowano laboratorium, wyposażone w zbiorniki, pompy oraz rurociągi. Najczęściej badanym materiałem jest granulaty plastikowy, w przemyśle wykorzystywany jest głównie we wtryskarkach. Jednak, z punktu widzenia badaczy z IIS, najistotniejszym elementem wyposażenia stanowisk jest zaawansowany sprzęt pomiarowo-kontrolny, w skład którego wchodzi czujniki, układy akwizycyjne oraz analityczne. Aparatura pomiarowa używana w trakcie badań oparta jest na sprzęcie znanej firmy National Instruments™, którego główny trzon stanowi kontroler PXI (jednostka centralna dedykowana akwizycji danych pomiarowych) oraz liczne karty pomiarowe.

Testy przeprowadzono wykorzystując przemysłową konstrukcję transportową, bazującą na modelach silosów (smukłym i kręłym) wykonanych z materiału PCW (rys. 4). Wysokość i średnica wewnętrzna silosu wynosi  $H = 5,3$  m i  $d = 0,66$  m (współczynnik smukłości  $h/d = 8,03$ ), grubość ściany wynosi 10 mm. Wysokość części leja osiąga  $HH = 1,08$  m, a część pojemnika  $HB = 4,22$  m [5]. Układ jest przybliżonym modelem rzeczywistych przemysłowych instalacji, a jego skala wyróżnia go spośród innych konstrukcji laboratoryjnych.



Rys. 4. Instalacja przepływu grawitacyjnego materiałów sypkich w Laboratorium im. T. Dyakowskiego w Instytucie Informatyki Stosowanej PL

Proces opróżniania zbiornika polega na opróżnianiu grawitacyjnym materiału przez otwór wylotowy o średnicy  $d_0 = 0,08$  m. Silos napełniany jest za pomocą pneumatycznego układu napełniania zbiornika. Badania obejmują granulaty polimerowy. Jego ziarna o gęstości  $960 \text{ g/cm}^3$ , mają cylindryczny kształt o średnicy około 3 mm i długości 3 mm. Mierzone są: zmiany koncentracji materiału (tomografem ECT), wibracje (akcelerometrami) oraz masa (czujnikami tensometrycznymi).

### 3.1. Pomiar drgań i wibracji materiału sypkiego

Do konstrukcji systemu wykorzystano zestaw ośmiu akcelerometrów z rodziny analogowych czujników MEMS, o nazwie własnej ADXL001-70. W porównaniu do innych czujników tego typu, charakteryzują się szerokim zakresem pracy  $\pm 70$  G. Analogowe dane pomiarowe wstępnie zostają przetwarzane przez programowalny układ pozwalający na ustawienie zarówno napięcia referencyjnego dla każdej osi pomiarowej jak i wzmocnienia sygnału. Urządzenie pomiarowe zasilane jest napięciem 24 V i pobiera 0,8 A. Wykonuje on pomiary w trzech osiach uwzględniając napięcie referencyjne. Dane pomiarowe przetwarzane są przez układ analogowego wzmocnienia i układ konwertera AD. Ostatecznie dane zostają wysłane do kontrolera przy wykorzystaniu interfejsu Ethernet 10 Mb/s (protokół UDP).

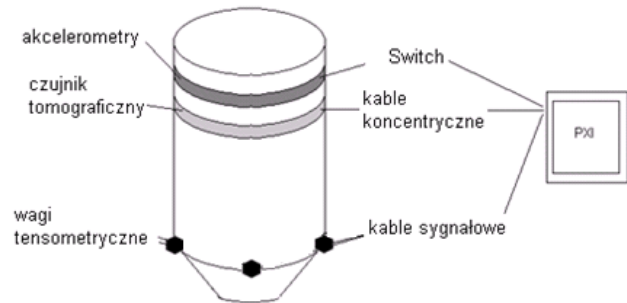
Ostatnią, z omawianych, grupą czujników nieinwazyjnych wykorzystanych do implementacji systemu kontroli procesu transportu substancji sypkich są tensometry. Pomiary bazujące na tego typu sensorach mają szerokie zastosowanie nie tylko w przemyśle. Jednym z przykładów jest zastosowanie tensometrów w pomiarze nacisku zbiorników przechowujących różne materiały. Pomiar wykonuje się w celu zbadania zmian ciężkości podczas napełniania, opróżniania zbiornika jak i kontroli ciężkości podczas przechowywania materiału. Dodatkowym parametrem może być parametr rozkładu materiału w zbiorniku opisujący, rozkład nacisku zbiornika na mocowania zbiornika.

