

Krzysztof Grudzień*, Zbigniew Chaniecki*, Andrzej Romanowski*,
Jakub Betiuk*, Bartosz Matusiak*, Dominik Sankowski*

Monitorowanie przemysłowych systemów przepływu grawitacyjnego materiałów sypkich w silosach o dużych gabarytach z użyciem tomografii ECT – badania wstępne

1. Wprowadzenie

W zastosowaniach przemysłowych materiały sypkie bardzo często przechowuje się w silosach. Szacuje się, iż około 60% wszystkich materiałów stosowanych w produkcji przemysłowej ma postać granulatu. W przyrodzie surowce występują zarówno w postaci sypkiej naturalnie, np. piaski, żwiry; jak i są one do tej formy sprowadzane w procesie wydobycia, np. tłuczeń kamienny, czy też produkcji, np. granulatu plastikowego.

Sam podział silosów ukazuje ich różnorakie przeznaczenie. Poniżej zestawiono podstawowe podziały silosów [4, 7, 13, 14, 19].

Dzieli się je zasadniczo na dwie grupy:

- silosy zbożowe (podział ze względu na pojemność): indywidualne, zbiorcze, portowe;
- silosy przemysłowe stosowane do przechowywania: koksu, węgla lub innych materiałów sypkich zarówno spożywczych (np. cukru), farmaceutycznych, jak i przemysłowych (np. piasku, nawozów sztucznych, granulatu plastikowego).

W zależności od zastosowanego kryterium wyróżniamy:

- ze względu na usytuowanie: silosy zewnętrzne i silosy wewnętrzne; stałe lub przenośne;
- pod względem konstrukcyjnym: silosy żelbetowe, metalowe; z tworzyw sztucznych, z siatki lub blachy dziurkowanej; drewniane; z płyt włókna drzewnego;
- pod względem proporcji: krępe (średnica stanowi $0,5 \div 1$ ich wysokości), smukłe (wysokość wynosi kilka do kilkunastu jego średnic);
- pod względem kształtu komory: cylindryczne, o przekroju wielokątnym (najczęściej prostokątne);

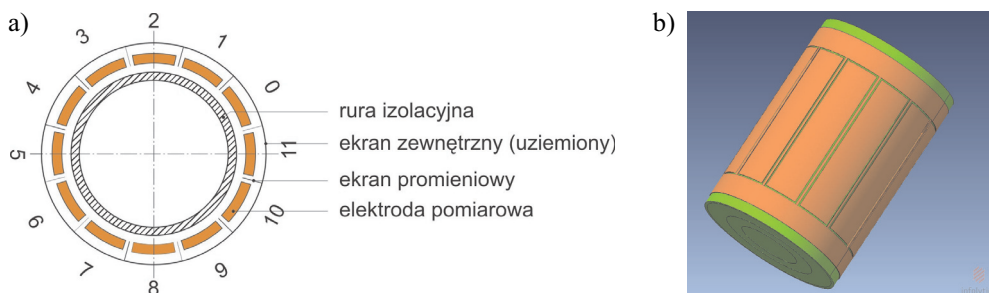
* Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka

- pod względem kształtu dolnej części silosu:
 - stożkowe (opróżniane grawitacyjnie);
 - płaskodenne, ze względu na położenie otworu wylotowego:
 - z otworem wylotowym w dnie (opróżniane grawitacyjnie – część stożkowa tworzy się naturalnie w dolnej części silosu podczas opróżniania grawitacyjnego, zaś całkowite opróżnienie wymaga dodatkowej ingerencji),
 - z otworem wylotowym przy dnie (opróżnianie następuje przy pomocy wybieraka ślimakowego, który może niszczyć materiał).

