

Dr hab. inż. Andrzej Płaskowski, dr Tadeusz Piotrowski, mgr inż. Michał Frączak

Instytut Przemysłu Organicznego, 03-236 Warszawa, ul. Amopol 6

Metody rekonstrukcji obrazów w pojemnościowej tomografii procesów spalania

W tomografii pojemnościowej nie znajdują zastosowania dobrze rozwinięte techniki rekonstrukcji obrazów stosowane w medycynie. Głównym problemem jest nieliniowa zależność między wielkością mierzoną a parametrem, który nas w danym układzie interesuje (rozkładem przenikalności dielektrycznych). Problemem jest stosunkowo mała ilość pomiarów występujących w tomografii procesowej, w stosunku do tomografii medycznej, wynikająca z krótkiego czasu trwania spalania (rzędu dziesiątek do setek milisekund). Pierwszym zastosowanym algorytmem rekonstrukcji obrazów w tomografii pojemnościowej był algorytm LBP - Linear Back Projection (liniowa projekcja zwrotna). Obecnie rozwija się nowe algorytmy rekonstrukcji, opierające się na metodach iteracyjnych, sztucznych sieciach neuronowych, tablicach wzorów. W opracowaniu zostaną podane główne, stosowane algorytmy rekonstrukcji obrazów w tomografii pojemnościowej.

Image Reconstruction Methods in Capacitance Process Tomography

The nature of the capacitance sensors is such that reconstruction algorithms well developed for medical tomography are not applicable. The main problem is that relationship between the measured quality (capacitance), and the parameter of interest is nonlinear. Also it should be pointed out that the number of measurements in capacitance is small compared to medical tomography because the process duration is short (tens or hundreds milliseconds). For this reason the first the first tested algorithm was based on the crude back projection algorithm. Other techniques as iterative method, algorithm based on artificial neural network and „look-up” tables have been developed. This paper outline the different techniques.

1. Wprowadzenie

Dynamiczna tomografia spalania to nowa metoda śledzenia (wizualizacji) w czasie rzeczywistym stanu bezpieczeństwa trudnych do kontroli procesów technologicznych w przemyśle chemicznym. Opiera się ona na uzyskiwaniu i cyfrowej obróbce obrazów zjawisk, jakie zachodzą we

wczesnych fazach formowania się i rozwoju wybuchowego spalania mieszanin paliwowo-powietrznych w przemysłowych aparatach technologicznych (symulowanych w urządzeniach laboratoryjnych) prowadzących, w razie ich nie wykrycia, do poważnych awarii spowodowanych wybuchem i / lub pożarem technologicznym. Jest to problem multidyscyplinarny. Niezbędna jest wiedza i doświadczenie w zakresie następujących głównych dziedzin:

- teorii i praktyki wybuchowości mieszanin paliwowo - powietrznych (aerodispersji mediów technologicznych)
- teorii i praktyki tomografii procesowej
 - systemów pomiarowych i układów elektronicznych
 - algorytmów rekonstrukcji obrazów
- praktyki prowadzenia procesów technologicznych przemysłu chemicznego