Wszystkie opisane powyżej czujniki znalazły swoje zastosowanie w istniejącym systemie transportu materiałów sypkich. Zostały one połączone w jedno spójne narzędzie metrologiczne, pozwalające na badanie procesu omawianego procesu przepływu [4]. System ten jest złożonym narzędziem pomiarowym, którego zaawansowane elementy metrologiczne, komunikacyjne oraz analityczne przedstawiono schematycznie na rys. 5.

W podstawie konstrukcji zbiornika przechowującego materiał sypki umieszczono pomiarowe belki tensometryczne - wagi. Na obwodzie silosu, w jego górnej części umieszczono czujniki akcelerometryczne. Poniżej umieszczono czujnik tomograficzny. Wszystkie dane pomiarowe przez odpowiednie połączenia i protokoły trafiają do jednostki obliczeniowej PXI (firmy

National Instruments<sup>TM</sup>). W części analitycznej systemu, zaimplementowano wielomodułową aplikację wspierającą pomiary w graficznym języku programowania „G” (LabVIEW). LabVIEW jest środowiskiem programistycznym dedykowanym tworzeniu aplikacji pomiarowych, kontrolnych jak i komunikacyjnych.

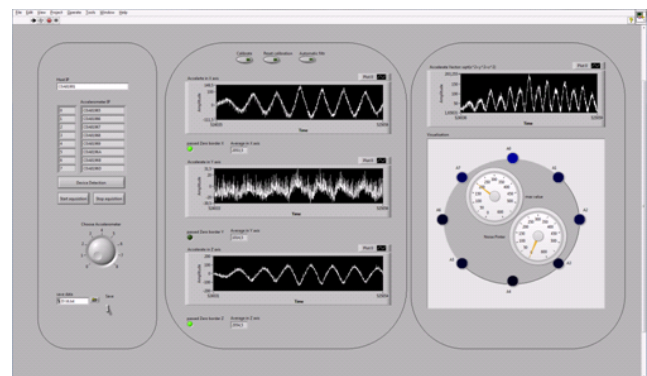
Pozwala tworzyć zarówno niewielkie moduły jak i skomplikowane systemy pomiarowe. Dodatkowo umożliwia efektywną pracę nad aplikacją, przynosząc wymierne rezultaty. Środowisko to udostępnia bogaty zestaw kontrolki, w których skład wchodzi liczne przełączniki, suwaki, wykresy itp., dzięki czemu programista w szybki sposób, umieszcza jedynie odpowiednie obiekty na wirtualnym panelu synoptycznym. W ten sposób dbając jedynie o prawidłowe połączenia modułów, może zbudować tablicę kontrolną niemal każdego urządzenia.



Rys. 5. Schemat rozmieszczenia urządzeń pomiarowych i sensorów na zbiorniku transportowym

Zaimplementowany w tym środowisku system składa się z części akwizycyjnych, modułów analizy danych oraz wizualizacji danych pomiarowych. Całość modułu wizualizacyjnego opiera się o tablice synoptyczne, gdzie użytkownik w prosty i intuicyjny sposób może sterować procesem, kontrolując wybrane parametry przepływu. Główna aplikacja posiada zakładki odpowiadające rodzajowi czujników. Po przejściu na wybraną zakładkę, otwiera się panel sterujący, który zawiera edytowalną konfigurację inicjalizacyjną. W tym miejscu możliwy jest dobór odpowiednich parametrów systemu pomiarowego takich jak częstotliwości próbkowania, wzmocnienia czy napięcia referencyjne. Dla modułu pomiarów akcelerometrycznych tablica synoptyczna zawiera trzy główne panele (rys. 6). Pierwszy z nich odpowiada za automatyczną detekcję czujników w sieci (komunikacja oparta na protokole UDP) oraz wybór konkretnego czujnika, którego pomiary zostają wizualizowane w panelu drugim.