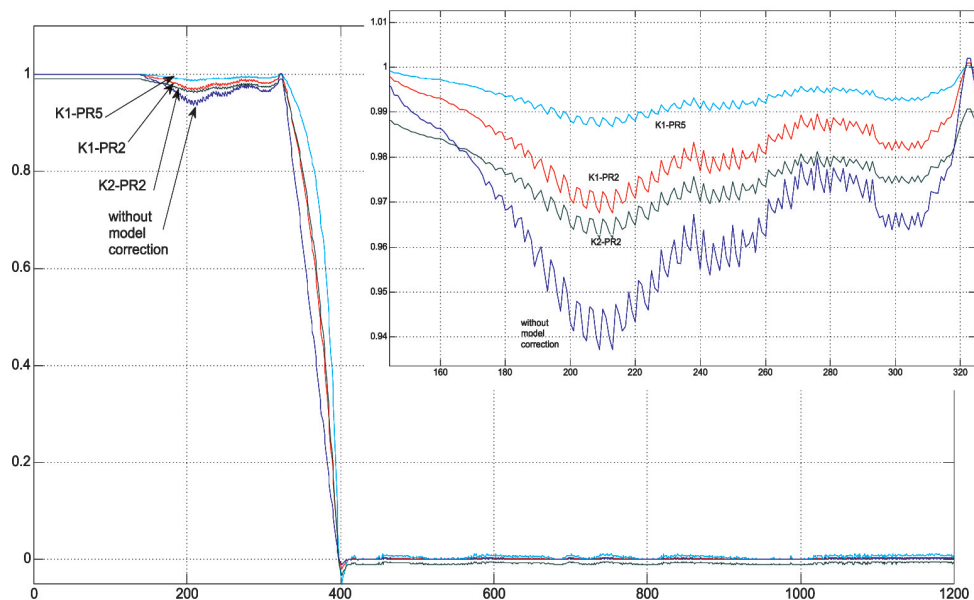
Do tej pory w centrum zainteresowania autorów niniejszego opracowania znajdowały się głównie silosy przemysłowe, wewnętrzne, z tworzyw sztucznych, smukłe, cylindryczne, płaskodenne, opróżniane grawitacyjnie przez otwór znajdujący się centralnie w dnie zbiornika [4, 7, 14]. Badane były również silosy o przekroju prostokątnym, o proporcjach zbliżonych do silosów krępych. Narzędziem pomiarowym była elektryczna tomografia pojemnościowa (ECT – *Electrical Capacitance Tomography*) [12, 15]. Na obecną chwilę wszystkie wspomniane silosy były silosami laboratoryjnymi nieprzekraczającymi średnicy 0,2 m. W zastosowaniach przemysłowych spotkać można wiele zbiorników o średnicach większych niż 0,5 m, a w takim przypadku najistotniejszą rolę odgrywa przygotowanie odpowiedniego czujnika ECT. Wiele prac badawczych porusza problem projektowania oraz budowy czujników ECT [5, 8, 10, 11, 20, 21]. Jednak brak badań, które mogą określić, już na etapie projektu, przydatność czujnika o dużych gabarytach, stanowi istotny problem z punktu widzenia zastosowania technik tomograficznych w środowisku przemysłowym.

2. Pomiar przepływu grawitacyjnego materiałów sypkich za pomocą tomografu ECT

Z punktu widzenia przydatności części sprzętowej systemu pomiarowego ECT (w skład którego wchodzi tomograf oraz czujnik ECT), do monitorowania stanów procesu rozładowywania silosów cylindrycznych, najistotniejszym elementem jest możliwość pomiaru niewielkich zmian koncentracji materiałów sypkich z zachowaniem odpowiedniego poziomu stosunku sygnału do szumu. Badania szczegółowe z użyciem 12-elektrodowego czujnika pomiarowego o średnicy 0,2 m (przedstawionego na rys. 1) pokazały, że analiza wyników pomiarów bezpośrednich (danych surowych) uzyskanych dla różnych poziomów wysokości silosu, pozwalają na pomiar amplitudy i częstotliwości pulsacji związanych ze zmianami koncentracji w strefie przyściennej (rys. 2). Możliwy był również pomiar wpływu szorstkości ścian oraz początkowej gęstości upakowania materiału sypkiego [7]. Z punktu widzenia tematyki niniejszego artykułu istotna jest możliwość detekcji niewielkich zmian koncentracji na podstawie analizy zmian wartości surowych danych pomiarowych.