2. Przykład z prac prowadzonych w Instytucie Przemysłu Organicznego

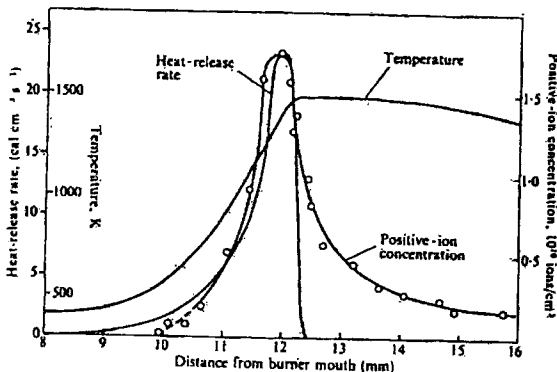
Tomografia procesowa jest techniką umożliwiającą uzyskania powierzchniowej i czasowej informacji o parametrach procesu stosując układ czujników umieszczonych wokół tego procesu. Np. umieszczając czujniki wokół płomienia uzyskuje się obraz zjawisk zachodzących w płaszczyźnie znajdującej się między czujnikami. System czujników dobiera się w zależności od tego jakie parametry mają być przedstawione w postaci obrazu. Interesujące nas czujniki pojemnościowe są czułe na zmiany stałych dielektrycznych mediów występujących w procesie. Sygnały z czujników są wzmacniane, filtrowane, multipleksowane, przekształcane na sygnały cyfrowe i przesyłane do komputera, w którym następuje rekonstrukcja. Z dokonanych pomiarów uzyskuje się na ekranie obraz rozkładu badanego parametru, czyli w naszym przypadku rozkład stałych dielektrycznych. Do badań wykorzystano tomograf firmy Process Tomography Ltd. typ PTL300-TP-G.

3. Zjawiska fizyko - chemiczne mające wpływ na interpretację

Procesy spalania są reakcjami utleniania przebiegającymi w bardzo skomplikowany sposób. Ogromną rolę odgrywają w nich wolne rodniki. Są to wolne atomy i fragmenty cząsteczek – bardzo reaktywne chemicznie, nietrwałe i nie dające się wyizolować ze środowiska reakcji. Rodniki są nośnikami poważnych ilości energii chemicznej potrzebnej do reakcji, posiadają o wiele więcej energii niż wynosi energia kinetyczna cząsteczek w temperaturze 2000 K. W płomieniach występują zjawiska, towarzyszące procesom spalania. Należą do nich: **chemiluminescencja**, **poświaty** (widma bez struktury uporządkowanej), **chemijonizacja**, **termojonizacja** (termoemisja elektronów), **jonizacja kolizyjna**. Z punktu widzenia badania procesów spalania metodą pojemnościowej tomografii procesowej bardzo interesujące są zjawiska jonizacji termicznej i chemijonizacji. Powstawanie jonów i wolnych elektronów w strefie spalania gwałtownie zmienia przenikalność dielektryczną w tym obszarze.

Chociaż płomień jako całość jest elektrycznie obojętny, jest on układem dynamicznym wieloskładnikowym, przewodzącym prąd elektryczny. Powstają w nim i są obecne oraz wykrywalne wolne rodniki, elektrony oraz jony.

Na wykresie Rys. 1 (wg Lawton and Weinberg [4]), widać wyraźnie zmiany gęstości jonów w zależności od odległości od dyszy palnika co ma wpływ na zmiany zarówno stałej dielektrycznej ϵ jak i przewodnictwa elektrycznego σ .



Rys. 1. Zmiany gęstości jonów w zależności od odległości od dyszy palnika

Względna stała dielektryczna próżni równa jest jedności, a stałe dla gazów są niewiele większe od jedności i podawane są zawsze względem próżni. Wartości stałych dielektrycznych cieczy i ciał stałych zmieniają się w dość szerokich granicach i podawane są względem powietrza, dla którego $\epsilon = 1.000594$ w temp. 0°C i pod ciśnieniem 1013 hPa.

Cząsteczki o budowie polarnej mają o wiele większe stałe dielektryczne od cząsteczek niepolarnych, np.: woda – 80, aceton – 21, etanol – 25, metanol – 33.6, cyjanowodór – 114.9, siarczan metylowy – 42.6, p-nitroanilina – 56.3, nitrobenzen – 34.8 dane dla 20°C .

W przypadku cieczy stała dielektryczna maleje ze wzrostem temperatury i np. dla wody zmienia się w granicach od 88 (dla 0°C) do 9.74 (dla $+370^{\circ}\text{C}$), a dla metanolu od 57.7 (dla 0°C) do 18.3 (dla $+70^{\circ}\text{C}$).

