

## ELECTRICAL CAPACITANCE TOMOGRAPHY ELECTRICAL ASPECTS OF COMBUSTION

Zbigniew Gut, Witold Niedziela, Jan Szymczyk  
Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Warszawska  
ul. Nowowiejska 21/25, 00-665 Warszawa  
tel. (022) 660-52-87, fax: (022) 825-05-65  
e-mail: zgut@itc.pw.edu.pl

### Abstract

Electrical Capacitance Tomography is currently used for two-phase flow monitoring in petrochemical industry (gas-oil) and also in pneumatic transportation. It is based on the analysis of the capacity change collected from several electrodes placed around the searching area. The method enables also visualisation of various combustion processes, which is owing to the studies and experiments carried out so far. The problem is more complicated when in the electric field a collection of positive and negative particles are present. As a matter of fact such situations are very common in practise, if one consider various kinds of flames, which are created by chemoionisation processes. The issue of capacity change then is supposed to be considered through electrical conductivity and permeability taken into account. In the case of visualisation of combustion processes, the changes of capacity values are caused by intensive chemical reactions, and only areas of ionised gas are really observable.

## POJEMNOŚCIOWA TOMOGRAFIA KOMPUTEROWA ELEKTRYCZNE ASPEKTY PROCESU SPALANIA

### Streszczenie

Obecnie, pojemnościową tomografię komputerową wykorzystuje się głównie do monitorowania przepływów dwufazowych w przemyśle rafineryjnym (gaz-ropa) oraz w transporcie pneumatycznym. Opiera się ona na analizie zmian pojemności zbieranych z kilku do kilkunastu elektrod umieszczonych wokół obszaru badawczego. Z przeprowadzonych analiz oraz wstępnych badań wynika, że metoda ta umożliwia również obrazowanie różnego rodzaju procesy spalania. Zagadnienie to znacznie się komplikuje, gdy w polu elektrycznym zostanie umieszczony zbiór cząstek naładowanych dodatnio i ujemnie. W praktyce, takim zbiorem cząstek są różnego rodzaju płomienie, powstające w procesie chemijonizacji. Wtedy zagadnienie zmian pojemności należy rozpatrywać z uwzględnieniem przewodności elektrycznej jak i przenikalności dielektrycznej. Wynika z tego, że w przypadku wizualizacji procesów spalania zmiany wartości pojemności są wywołane intensywnymi reakcjami chemicznymi, więc obrazowane są obszary zjonizowanego gazu.

### 1. Wprowadzenie

Pojemnościowa tomografia komputerowa opiera się ona na analizie zmian pojemności zbieranych z kilku do kilkunastu elektrod umieszczonych wokół obszaru badawczego (rys.1). W metodzie tej wartości zmian pojemności zależą głównie od rozkładu stałych dielektrycznych jednego czynnika w drugim (przy założeniu, że wymiary elektrod są stałe), zgodnie zależnością:

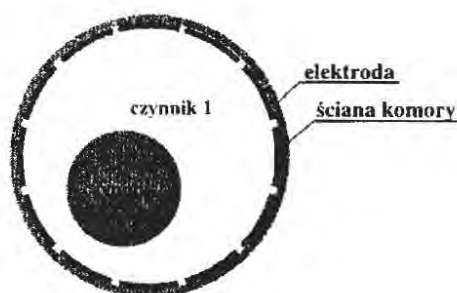
$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (1)$$

Gdzie:  $A$  – pole powierzchni czynnej jednej elektrody;

$d$  – odległość pomiędzy elektrodami;

$\epsilon_0$  – stała elektryczna (bezwzględna przenikalność elektryczna próżni  $= 8.85 \cdot 10^{-12} [s^4 A^2 / m^3 kg]$ );

$\epsilon_r$  – względna przenikalność elektryczna dielektryka w stosunku do przenikalności w próżni.

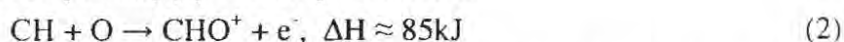


Rys. 1. Schemat czujnika pomiarowego wykorzystywanego w pojemnościowej tomografii komputerowej.  
Fig. 1. Scheme of a measurement sensor used in electrical capacitance tomography.