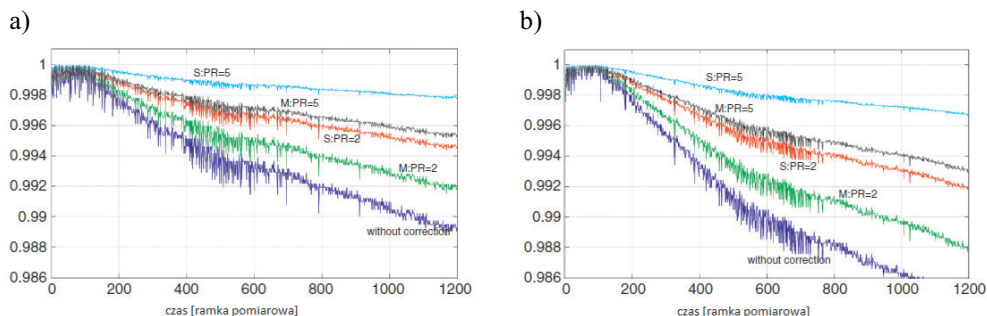


Rys. 1. Schemat czujnika do pomiarów z zastosowaniem metody ECT:
a) widok przekroju czujnika, b) rozkład przestrzenny elektrod



Rys. 2. Przykładowe zmiany koncentracji materiału sypkiego, otrzymane z surowych danych pomiarowych, dla obszaru przyściennego silosu ze ścianami gładkimi na wysokości $h = 1,5$ m nad otworem wylotowym (oś odciętych prezentuje czas, jako jednostkę przyjęto pojedynczą ramkę pomiarową, oś rzędnych prezentuje względne zmiany wartości pomiarowych pojemności między elektrodami przyległymi)

Otrzymane wyniki pomiarowe oscylacji materiału pojawiających się w trakcie opróżniania silosów, zarówno zrekonstruowane obrazy tomograficzne, jak i danych pomiarowych, cechują niewielkie zmiany sygnału. W celu weryfikacji zmian sygnałów pomiarowych przeprowadzono dodatkowe serie pomiarów dotyczącą grawitacyjnego przepływu kontrolowanego, w którym całe dno silosu przesuwano się z zadaną prędkością.



Rys. 3. Zmiany wartości pomiarowych (danych surowych) dla elektrod przyległych przepływu kontrolowanego piasku gęstego z prędkością opadania dna silosu 0,1 mm/s: a) czujnik na wysokości $h = 1,0$ m; b) czujnik na wysokości $h = 1,5$ m, S – oznacza szeregową korekcję danych pomiarowych, M – oznacza korekcję Maxwella danych pomiarowych (oś rzędnych prezentuje względne zmiany wartości pomiarowych pojemności między elektrodami przyległymi)

Otrzymane pomiary zostały zinterpretowane przez autorów jako najmniejsze zmiany sygnału, które możliwe są do rozpoznania jako efekt oscylacji materiału. Poniżej ustalonego poziomu zmiana sygnału była interpretowana jako szum pomiarowy. Na rysunku 3 zostały pokazane przykładowe pomiary dla przepływu kontrolowanego z prędkością obniżania dna silosu 0,1 mm/s [7].

Obecnie prowadzone są prace, które zmierzają do zastosowania technik tomograficznych do pomiaru przepływu grawitacyjnego materiałów sypkich w zbiornikach o zdecydowanie większych średnicach niż dotychczas. Na podstawie zebranej wiedzy, można było przyjąć założenie, że zmiana średnicy nie wnosi zmian w metodyce pomiaru i analizie danych w przekroju zbiornika. Potwierdzały to badania na zbiornikach o średnicy do 0,2 m [7]. Taka wiedza, udowodniona eksperymentalnie, pozwalała rozszerzać te założenia na większe średnice. Obecny wzrost mocy obliczeniowych komputerów pozwala na stosowanie bardziej złożonych algorytmów, a większa dokładność tomografów na zwiększanie parametrów geometrycznych czujników.