Waterfall, White i Beck podają, że w badaniach tomograficznych spalania paliwa w cylindrze silnika tłokowego stała dielektryczna wykładziny ceramicznej, na której umieszczono elektrody zmieniała się od $\epsilon_r = 6$ w 100°C do $\epsilon_r = 9$ w 400°C .

4. Metody rekonstrukcji

Stosując tomografię pojemnościową można uzyskać obraz płomienia, ponieważ proces spalania wytwarza jony, które mogą być rozpatrywane jako nośniki przesunięcia (efekt przenikalności) lub jako nośniki przewodzenia (efekt rezystancyjny). Artykuł odnosi się do tomografii pojemnościowej, ale należy wspomnieć, że prowadzone są prace nad tomografią umożliwiającą jednoczesne uzyskanie obrazu rozkładu przenikalności elektrycznej oraz rezystancji płomienia. Umożliwi to uzyskanie informacji o składzie mieszaniny i charakterystyce płomienia. Algorytmy rekonstrukcji opisane poniżej stosowane są zarówno w tomografii pojemnościowej jak i w tomografii rezystancyjnej.

Wykorzystując równania opisujące zmiany pola elektrycznego, oraz zależności między ładunkiem elektrycznym, a napięciem można wyliczyć pojemności dla danego rozkładu stałej dielektrycznej

medium $\varepsilon(x,y)$ i danych warunków brzegowych. Jest to tzw. zagadnienie proste (forward problem) czyli na podstawie zależności fizycznych wyliczenie wartości mierzonych przez czujniki (wartości brzegowych), przyjmując rozkład $\varepsilon(x,y)$ między elektrodami, czyli dla przyjętych wartości stałej dielektrycznej $\varepsilon_{ij}(x,y)$ dla każdego piksela w płaszczyźnie zwartej między elektrodami wyliczamy wektor pomiarów

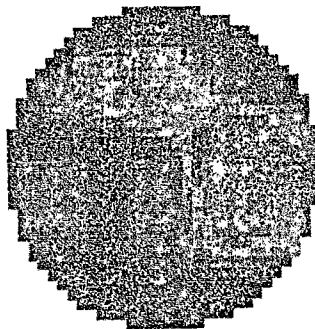
$$\varepsilon_{ij}(x,y) \rightarrow \text{pomiar}.$$

Jedną z metod symulacji rozkładu pola elektrycznego w komorze spalania jest metoda elementów skończonych. Umożliwia ona wyliczenia czułości w obszarze badanym, która jest zapisana w pamięci komputera. Rozwiązanie problemu prostego umożliwia właściwą rekonstrukcję obrazu rozkładu stałej dielektrycznej przez rozwiązanie problemu zwrotnego (invers problem).

Rozwiązanie problemu zwrotnego polega na określeniu rozkładu stałej dielektrycznej między elektrodami (w komorze spalania) na podstawie dokonywanych pomiarów (warunków brzegowych) wartości pojemności elektrycznej między poszczególnymi parami elektrod

$$\text{pomiar} \rightarrow \varepsilon_{ij}(x,y).$$

Problem zwrotny umożliwia wyznaczenie (estymację) rozkładu stałych dielektrycznych na podstawie uzyskanego zbioru pomiarów dzięki poprzedniemu rozwiązaniu problemu prostego, uzyskuje się obraz jak na Rys. 2



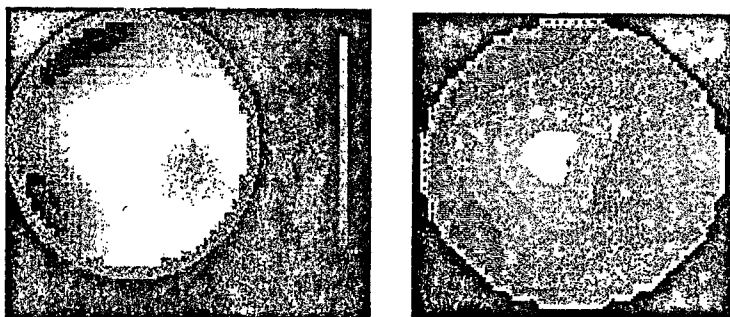
Rys. 2 Obraz tomograficzny

Przy rekonstrukcji obrazu można stosować wiele przybliżeń matematycznych. Kilka metod rekonstrukcji obrazów zostanie podanych poniżej.