W celu wyświetlenia danych, czujniki w systemie poddane zostają procesom kalibracji i tarowaniu, a przed wyświetleniem pomiary są filtrowane (filtry oparte o algorytm DFT oraz filtry progowe). Panel trzeci umożliwia jednoczesną kontrolę wszystkich ośmiu czujników przyspieszenia. Wizualizacja (rys. 6) przedstawia akcelerometry rozmieszczone w równych odstępach na obwodzie zbiornika. Każda kontrolka odpowiada za konkretny czujnik, świecąc na odcienie kolorów: niebieskiego, zielonego oraz czerwonego w zależności od amplitudy drgań kontenera. Dodatkowo użytkownik może ustawić wymagane nastawy programowe wzmocnień pomiarów.



Rys. 6. Tablica synoptyczna modułu macierzy akcelerometrów



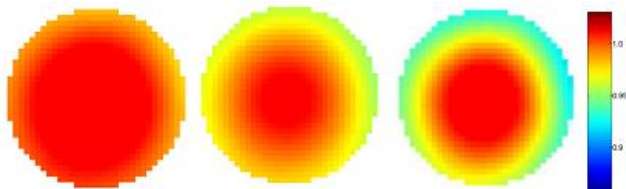
### 3.2. Pomiar zmian koncentracji materiału sypkiego

Na kolejnej zakładce wirtualnego panelu synoptycznego, umieszczono wizualizację pomiarów tomograficznych poddanych procesowi konstrukcji obrazu za pomocą algorytmu Linear Back Projection (rys. 10) Pomiar ten stanowi podstawę kontroli rozkładu materiału w przekroju poprzecznym zbiornika (rys. 7) lub rurociągu oraz jego koncentrację w poszczególnych odcinkach systemu (rys. 8).



Rys. 7. Czujnik pomiarowy ECT umieszczony wewnątrz silosu

Zastosowaniem tomografii ECT do systemów monitorowania grawitacyjnego przepływu m.in. zespół tomografii procesowej IIS zajmuje się od dawna [2, 3, 4, 7]. Badania prowadzone w przeszłości koncentrowały się głównie na pomiarach zmian koncentracji materiału podczas kontrolowanego rozładowania silosów zawierających polimerowy granulat. W kolejnych badaniach udowodniono wpływ zmiennych parametrów (początkowa gęstość i chropowatości ścian) na amplitudę zmian poziomów koncentracji, jak również zmiany szerokości lokalizacji odczynań w granicach strefy zmiany koncentracji, które uwidoczniono za pomocą zrekonstruowanego obrazu (rys. 8).



Rys. 8. Przykładowe wyniki rozkładu materiału sypkiego dla ściany szorstkiej silosu

## 4. Wizualizacja pneumatycznego przepływu materiałów sypkich

System transportu pneumatycznego materiałów sypkich zbudowany w laboratorium w Instytucie Informatyki Stosowanej PŁ służy m.in. do transportu materiału między zbiornikami. Kolejny moduł aplikacji służy do rejestracji zmian koncentracji materiału w trakcie pneumatycznego przepływu typu korkowego (*ang. plug flow*). Zapewnienie odpowiedniego reżimu przepływu jest bardzo istotne. Nieprawidłowy typ przepływu może doprowadzić do niszczenia materiału, degradacji, obniżenia efektywności transportu, z jednoczesnym wzrostem kosztów energii oraz blokady materiału. Blokada materiału może być bardzo kłopotliwa. Zatrzymanie procesu transportu w skrajnych przypadkach usunięcie blokady może wymagać rozebrania fragmentu rurociągu.