3. Analiza map czułości jako element oceny jakości czujnika ECT

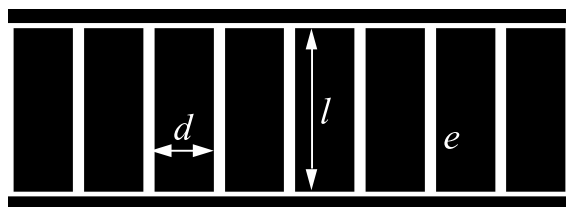
Kluczowym elementem prac związanych z zastosowaniem tomografii ECT do pomiaru przepływu grawitacyjnego materiałów sypkich w zbiornikach o dużych średnicach ($> 0,5$ m) jest projekt oraz wykonanie czujników pomiarowych. W przypadku silosów o średnicach do 0,2 m wykonanie czujnika 2D nie wiązało się z dużymi kosztami jego wytworzenia i nie stanowiło to najistotniejszego elementu prac badawczych. Dla czujników ECT docelowo montowanych na zbiornikach o średnicach 0,5–1,5 m aspekt ten staje się najbardziej znaczący w kontekście prowadzonych prac badawczych. Przed przystąpieniem do prac projektowych nad czujnikami należy brać pod uwagę możliwości pomiarowe tomografu ECT z uwzględnieniem zarówno rozmiaru elektrod, jak i jakości sygnału pomiarowego.

Z tego względu istotną rolę odgrywa symulacja rozkładu pola elektrycznego w czujniku pomiarowym ECT. W artykule [3] opisano i porównano wyniki zarówno eksperymentalne, jak i symulacje komputerowe rozkładu koncentracji materiału sypkiego w przestrzeni czujnika zewnętrznego 12-elektrodowego (rys. 1). Pozwoliło to na lepsze zrozumienie i interpretację otrzymywanych rezultatów zastosowania tomografu ECT z analizowanym czujnikiem. Rezultatem innych prac było wyznaczenie możliwości pomiarowe tomografu ECT z wspomnianym czujnikiem 12-elektrodowym dla znanego upakowania piasku wewnątrz obszaru pomiarowego [6].

W niniejszym artykule opisano badania porównujące czujniki ECT (8- oraz 12-elektrodowe) już na etapie projektowania, na podstawie analizy numerycznej rozkładu pola elektrycznego w czujniku pomiarowym o dużych średnicach. W celu przeprowadzenia analizy porównawczej przygotowano projekty 6 czujników pojemnościowych, których wymiary geometryczne zostały przedstawione w tabeli 1. Średnica projektowanych czujników w każdym przypadku wynosiła 0,65 m. Na rysunku 4 pokazano poszczególne wymiary dla 8-elektrodowego czujnika (oznaczenia są takie same dla czujnika 12-elektrodowego). Wysokość ekranu ochronnego górnego oraz dolnego wynosiła 0,03 m.

Tabela 1
Rozmiary geometryczne czujników ECT

Lp.	Liczba elektrod	Długość elektrod l [m]	Szerokość elektrod d [m]	Przerwa między elektrodami, e [m]
1	8	0,65	0,215	0,02
2	8	0,3	0,235	0,01
3	8	0,2	0,245	0,005
4	12	0,65	0,13	0,02
5	12	0,3	0,15	0,01
6	12	0,2	0,16	0,005



Rys. 4. Schemat czujnika do pomiarów z zastosowaniem metody ECT:
a) widok przekroju czujnika; b) rozkład przestrzenny elektrod

W celu porównania możliwości detekcji niewielkich zmian koncentracji materiału sypkiego zostały wyznaczone macierze czułości projektowanych czujników. Najczęściej używana metoda wyznaczania rozkładu czułości pomiarowej systemu ECT jest oparta na

analizie rozkładu pola elektrycznego wewnątrz czujnika ECT [1, 3, 9, 16, 17, 18]. Mapy czułości dla poszczególnych par elektrod ($i - j$) oraz k -elementu siatki wyznaczyć można za pomocą równania (1):

$$S_{ij}^{(k)} = - \int_{\Omega_k} \mathbf{E}_i^{(k)} \cdot \mathbf{E}_j^{(k)} d\Omega \quad (1)$$

gdzie $\mathbf{E}_i^{(k)}$ jest wektorem pola elektrycznego wewnątrz elementu k , kiedy elektrodą aktywną jest elektroda i , $\mathbf{E}_j^{(k)}$ jest wektorem pola elektrycznego wewnątrz elementu k , kiedy elektrodą aktywną jest elektroda j . Ω_k jest obszarem elementu k siatki, na jaką został podzielony obszar czujnika w celu wyznaczenia metodą elementów skończonych rozkład pola elektrycznego.