Szybkość metody mierzy się ilością obrazów (klatek) na sekundę. Obecny system PT może wyprodukować obrazy z prędkością dziesięciu klatek na sekundę, a nawet setki klatek na sekundę. Z drugiej strony należy dokonać wielu pomiarów danych niezbędnych do rekonstrukcji jednej klatki. Tak więc system musi przesłać dane z wielką prędkością. Np. w tomografii pojemnościowej z 12 elektrodami (ECT) system osiąga 66 pomiarów na jedną klatkę obrazu. Jeśli żądamy prędkości 100 klatek na sekundę dane pomiarowe muszą być zbierane z prędkością 105,6 kbitów na sekundę. Biorąc pod uwagę, że komputer przesyła rozkłady do układu elektronicznego dla sterowania operacjami transmisja danych powinna być szybsza niż 105,6 kbautów, powiedzmy 200 kbity na sekundę – dla porównania R232 szeregowy port jest stosowany do 19,2 Kbitów na sekundę (19,2 Kbaud). W chwili obecnej ilość uzyskiwanych obrazów na sekundę zależy głównie od rozwoju elektroniki.

4.1. Liniowa projekcja zwrotna (Linear Back Projection LBP).

To przybliżenie zostało zastosowane w pierwszych eksperymentach. Jest ono szybkie, najprostsze w założeniu i najłatwiejsze do zrozumienia, ale otrzymuje się rekonstrukcje ze znacznymi wadami. [20]. Otrzymuje się jednak obrazy sensowne zgodne z przewidywaniami i obserwacjami.



a)

b)

Rys.3. Forma przedstawienia obrazu: a) Obraz uzyskany na ekranie tomografu; b) Obraz przetworzony w oparciu o mapę bitową

Jak widać uzyskane obrazy przedstawiają informację jakościową o rozkładzie spalania (Rys.3a). Więcej informacji można uzyskać przez zastosowanie procedur obróbki cyfrowej obrazu (mapy bitowe) (Rys.3b).

Algorytm został realizowany następująco. Po pierwsze rozwiązano problem prosty. Do rozwiązania tego problemu można zastosować trzy metody: symulacja pola elektromagnetycznego stosując technikę elementów skończonych, bezpośrednią analizę lub bezpośrednie pomiary. Metoda eksperymentalna opiera się na wprowadzaniu próbki testującej z pręta polietylenowego po kolej w miejsce wszystkich pikseli wewnątrz przestrzeni pomiarowej. W efekcie uzyskuje się odpowiedź prostą systemu dla każdego piksela. Dane te zostały następnie wprowadzone do macierzy transformacji dla przekształcania wszystkich pomiarów czujnika w obraz.

Przedstawione wyniki wykazują, że algorytm LBP rozmywa rozkład stałych dielektrycznych oraz, że jest trudno otrzymać ilościową informację na podstawie obrazu LBP. Tomografia impedancyjna (EIT) stosuje filtrowany algorytm LBP. Ten algorytm jest bardziej rozwinięty i dokładniejszy niż algorytm LBP stosowany w tomografii pojemnościowej. Jednym z głównych przybliżeń w tym algorytmie jest to, że zmiany przewodności w stosunku do odpowiedniego obrazu są małe. To założenie powoduje, że różniczkowe równania opisujące system mogą być zastąpione zależnościami liniowymi i w ten sposób problem staje się rozwiązalny metodami liniowymi. W tomografii pojemnościowej założenie to nie jest prawdziwe gdy stałe dielektryczne różnią się o więcej niż 50%. Tym niemniej taki algorytm może być opracowany.