Obecnie, pojemnościową tomografię komputerową wykorzystuje się głównie do monitorowania przepływów dwufazowych w przemyśle rafineryjnym (gaz-ropa) oraz w transporcie pneumatycznym [1][2][3]. W tym przypadku, zagadnienie zmian wartości pojemności przedstawia się prosto, gdyż wartości pojemności wzrosną proporcjonalnie, o czynnik zmian stałej dielektrycznej  $\epsilon$ . Jednak z przeprowadzonych analiz oraz wstępnych badań wynika, że metoda ta umożliwia również obrazowanie procesy spalania [4][5]. W przypadku procesów spalania zmiany wartości pojemności są wywołane intensywnymi reakcjami chemicznymi, więc obrazowane są obszary zjonizowanego gazu. Zarejestrowane sygnały indukowane zachodzącymi procesami są następnie przetwarzane komputerowo, w wyniku czego otrzymuje się dwuwymiarową rekonstrukcję obrazu procesu spalania.

Wynika z tego, że zagadnienie zmian pojemności znacznie komplikuje się, gdy w polu elektrycznym zostanie umieszczony zbiór cząstek naładowanych dodatnio i ujemnie. W praktyce taki zbiór cząstek jest generowany podczas procesu spalania wyniku tzw. procesu chemijonizacji. Wcześniej prowadzone badania wykazały że w płomieniach węglowodorowych, szczególnie w strefie reakcji i bezpośrednio nad nią, występują jony w różnych stężeniach. Obecność ich wykryto dopiero w latach 60, dzięki rozwojowi spektrometrii masowej. Wielu badaczy wykorzystując spektrometry masowe zidentyfikowało kilkadziesiąt rodzajów dodatnio naładowanych cząstek. Jednak jedynie cztery z nich występują u wszystkich autorów. Należą do nich:  $\text{CHO}^+$ ,  $\text{C}_3\text{H}_3^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $\text{CH}_3^+$ .

Jonem pierwotnym jest jon  $\text{CHO}^+$  powstający w reakcji Calcote'a:



Jon ten jednak szybko przekazuje proton cząsteczce wody  $\text{H}_2\text{O}$  tak iż najpospolitszym jonem staje się, jeszcze w strefie reakcji, jon hydroniowy  $\text{H}_3\text{O}^+$ :



W płomieniach bogatych w paliwo występuje w słabszych stężeniach liczne jony typu  $\text{C}_n\text{H}_m^+$ , zwłaszcza gdy liczby  $n$  i  $m$  są równe. Najbardziej pospolitym jest jon z serii  $\text{C}_3\text{H}_3^+$ , który powstaje w reakcji z wzbudzonym elektronowo rodnikiem  $\text{CH}^*$ :



Koncentracja jonów  $\text{CH}_3^+$  jest 0,001 mniejsza niż koncentracja jonów  $\text{CHO}^+$  i  $\text{C}_3\text{H}_3^+$ . Z tego powodu zazwyczaj nie bierze się pod uwagę, zakładając że pozostałe trzy są głównymi.

Jak widać, podczas przebiegu procesu spalania stworzony jest pewien rodzaj jonizacji, wtedy zagadnienie zmian pojemności należy rozpatrywać z uwzględnieniem przewodności elektrycznej jak i przenikalności dielektrycznej. Klasyczna elektrodynamika daje wyrażenie na stałą dielektryczną  $\epsilon$  i przewodność właściwą  $\sigma$  dla medium zawierającego grupę wolnych jonów:

$$\sigma = \sum_k \frac{n_k e^2 v_k}{m_k (\omega^2 + v_k^2)} \quad (5)$$

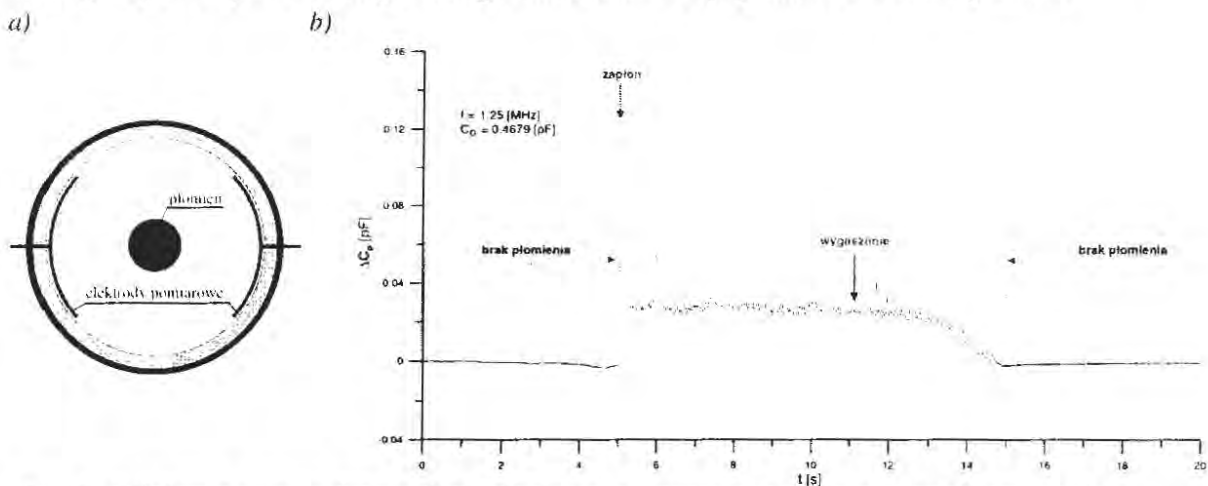
$$\epsilon = 1 - 4\pi \sum_k \frac{n_k e^2}{m_k (\omega^2 + \nu_k^2)} \quad (6)$$