Powyższe rozważania opierają się na dwóch założeniach. Częstotliwość źródeł prądów zmiennych w systemach tomograficznych jest relatywnie niewielka, dlatego też zagadnienia związane z wyznaczaniem czułości pomiarowej mogą pomijać obecność pola magnetycznego. Dodatkowo przy założeniu braku ładunków przestrzennych rozkład pola elektrycznego można wyznaczyć za pomocą równania Laplace'a:

$$\nabla \cdot [\varepsilon(x, y, z) \nabla \varphi(x, y, z)] = 0 \quad (2)$$

gdzie $\varepsilon(x, y, z)$ jest przestrzennym rozkładem przenikalności, $\varphi(x, y, z)$ jest przestrzennym rozkładem potencjałów elektrycznych, ∇ jest operatorem gradientu, a $\nabla \cdot$ – operatorem dywergencji.

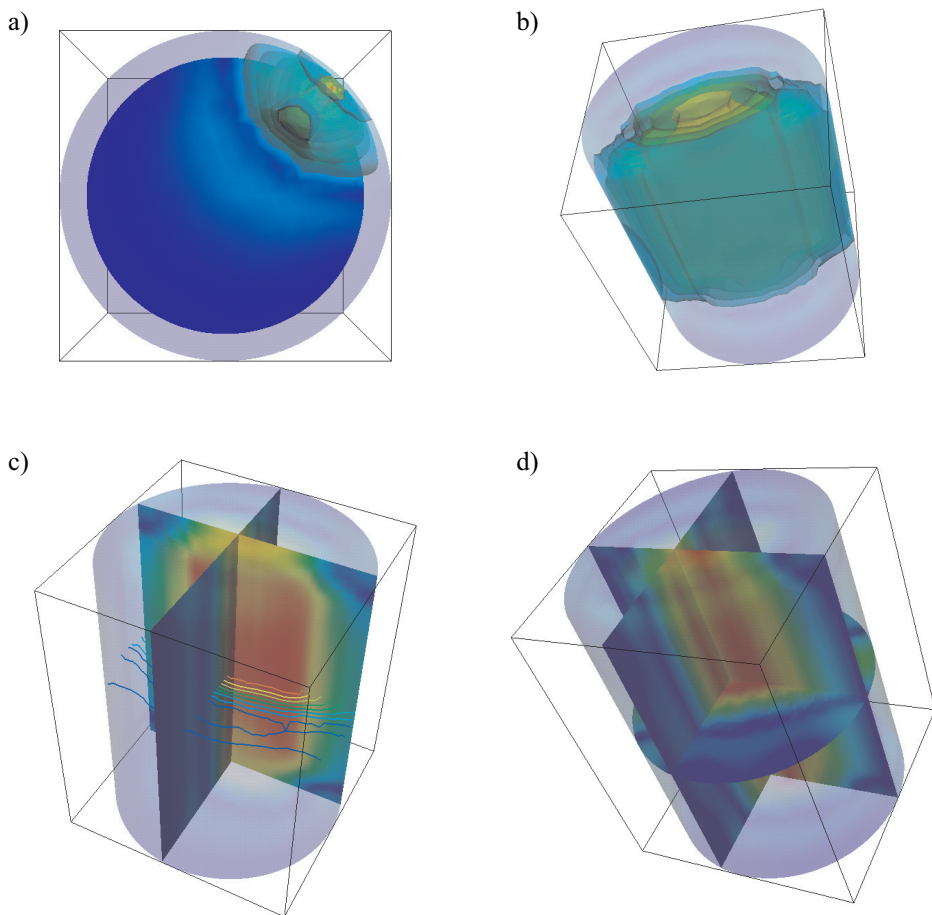
W celu wyznaczenia map czułości w pierwszym etapie przeprowadzono numeryczne obliczenia rozkładu potencjału elektrycznego w trójwymiarowej przestrzeni pomiarowej projektowanych 2D czujników pojemnościowych ECT. Rozkład potencjału stanowił dane wejściowe do dalszych poszukiwań macierzy czułości czujnika pomiarowego według wzoru (1). W przypadku wyznaczania map czułości czujników o średnicy 0,65 m użyto oprogramowania *TomoKIS Studio* opisanego w [2]. Zaimplementowana metoda elementów skończonych do wyznaczania rozkładu pola elektrycznego w obszarze czujnika oraz wyznaczająca wartości map czułości w węzłach siatki elementów skończonych pozwoliła na przeprowadzenie analizy porównawczej poszczególnych czujników ECT. W metodzie tej przestrzenny rozkład pola elektrostatycznego jest określony przez rozkład potencjałów elektrycznych w węzłach wokseli siatki. Na rysunku 5 pokazano przykładowe znormalizowane mapy czułości między wybranymi parami elektrod.