4.2. Rekonstrukcja iteracyjna.

Podstawowa strategia tej metody oparta jest na zastosowaniu korekcji arbitralnie przyjętego początkowego rozkładu medium i dążenie do uzyskania projekcji mierzonych.

Rozważmy algorytmy iteracyjne na które mają dużo mniejszy wpływ początkowe wyniki projekcji zwrotnej oraz redukują błędy geometryczne.

Filtrowana projekcja zwrotna może kompensować zmiany czułości przekroju poprzecznego powstałe wskutek naturalnego rozproszenia pól elektrycznych. Teraz musimy rozważyć dodatkowe błędy powstałe wskutek tego, że linie pola ulegają zmianie przez rozkład materiału w przestrzeni pomiarowej, zmieniając pole elektryczne zgodnie z drogą najmniejszej oporności, a metody iteracyjne / sprzężenia zwrotnego są wykorzystane do obejścia tego problemu.

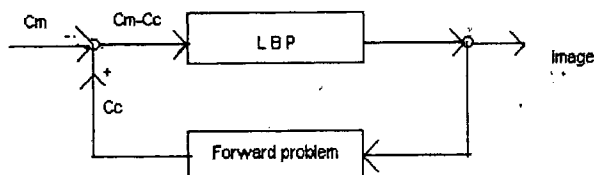
Zasadą rekonstrukcji iteracyjnej jest po pierwsze otrzymać (geometrycznie nie dokładny) obraz z filtrowanej projekcji zwrotnej. Następnie wykorzystujemy wiedzę o tym obrazie aby odpowiedzieć na pytanie „jaki może być przebieg linii pola lub jaka może być mapa czułości w skutek występowania medium (płomienia) w przestrzeni pomiarowej?” Wyliczamy nową (skorygowaną) mapę czułości aby wygenerować nowy obraz (stosując ponownie filtrowaną projekcję zwrotną). Otrzymamy lepszy obraz ponieważ zastosowaliśmy dokładniejszą mapę czułości.

Powyższy proces jest powtarzany aż do chwili, gdy nie można uzyskać lepszego obrazu.

Jednym z rozwiązań jest algorytm Newtona-Raphsona, który typowym algorytmem opartym na korygowaniu poszczególnych pikseli. Wprowadza on stopniowo (iteracyjnie) korektę dla każdego piksela na arbitralnej mapie czułości. Ze względu na dużą ilość pikseli obrazu (w podanym przykładzie na rysunkach 1024 pikseli) jest to procedura pracochłonna dla komputera.

Przybliżenie piksela po pikselu jest intuicyjnie nieekonomiczne, ponieważ nie może być więcej rzeczywistych informacji w obrazie niż liczba uzyskiwanych pomiarów (w przykładzie 28 pomiarów), których jest znacznie mniej niż liczby pikseli.

Innym rozwiązaniem rekonstrukcji obrazu z iteracyjnym sprzężeniem zwrotnym, oparte jest na przetwarzaniu sygnałów pomiarowych (zgodnie z W.Q. Yang) Rys. 4



Rys. 4. Schemat algorytmu iteracyjnego

Na schemacie pokazana jest rekonstrukcja oparta na liniowej projekcji zwrotnej (stosując filtrowaną mapę czułości), przyjmując oczywiste założenie, że obraz jest tylko właściwy gdy nie występuje płomień, lub, że występuje tylko „mały kontrast” materiału w przestrzeni pomiarowej, taki, że można pominąć zakłócenie pola. Ta filtrowana projekcja zwrotna jest pierwszym krokiem w rekonstrukcji obrazu przez iteracyjne sprzężenie zwrotne. Zapewnia „pierwszą estymację profilu przewodności”, który umożliwi rozpoczęcie procesu iteracji. Interakcja bierze poprzednią estymację profilu przenikalności, wylicza n pojemności, które są spodziewane przez tą estymację (t.zn. rozwiązuje problem prosty). Dane te są porównywane z aktualnie pomierzonymi