Gdzie:  $n_k$  – liczba nośników w jednostce objętości (koncentracja);  
 $e$  – wartość ładunku nośnika;  
 $\nu_k$  – częstotliwość zderzeń;  
 $m_k$  – masa naładowanych cząsteczek;  
 $\omega$  – częstotliwość kątowna ( $\omega = 2\pi f$  gdzie:  $f$  – częstotliwość zmian pola elektrycznego).

Wynika z tego, że płomień w zmiennym polu elektrycznym ma się jak dielektryk z stratami z przewodnością właściwą  $\sigma$  i przenikalnością dielektryczną  $\epsilon$  i wartości pojemności zmieniają się wraz z częstotliwością zmian pola elektrycznego i właściwościami płomienia. W ten sposób otrzymaliśmy zależność, która pozwala nam na powiązanie procesów zachodzących podczas spalania z ich oddziaływaniem na pole elektryczne. Należało by, równocześnie dokonywać pomiaru wartości pojemności i strat oporowych. Jednak te dwie wielkości są zależne od siebie, więc będziemy traktować płomień jako pewnego rodzaju dielektryk, który wpływa na wartość prądu płynącego w obwodzie układu pomiarowego. Jeżeli dokonamy konwersji prądu na napięcie, po wcześniejszej kalibracji układu pomiarowego, będziemy mogli dokonywać bezpośredniego pomiaru wartości zmian pojemności wywołanej wprowadzeniem płomienia w obszar badawczy.

## 2. Badania

Pierwszy etap badań polegał na określeniu wpływu procesu spalania na wartość pojemności między elektrodami. W tym celu zbudowano sensor (rys. 2a), zawierający dwie elektrody pomiarowe. Do otrzymywania płomienia posłużono się palnikiem Bunsena, który został centralnie umieszczony pod sensorem. Po otwarciu zaworu na butli gazowej (zawierająca gaz palny: propan-butan) i rozpoczęciu rejestracji zmian wartości pojemności, został zainicjowany zapłon mieszaniny palnej. Wydatek paliwa oraz wielkość otwarcia wlotu powietrza był stały. Po określonym czasie zamknięty został dopływ gazu. W ten sposób otrzymano dla poszczególnych etapów badań przebieg zmian wartości pojemności w funkcji czasu.



Rys. 2. a) Schemat sensora służący do określenia wpływu procesu spalania na wartość pojemności, b) Zależność zmian przyrostowych wartości pojemności w funkcji czasu.

Fig. 2. a) Scheme of a sensor used for the determination of the combustion process influence on the capacity value.

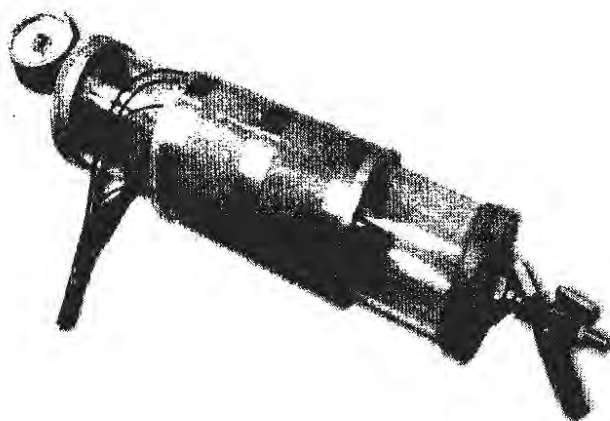
b) Changes dependence of incremental capacity values as a function of time.

Jak widać z przedstawionego przebiegu na rys. 2b, gdy następuje zapłon wartości pojemności gwałtownie rosną. Po bardzo krótkim czasie wartości te spadają na określony stały poziom do momentu odcięcia dopływu gazu. Po tym czasie zauważa się zmniejszenie płomienia więc również zmniejsza się wartości pojemności. Proces ten trwa do momentu aż płomień całkowicie zgaśnie. Ostatecznie wartości pojemności ustalają się na początkowym poziomie. W okresie trwania procesu spalania zauważa się pewne pulsacje w przebiegu zmian pojemności. Wynikają one głównie z samej struktury płomienia, który podczas spalania wykazuje znaczne fluktuacje kształtu.