Bezpośrednie porównanie map czułości (na podstawie „ogłędzin”) poszczególnych par elektrod czujnika nie jest rozwiązaniem zapewniającym określenie jakości czujnika w sposób jednoznaczny. W celu ilościowego porównania otrzymanych wyników zastosowano parametryczne wartości, charakteryzujące otrzymane mapy czułości. W tabeli 2 przed-

stawiono wartości parametrów projektowanych czujników: wartość minimalną $S_{\min}$, maksymalną $S_{\max}$ oraz współczynnik kształtu mapy czułości S_k , obliczany według wzoru (3):

$$S_k^{i,j} = \frac{S_{\max}^{i,j} - S_{\min}^{i,j}}{\sum_{p=1}^{p=M} s_p^{i,j}} \quad (3)$$

gdzie p oznacza węzeł siatki, M – liczbę węzłów siatki, $s_p^{i,j}$ – wyznaczoną czułość dla węzła p przy analizie mapy czułości między elektrodami i oraz j .



Rys. 5. Przykładowe znormalizowane mapy czułości wyznaczone za pomocą TomoKIS Studio: a) zrzut z góry, mapa czułości między pierwszą a drugą elektrodą; b) przestrzenna wizualizacja mapy czułości między 1 oraz 7 elektrodą czujnika 12-elektrodowego; c) wizualizacja 3D mapy czułości między naprzeciwległymi elektrodami z naniesionymi liniami pola elektrycznego dla czujnika 8-elektrodowego; d) rozkład wartości mapy czułości w 3 płaszczyznach (x , y , z)

Tabela 2

Parametry macierzy czułości dla poszczególnych czujników pomiarowych
 ($S_{\max}$ – wyznaczono dla elektrody przyległych ($C_{1,2}$), $S_{\min}$ dla elektrod naprzeciwległych
 ($C_{1,5}$ – czujnik 8-elektrodowy, $C_{1,7}$ – czujnik 12-elektrodowy))

Lp.	$S_{\min}$ [$\times 10^{-6}$]	$S_{\max}$	S_k	
			$C_{1,2}$	$C_{1,5}/C_{1,7}$
1	7,78	0,00300	87,73	59,51
2	7,09	0,00230	50,07	37,9
3	6,61	0,00360	59,1	45,56
4	3,65	0,00350	102,58	67,41
5	3,12	0,00300	65,61	43,27
6	2,77	0,00530	96,01	69,25

Jako że analizie podlegały znormalizowane macierze czułości, otrzymane parametry zostały przeskalowane przez czynnik kompensujący różnice w liczbie węzłów wokseli w siatce. Nieuwzględnienie tego faktu powodowało, że najlepsze rezultaty wyznaczane były dla siatki o najmniejszej liczbie elementów.