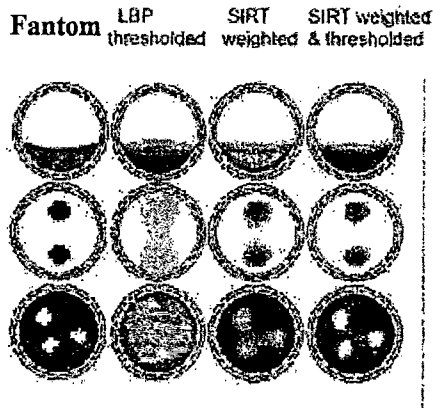
pojemnościami aby wygenerować różnice (sygnały uchybu). Proszę zauważyć, że dla systemu z 8 elektrodami mamy 28 pomiarów a w związku z tym występuje 28 parametrów w algorytmie sprzężenia zwrotnego.

Sygnały uchybu są wzmacniane przez odpowiedni współczynnik wzmocnienia, jak to normalnie zachodzi w układzie z ujemnym sprzężeniem zwrotnym oraz są wprowadzane do algorytmu liniowej projekcji zwrotnej dla wygenerowania „uchybu obrazu”, który zostaje dodany do poprzedniego obrazu aby wygenerować nowy i bardziej dokładny obraz. Następnie dokonuje wyliczenia zgodnie z równaniami liniowej projekcji zwrotnej występujących w obwodzie liczenia do „przodu” co jest podobne do standardowego algorytmu LBP, omówione poprzednio.

Ostatnim z wymienionych systemów iteracyjnych jest system ze sprzężeniem zwrotnym posiadającym model w obwodzie sprzężenia zwrotnego. Motywacją rozwoju tego algorytmu było uzyskanie informacji ilościowej z danych tomografii pojemnościowej. Efektem tego rozwiązania jest to, że właściwości czujników pojemnościowych (takich jak np. „soft field” oraz niejednorodność rozkładu czułości) są włączone do rekonstrukcji oraz, że rozkład stałych dielektrycznych wewnątrz przekroju może być przedstawiony przez małą liczbę parametrów.

Jest to metoda sprzężenia zwrotnego opierająca się na wykorzystaniu możliwie małej liczbie parametrów sprzężenia zwrotnego potrzebnej dla danego procesu. Aby stosować tą metodę niezbędna jest dostateczna informacja o tym procesie. Tak więc uzyskany obraz może być tylko tak dokładny jak model. W tym układzie efekt rozproszenia pola w przestrzeni pomiarowej ze znajdującym się w nim niejednorodnym materiałem zostaje mocno zredukowany. Ale błąd modelu w dalszym ciągu istnieje!

Algorytmy, które wykorzystują algorytm LBP w układzie iteracyjnym przez uaktualnianie informacji czułości polepszają w pewnych granicach uzyskiwany obraz. Ale nawet przy bardzo dokładnych informacjach o czułości zawsze wystąpi zamazanie obrazu stałych dielektrycznych



Rys.5. Przykłady obrazów uzyskanych przy pomocy różnych algorytmów rekonstrukcji - w pierwszej kolumnie podano fantomy.

Dla przykładu podajemy tomogramy rekonstrukcji przy zastosowaniu LBP z odcinaniem, ważoną SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) oraz ważoną SIRT z odcinaniem w porównaniu z testowym obrazem – Rys.5.

4.3. Rekonstrukcja algebraiczna.(Algebraic Reconstruction Technique – ART)

Są to metody analityczne opierające się na dokładnych rozwiązaniach matematycznych, które są stosunkowo szybkie. Algorytm ART wykazuje wyższość nad LBP. Tym niemniej literatura wskazuje wyższość ze względu na duży efekt wygładzania. Może to być efektem zastosowania uproszczonego modelu czujnika oraz/ lub ponieważ rozdzielczość siatki rekonstrukcji jest duża w porównaniu z liczbą niezależnych możliwych pomiarów.