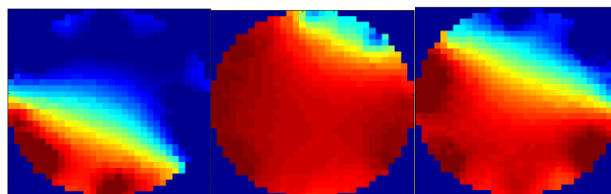
W tym celu implementowane są m.in. algorytmy pozwalające na wykrycie miejsc o zwiększonej koncentracji substancji, tak aby zapobiegać niekorzystnym zjawiskom. Polegają one na wykrywaniu początku i końca występowania korków. Metoda ta opiera się na „kryterium klasyfikacji obszaru do korka” [2, 7]. Uzyskane w ten sposób informacje pozwalają na wyznaczenie obszarów o zwiększonej koncentracji materiału, oraz prędkości przepływu substancji.

Prowadzone badania dotyczą poziomego odcinka linii przesyłowej (rys. 9). W odcinku poziomym zainstalowany został zestaw czujników ECT składający się z dwóch sensorów 8 elektrodowych.



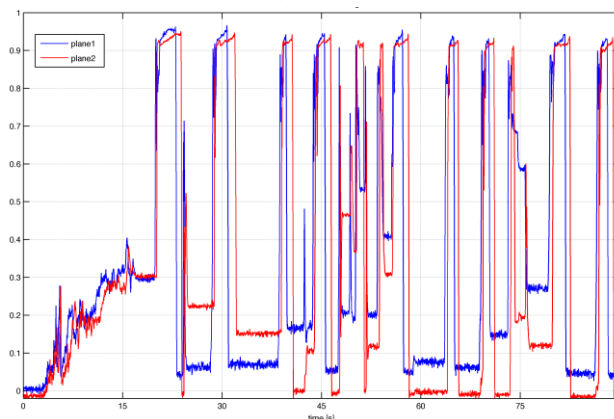
Rys. 9. Zdjęcie dwupłaszczyznowego modułu pomiarowego sekcji poziomej przepływu pneumatycznego

Czujniki te zostały podłączone do tomografu ECT, który komunikuje się z komputerem zbierającym, wizualizującym (rys. 10) i analizującym pomiary, w celu wypracowania odpowiednich nastaw regulacji procesu.



Rys. 10. Przykładowe zrekonstruowane obrazy, przedstawiające rozkład materiału w przekroju rurociągu

Na podstawie pobieranych z użyciem tomografu danych wyznaczone są średnie wartości koncentracji materiału w poprzecznym przekroju rurociągu oraz prędkości przepływu substancji w instalacji (rys. 11). Informacje te stanowią podstawę dla algorytmów kontroli procesu transportu.



Rys. 11. Przykładowa charakterystyka zmian koncentracji materiału w czasie dla czujników umieszczonych w dwóch płaszczyznach przekroju z rys. 9., umieszczonych na poziomym odcinku rurociągu

## 5. Podsumowanie

Materiały sypkie są istotnym półproduktem w wielu gałęziach przemysłu. Prace związane z pomiarem przepływów materiałów sypkich są odpowiedzią na potrzeby przemysłu, jak również ośrodków naukowych zajmujących się analizą zjawisk występujących podczas ich transportu. Na całym świecie istnieje zaledwie kilka instytucji akademickich zajmujących się badaniem szeroko rozumianych procesów przepływu substancji sypkich jak i konstrukcją oraz zastosowaniem systemów pomiarowo-kontrolnych operujących w tej dziedzinie.

Z punktu widzenia fizyki zjawisk zachodzących w procesach przepływu grawitacyjnego i pneumatycznego, monitorowaniu poprawnego przebiegu procesu podlegają różne zjawiska. Diagnostyka obu systemów transportu ma za zadanie m.in. zapobieganie blokowaniu rurociągu czy niszczeniu materiału w przypadku przepływu pneumatycznego. Natomiast monitorowanie procesu przepływu grawitacyjnego, dotyczy głównie analizy efektów dynamicznych, powstającymi w silosach.