Parametry macierzy czułości S_k uzyskane w numerycznych obliczeniach dla modelu rzeczywistego czujnika 12-elektrodowego zawierały się w przedziale od 314 (dla elektrod przyległych) do 53 (elektrod naprzeciwległych). Szczegóły analizy tego modelu czujnika znaleźć można w [3]. Otrzymane wartości minimalne (tab. 1) oraz maksymalne pokazują, że można się spodziewać największej czułości pomiarowej dla elektrod przyległych w przypadku czujnika o najmniejszej odległości między elektrodami, zarówno dla 8- (czujnik nr 3) jak i 12-elektrodowego (czujnik numer 6) czujnika, mimo zmniejszenia długości elektrod. Analiza wartości minimalnych dla naprzeciwległych elektrod ($S_{\min}$) pokazuje, że najwyższe wartości występują w przypadku najdłuższych elektrod (czujnik 1 oraz czujnik 4). W tym przypadku jednak różnice nie są tak znaczące jak dla $S_{\max}$. Interpretacja parametru S_k wydaje się najistotniejsza z punktu widzenia przydatności czujnika. Czujniki 8-elektrodowe, zarówno w przypadku par elektrod przyległych, jak i przeciwnych, mają największe wartości dla czujnika o największym rozmiarze. Natomiast dla czujnika 12-elektrodowego wartość największa, w przypadku naprzeciwległych elektrod, występuje dla czujnika nr 6, choć różnica nie jest duża w stosunku do czujnika nr 3 o największych elektrodach. Pojawiająca się niejednoznaczność w ocenie tych parametrów macierzy czułości wymaga dalszych prac badawczych, uwzględniających analizę numeryczną innych modeli rzeczywistych czujników ECT. Również określenie istotności różnicy parametru S_k na jakość pomiaru stanowi problem na dzień dzisiejszy nierozwiązany. Konieczna staje się analiza porównawcza przynajmniej dwóch czujników pomiarowych zarówno przez symulację, jak i porównanie otrzymanych rzeczywistych rezultatów pomiaru.

4. Podsumowanie

Przedstawione w artykule wyniki i ich interpretacja stanowią pierwszy etap prac nad opracowaniem metody optymalnego projektowania czujnika pomiarowego ECT do zastosowania w systemach pomiaru zmian koncentracji materiału sypkiego w przepływie grawitacyjnym materiałów sypkich w zbiornikach o dużej geometrii. W literaturze można znaleźć wiele pozycji opisujących jak budować czujnik ECT, jaki zasadami się kierować. Jednak brak badań, które mogą określić na etapie projektowania przydatność czujnika stanowi w przypadku dużych rozmiarów instalacji przemysłowych poważny problem. Zwiększenie rozmiarów czujników powoduje, że ze względów ekonomicznych kilkukrotne wykonanie czujnika, na jakie można byłoby sobie pozwolić w przypadku czujników o średnicy do 0,2 m, jest złym rozwiązaniem. Opisany w artykule rzeczywisty 12-elektrodowy czujnik ECT został w artykule potraktowany jako wzorcowy pod względem możliwości pomiarowych, jednakże dalsze prace odpowiedzą na pytanie, czy jest to podejście słuszne. Dobrze znane zasady budowy czujników ECT dla małych średnic mogą okazać się niewystarczające dla projektowania czujników o dużych gabarytach. Należy pamiętać, że długość elektrody przyjmowana w trakcie prac projektowych jako średnica zbiornika, w przypadku dużych instalacji może spowodować, że tomograf ograniczony możliwościami pomiarowymi tak dużych pojemności będzie generował błędne dane. Dlatego też jedynym słusznym rozwiązaniem może okazać się zmniejszenie elektrod (ich długości) przy zachowaniu odpowiedniego poziomu stosunku sygnału do szumu. Podjęta próba znalezienia rozwiązania, które przez symulację pozwoli w odpowiedni sposób wpłynąć na prace projektowe, stanowi główny element obecnych prac badawczych autorów pracy. Opisany w artykule rzeczywisty 12-elektrodowy czujnik ECT został w artykule potraktowany jako wzorcowy pod względem możliwości pomiarowych, jednakże dalsze prace odpowiedzą na pytanie, czy jest to podejście słuszne.

Podziękowania

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009–2011 jako projekt badawczy nr N N505 368737 realizowany w Katedrze Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej.

Literatura

- [1] Banasiak R., *Algorytmy wizualizacji 3D w przemysłowych systemach elektrycznej tomografii procesowej*. Rozprawa doktorska, 2007, 180.
- [2] Banasiak R., Jaworski T., Wajman R., *Aplikacja dla potrzeb kompleksowego przetwarzania tomograficznych danych pomiarowych tomokis studio*. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Seria: Elektryka, rocznik 1078, nr 121, 2010, 145–158.
- [3] Brandisky K., Romanowski A., Grudzień K., Sankowski D., *Electrostatic Field Simulations in the Analysis and Design of Electrical Capacitance Tomography Sensors*. Automatyka (półrocznik AGH), 2010.