Przybliżenia analityczne nie znajdują zastosowania gdyż nie istnieją jednoznaczne zależności między wielkościami granicznymi pomiarów oraz rozkładem medium.

Jedną z tych metod, filtered back projection jest stosowana w wielu komercyjnych aparatach rentgenowskich.

4.4. Sieć neuronowa.

Jest to bardzo interesujący kierunek. Może doprowadzić do osiągnięcia dużych rozdzielczości i prędkości. Test na 12 elektrodowym czujniku pozwala zrekonstruować bardzo dokładnie obraz prostego przepływu. Tym niemniej dla bardzo złożonego rozkładu sieć może nie spełniać założonego zadania.

4.5. Tablice wzorców.

Ten algorytm może zapewnić dużą rozdzielczość i prędkość. Zawsze jednak występuje ryzyko braku w tabeli wzorców rodzaju zachodzącego spalania.

W tej metodzie trudno uzyskać informacje ilościowe.

5. Podsumowanie

Na ogół można stwierdzić, że podniesienie dokładności rekonstrukcji można uzyskać przez zwiększenie ilości elektrod. Powoduje to podniesienia ilości niezależnych pomiarów. Można też polepszyć algorytm rekonstrukcji tak, aby uzyskać z danych jak najwięcej informacji. Jak pokazano obrazy rekonstruowane na bazie algorytmu LBP mogą być poprawione przez zwiększenie ilości elektrod. Jednak polepszenie to jest ograniczone. W rzeczywistości jakość rekonstrukcji zmniejsza się w środku komory ze wzrostem ilości elektrod. Wynika to z faktu, że ze wzrostem ilości elektrod maleje ich wielkość. Powoduje, że czułość wewnątrz komory (gdzie natężenia pola elektrycznego jest małe) maleje. Poprawienie jakości obrazu można uzyskać opracowując nowy, bardziej dokładny algorytm rekonstrukcji. Odnosi się to do wszystkich omawianych algorytmów. Wybór algorytmu będzie bardzo zależał od badanego zjawiska a więc nie należy się spodziewać opracowania algorytmu uniwersalnego.

Dalszego rozwoju należy się spodziewać w rozwinięciu szybkiego algorytmu LBP z efektywną procedurą odcinania. Następnie należałoby rozwinąć bardziej dokładną technikę oprogramowania,

łącznie z szybkim rozwiązaniem zadania wprost. To powinno znacząco zredukować czas obliczeń jak również zmniejszyć czas rekonstrukcji, czyniąc tę technikę dużo szerzej stosowalną. Aby uzyskać wysoką jakość, dużą prędkość rekonstrukcji obrazu spalania technologia ECT wymaga znaczącego rozwoju. Tym niemniej, jej prostota i zastosowanie nieinwazyjnych dla badanego procesu elektrod zapewnia, że pozostaje jedną z najatrakcyjniejszych metod jakie mogą byćbrane pod uwagę przy monitorowaniu spalania.