Wcześniej prowadzone badania w Zakładzie Silników Lotniczych z wykorzystaniem komputerowego tomografu pojemnościowego wykazały przydatność tej metody do obrazowania różnego rodzaju stacjonarnych płomieni. Jednak badania wykazały, że metoda ta może być również adaptowana do obrazowania procesu propagacji płomienia mieszanin jednorodnych.

Najczęściej w rekonstrukcji obrazu wykorzystuje się algorytm liniowego rzutowania zwrotnego LBP (z ang. Linear Back Projection). Metoda ta, pozwala otrzymywać obraz stosunkowo niskiej rozdzielczości. Dla poprawy jakości obrazu korzysta się z iteracyjnych algorytmów. Do jednych z nich należy iteracyjna metoda oparta na algorytmie liniowego rzutowania zwrotnego - ILBP (z ang. Iterative Linear Back Projection) [6].

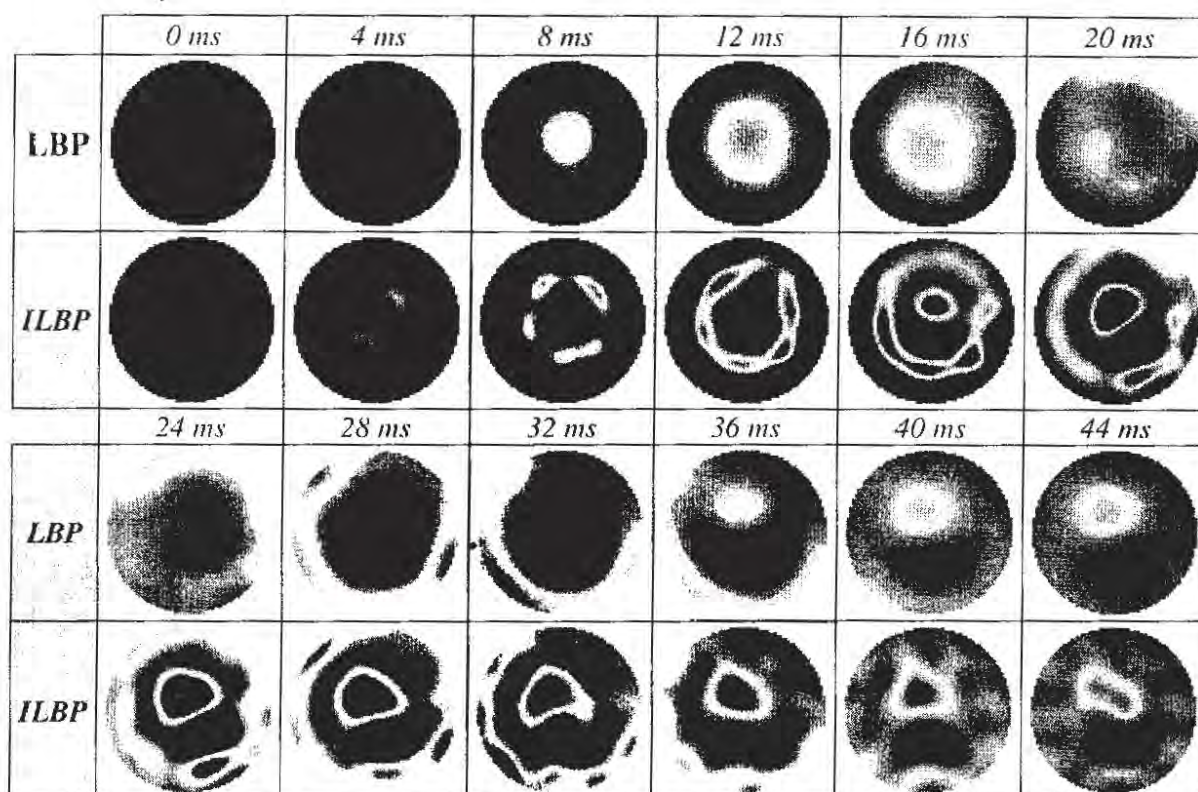
Konstrukcja drugiego sensora została zbudowana w oparciu o rurę z pleksi, o średnicy wewnętrznej  $\phi 90$  mm (rys. 3). Na zewnętrznej stronie rury zostały zamocowane elektrody z przewodami koncentrycznymi oraz ekran.