- [4] Chaniecki Z., Dyakowski T., Niedostatkiwicz M., Sankowski D., *Application of electrical capacitance tomography for bulk solids flow analysis in silos*. Particle and Particle Systems Characterization, 23, 3–4, 2006, 306–312.
- [5] Flores N., Gamio JC., Ortiz-Aleman C., Damian E., *Sensor Modeling for an Electrical Capacitance Tomography System Applied to Oil Industry*. Proc. of the COMSOL Multiphysics User's Conference Boston, 2005.
- [6] Grudzień K., Niedostatkiwicz M., Romanowski A., Chaniecki Z., Sankowski D., *Analiza koncentracji materiału sypkiego w silosie z zastosowaniem Elektrycznej Tomografii Pojemnościowej (ECT)*. Automatyka (półrocznik AGH), 2009.
- [7] Grudzień K., Romanowski A., Chaniecki Z., Sankowski D., Niedostatkiwicz M., *Description of the silo flow and bulk solid pulsation detection using ECT*. Flow Measurement and Instrumentation, vol. 21, 2010, 198–206.
- [8] Li Y., Yang WQ., *Virtual electrical capacitance tomography sensor*. Journal of Physics: Conference Series 15, Sensors & Their Applications XIII, 2005, 183–188.
- [9] Lionheart WRB., *Reconstruction algorithms for permittivity and conductivity imaging*. Proc. of 2nd World Congress Industrial Process Tomography (Hannover), 2001, 4–11.
- [10] Olmos AM., Primicia JA., Marron JLF., *Simulation design of electrical capacitance tomography sensors*. IET Sci. Meas. Technol., vol. 1, (4), 2007, 216–223.
- [11] Peng L., Mou C., Yao D., Zhang B., Xiao D., *Determination of the optimal axial length of the electrode in an electrical capacitance tomography sensor*. Flow Measurement and Instrumentation, 16, 2005, 169–175.
- [12] Plaskowski A., Beck M.S., Thorn R., Dyakowski T., *Imaging Industrial Flows: Applications of Electrical Process Tomography*. Taylor & Francis, 1995, 232.
- [13] Reimbert ML., Reimbert AM. (ed), *Silos, theory and practice vertical silos, horizontal silos (retaining walls)*. Lavoisier Pub., 1987, 552.
- [14] Romanowski A., Grudzień K., Williams RA., *Analysis and Interpretation of Hopper Flow Behaviour Using Electrical Capacitance Tomography*. Particle & Particle Systems Characterization, vol. 23, Issue 3–4, 2006, 297–305.
- [15] Scott D.M., McCann H., *Process imaging for automatic control*. Taylor and Francis, 2005, 439.
- [16] Wajman R., Mazurkiewicz Ł., Sankowski D., *The Sensitivity Map in the Image Reconstruction Process for Electrical Capacitance Tomography*. Proc. of 3rd International Symposium on Process Tomography in Poland, Łódź, 2004.
- [17] Wajman R., Sankowski D., *Sensitivity analysis for Capacitance Tomography*. w: Electrical Capacitance Tomography. Theoretical Basis and Applications.. Warszawa, 2010, 108–117, praca zbiorowa D. Sankowski, J. Sikora (red.), Instytut Elektrotechniki, Warszawa 2010, 308.
- [18] Warsito W.Q., Marashdeh Q., Fan L-S., *Electrical Capacitance Volume Tomography*. IEEE Sensors Journal, vol. 7, No. 4, 2007, 525–535.
- [19] Wilde K., Rucka M., Tejchman J., *Silo music-mechanism of dynamic flow and structure interaction*. Powder Technology, 186, 2008, 113–129.
- [20] Yang WQ., *Design of electrical capacitance tomography sensors*. Meas. Sci. Technol., vol. 21, 4, 2010, 042001 (13pp).
- [21] Yang WQ., *Key issues in designing capacitance tomography sensors*. IEEE Sensors, EXCO, Korea, 2006.