LITERATURA

- [1] He R., Xie C.G., Waterfall R.C., Beck M.S., Beck C.M.: *Engine flame imaging using electrical capacitance tomography*, Electronics Letter, 30(7), 1994, pp. 559-560.
- [2] He R., Waterfall R.C., Gut Z., Wolański P.: *Combustion visualisation using electrical tomography and Schlieren picture techniques*, Conference: Frontiers in Industrial Tomography II, Delf April 1997, pp. 43 -46.
- [3] Isaksen O., *A review of reconstruction techniques for capacitance tomography*, Measurement Science and Technology, 7(3), 1996, pp. 325-337.
- [4] Lawton L., Weinburg F.J., *Electrical Aspects of Combustion*, Chap.6, Clerento Press, Oxford 1969, pp. 214-242.
- [5] Płaskowski A., Piotrowski T.: *Zasady działania tomografii i perspektywy przemysłowych zastosowań*, Konferencja Naukowo-Techniczna Diagnostyka Jakości Spalania w Energetyce, Ustroń-Zawodzie, marzec 1998.
- [6] Waterfall R.C., He R., Beck C.M.: *Visualizing combustion using electrical impedance tomography*, Chemical Engineering, Vol. 52, N0. 13, 1997, pp. 2129 - 2138.
- [7] He R., Beck C.M., Waterfall R.C. and Beck M.C.: *Finite element modelling and experimental study of combustion phenomena using capacitance measurements*, Conference: 3rd European Concerted Action on Process Tomography, Porto 24-26 March 1994, pp. 367-376.
- [8] Isaksen O. and Nordvedt J.E.; *1994 An implicit model based reconstruction algorithm for use with a capacitance tomography system*, Conference: 3rd European Concerted Action on Process Tomography, Porto 24-26 March 1994, pp. 215-226.
- [9] Chen Q., Hoyle B. S. and Strangeways H. J.; *1992 Electrical field interaction and an enhanced reconstruction algorithm in capacitance process tomography*, Conference: 3rd European Concerted Action on Process Tomography, Porto 24-26 March 1994, pp.205-212.
- [10] Duggan P.M. and York T.A.; *1995 Tomographic image reconstruction using RAM-based neural networks*, Conference: 4th European Concerted Action on Process Tomography, Bergen 6-8 April 1995, pp. 411-419.
- [11] Marquardt D.W.; *1963 An algorithm for least-square estimation of non-linear parameters*, J. Soc. Indust. Appl. Math. II, pp. 431-441.
- [12] Waterfall R.C., He R., Wolanski R. and Gut Z.; *Monitoring Flame Position and Stability in Combustion Cans Using ECT*, 1st World Congress on Industrial Process Tomography, Buxton, April 1999, p. 35.
- [13] Piotrowski T., Płaskowski A, Beck M. and Byars M.; *Dynamic Combustion Tomography*, 1st World Congress on Industrial Process Tomography, Buxton, April 1999, p. 167.
- [14] Sun T.D., Mudde R., Schouten J.C., Scarlett B., van den Bleek C.M.: *Image Reconstruction*

- of an Electrical Capacitance Tomography, System Using an Artificial Neural Network*, 1st World Congress on Industrial Process Tomography, Buxton, April 1999, p. 174.
- [15] McCann H., Yang W.Q. and Polydorides N.P.: *Information Retrieval by Electrical Capacitance Tomography: Evaluation of an Iterative Algorithm and the Importance of Boundary Conditions*, 1st World Congress on Industrial Process Tomography, Buxton, April 1999, p. 206.
- [16] Yang W.Q., Byars M.: *An Improved Normalisation Approach For Electrical Capacitance Tomography*, 1st World Congress on Industrial Process Tomography, Buxton, April 1999, p. 215.
- [17] Hua Yan, Fuqun Shao, and Shi Wang: *Simulation Study of Capacitance Tomography Sensors*, 1st World Congress on Industrial Process Tomography, Buxton, April 1999, p. 388.
- [18] Desbat L. and Thierry R.: *Efficient Sampling of the Exponential Radon Transform*, 1st World Congress on Industrial Process Tomography, Buxton, April 1999, p. 423.
- [19] Jacobs F. and Lemahieu I.: *Iterative Image Reconstruction From Projections Based On Generalised Kaiser-Bessel Window Functions*, 1st World Congress on Industrial Process Tomography, Buxton, April 1999, p. 427.
- [20] Kazantsev I.: *Tomographic Reconstruction Using Ridge Functions*, 1st World Congress on Industrial Process Tomography, Buxton, April 1999, p. 433.
- [21] West R.M., Jia X., and Williams R.A.: *Parametric Modelling In Industrial Process Tomography*, 1st World Congress on Industrial Process Tomography, Buxton, April 1999, p. 444.
- [22] Likhachov A.V., Pickalov V.V., Chugunova N.V. and Baranov V.A., 1st World Congress on Industrial Process Tomography, Buxton, April 1999, p. 463.