W ramach omawianych badań opracowano system, dedykowany do pracy w instalacji transportu substancji sypkich procesów pneumatycznego napełniania oraz grawitacyjnego opróżniania silosów. System ten jest autorskim oprogramowaniem powstającym zgodnie z potrzebami naukowców - głównych użytkowników systemu w Laboratorium im. Tomasza Dyakowskiego w Instytucie Informatyki Stosowanej Wydziału Elektrotechniki, Elektroniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Łódzkiej. Zaprojektowany i zaimplementowany system, pozwala na łatwy i intuicyjny dostęp do danych pochodzących z czujników. System, który składa się z wielu modułów zarówno metrologicznych jak i wizualizacyjnych, zawiera funkcjonalności umożliwiające akwizycję danych z czujników tomograficznych, zestawu sensorów tensometrycznych oraz akcelerometrów służących do badania drgań konstrukcji i materiału. Przy wykorzystaniu algorytmów analizy danych pomiarowych umożliwia on użytkownikowi przetwarzanie danych w czasie rzeczywistym oraz zapobieganie sytuacjom krytycznym pracy systemu. Kolejne moduły aplikacji służą do: kalibracji i tarowania urządzeń, filtrowania sygnału (usuwania szumów), wyznaczenia długości wektora przyspieszenia na podstawie pojedynczych wartości przyspieszeń pochodzących z trójwymiarowego układu pomiarowego oraz wizualizację danych.

Przeprowadzone eksperymenty ukazały autorom pewną prawidłowość w zmianach koncentracji materiału podczas opróżniania zbiornika. Dla materiału luźnego, w trakcie opróżniania zbiornika następował wzrost koncentracji materiału w rejonie ścian zbiornika. Przy użyciu materiału gęstego natomiast, zwiększenie koncentracji widoczne było w rejonie środkowym przekroju poprzecznego zbiornika. Fakt ten może być przyczyną zmniejszenia efektów dynamicznych występujących podczas procesu transportu wraz ze wzrostem skali zbiorników instalacji transportowej.

## Podziękowania

Praca naukowa dotycząca badań przepływu pneumatycznego materiałów sypkich finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2012-2014 nr projektu IP2011 016271. Badania przepływu grawitacyjnego finansowane były ze środków budżetowych w latach 2009-2012 nr projektu N505 368737.

## Literatura

- [1] Buchczik D., Ilewicz W., Piotrowski J., Waluś S., Wyżgolik R., Żelezik J.: Pomiar. Czujniki i metody pomiarowe wybranych wielkości fizycznych i składu chemicznego, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2009.
- [2] Chaniecki Z.: Algorytmy przetwarzania i analizy danych pomiarowych elektrycznej tomografii pojemnościowej w diagnostyce wybranych procesów przemysłowych - rozprawa doktorska, Łódź, 2006.
- [3] Chaniecki Z., Sankowski D.: Monitorowanie i diagnozowanie stanów dynamicznych z użyciem tomografii procesowej. Korbicz J. (red.): Diagnostyka procesów i systemów. Warszawa 2007, s. 388-394.
- [4] Chaniecki Z., Grudzień K., Jaworski T., Rybak G., Romanowski A., Sankowski D.: Diagnostic system of gravitational solid flow based on weight and accelerometer signal analysis using wireless data transmission technology. Diagnostic of gravitational solid, vol. 17, no. 4, 2013, pp. 319-326.
- [5] Grudzień K., Chaniecki Z., Rybak G., Niedostatkiewicz M., Matusiak B., Romanowski A.: Multi-measurement system of gravitational flow process in slim large-scale silo, 7th World Congress on Industrial Process Tomography, WCIP17, Kraków, 2013.
- [6] Grudzień K., Romanowski A., Chaniecki Z., Niedostatkiewicz M., Sankowski D.: Description of the silo flow and bulk solid pulsation detection using ECT. Flow Measurement and Instrumentation, 21, 2010, p. 198-206.
- [7] Jaworski A. J., Dyakowski T.: Tomographic measurements of solids mass flow in dense pneumatic conveying. What do we need to know about the flow physics?, Proceedings of 2nd World Congress on Industrial Process Tomography, Hannover, Germany, pp. 353-361.

- [8] Płaskowski A., Beck M. S., Thorn R., Dyakowski T.: Imaging Industrial flows, applications of electrical process tomography, Institute of Physics Publishing, Bristol, 1995.
- [9] Romanowski A., Grudzień K., Aykroyd R., Williams R.: Advanced Statistical Analysis as a Novel Tool to Pneumatic Conveying Monitoring and Control Strategy Development, Particle & Particle Systems Characterization. vol. 23, no. 3-4, 2006, p. 289-296.
- [10] Scott D. M., McCann H.: Process Imaging for Automatic Control, CRC, 2005.
- [11] Sikora J., Wójtowicz S.: Industrial and Biological Tomography. Electrical Capacitance Tomography. Theoretical Basis and Applications, Instytut Elektrotechniki, 2010.
- [12] Żółtowski B.: Podstawy diagnozowania maszyn. Wydawnictwo Uczelniane Uniwersytetu Techniczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, 2011.

**Mgr inż. Grzegorz Rybak**  
e-mail: grybak@kis.p.lodz.pl



Doktorant IIS. Magister inżynier w dziedzinie Informatyka, specjalność Systemy Sieciowe i Rozproszone, WEIEA PL (2012). Od 2011 roku pracuje na stanowisku programisty, początkowo w firmie Transition Technologies S.A., a od 2012r. w Rule Financial sp. z o.o. Naukowo obecnie zajmuje się badaniem zjawisk w instalacjach przemysłowych i programowaniem przemysłowych urządzeń pomiarowych.

**Dr inż. Zbigniew Chaniecki**  
e-mail: zch@kis.p.lodz.pl



Adiunkt IIS. Doktor nauk technicznych, w dziedzinie Informatyka, specjalność Tomografia Procesowa, WEIEA PL (2006). Magister inżynier Automatyki i Robotyki, WEE PL (1996). Zajmuje się przemysłowymi systemami kontrolno-pomiarowymi, diagnostyką i monitorowaniem procesów transportu materiałów sypkich, bezprzewodowymi metodami transmisji danych, przetwarzaniem i analizą dużych zbiorów i strumieni surowych danych (ang. raw data), zagadnieniami e-kształcenia oraz przetwarzaniem bez granic. Programuje w wielu językach, w tym w LabVIEW.

**Dr inż. Krzysztof Grudzień**  
e-mail: kgrudzi@kis.p.lodz.pl



Adiunkt IIS. Członek Zarządu Oddziału Łódzkiego ACM. Doktor nauk technicznych, w dziedzinie Informatyka, specjalność Tomografia Procesowa, WEIEA PL (2007). Zajmuje się zastosowaniami bezinwazyjnych technik obrazowania i identyfikacji parametrów dynamicznych procesów przemysłowych, opracowaniem algorytmów przetwarzania i analizy obrazów ze szczególnym uwzględnieniem sekwencji 2D obrazów tomograficznych pochodzących z systemów elektrycznej tomografii pojemnościowej oraz promieni X.

**Dr inż. Andrzej Romanowski**  
e-mail: a.romanowski@kis.p.lodz.pl



Adiunkt IIS. Prezes Oddziału Łódzkiego PTI oraz ACM. Doktor nauk technicznych, w dziedzinie Informatyka, specjalność algorytmów przetwarzania danych tomograficznych, WEIEA PL (2008). Zajmuje się rozwojem i zastosowaniem metod tomograficznych w przemyśle oraz czynnikami ludzkimi w przetwarzaniu bez granic i interakcji człowiek-komputer.

**Prof. dr hab. inż. Dominik Sankowski**  
e-mail: dsan@kis.p.lodz.pl



Dyrektor IIS. Członek: IEEE Computer Society, Communication Director w prezydium International Society of Process Tomography, Sekcji Elektrotechniki Polskiej Akademii Nauk (od 1994), PKA, KAUT, UKA. Profesor zwyczajny (2001). Profesor nadzwyczajny PL (1998). Habilitacja WE PL (1989). Doktor nauk technicznych WE PL (1979). Magister inżynier Elektrotechniki, WE PL (1970) oraz magister Matematyki, specjalność Metody Numeryczne (1973). Zajmuje się analizą i przetwarzaniem obrazów, rozpoznawaniem obrazów, systemami inteligentnymi, inżynierią oprogramowania, przetwarzaniem danych, systemami czasu rzeczywistego systemami informatycznymi w zarządzaniu, identyfikacją on-line obiektów przemysłowych oraz automatyzacją procesów cieplnych.

otrzymano/received: 28.10.2013

przyjęto do druku/accepted: 09.02.2014