Rys. 3. Widok dwunastoelektrodowego sensora służącego do wizualizacji procesów spalania.  
Fig. 3. A view of a twelve electrode sensor used for combustion process visualization.

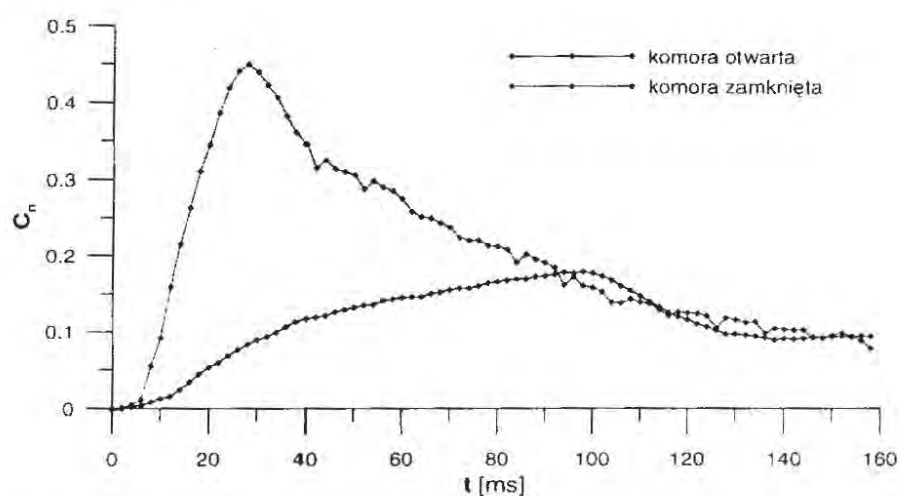
Przeprowadzona rekonstrukcja procesu spalania dotyczyła dwóch przypadków. Pierwszy etap badań został przeprowadzony gdy jedna strona komory była otwarta. Drugi etap badań odnosi się dla komory zamkniętej. Ponadto, dla tych dwóch przypadków wykonano wykresy zmian średnich znormalizowanych wartości pojemności.





Rys. 4. Obrazy rekonstrukcji propagacji płomienia w komorze (komora zamknięta).

Fig. 4. Images of a reconstruction of flame propagation in a chamber.



Rys. 5. Przebieg zmian średnich znormalizowanych wartości pojemności dla poszczególnych etapów propagacji płomienia.

Fig. 5. A course of changes of an average normalized capacity values for a particular flame propagation stage.

### 3. Podsumowanie

Badania wykazały, że do wizualizacji procesów spalania, w których reakcje chemiczne zachodzą stosunkowo wolno lub zmiany struktury płomienia nie przebiegają zbyt szybko w czasie i w przestrzeni (płomienie palników) wystarczy dokonywać rekonstrukcji obrazu z częstotliwością 25 klatek na sekundę. Jednak, gdy proces spalania przebiega bardziej intensywnie wymagane jest stosowanie znacznie większych częstotliwości. W tym przypadku

użytecznym okazał się system rejestracji danych, który pozwala zrekonstruować przebieg procesu z częstotliwością dochodzącą do 500 klatek na sekundę.

Badania przeprowadzone przez Clements [7] i Lawton [8] dla płomieni węglowodorowych wykazały ścisłą zależność pomiędzy stopniem jonizacji a temperaturą. Ze względu na to, iż nie jesteśmy w stanie określić jakiego typu jony mierzymy tak więc zakładamy że jest to średni stopień koncentracji jonów. Wynika z tego, że system pojemnościowej tomografii komputerowej nie tylko umożliwia rekonstruować proces spalania, ale również pozwala powiązać zmiany wartości pojemności z temperaturą płomienia. Wymaga to jednak przeprowadzenie dodatkowych badań.

*Prace badawcze finansowane z grantu KBN (nr umowy: 8 T12D 001 21).*

## **Literatura**

- [1] Plaskowski A, Beck M S, Byars M, Dykowski T, He R., Wang S J, Waterfall R C and Yang W Q: „Industrial application of electrical capacitance Tomography”, *Pomiary Automatyka Kontrola* 5, pp. 113-115, 1996.
- [2] Yang W Q, Stott A L, Beck M S and Xie C G: „Development of capacitance tomographic imaging systems for oil pipeline measurements”, *Review of Scientific Instruments*, 66 (8), pp. 4326-4332, 1995.
- [3] Huang S M, Plaskowski A, Xie C G and Beck M S: „Tomographic imaging of two-component flow using capacitance sensors”, *Meas. Sci. Technol.*, No. 22, pp.173-177, 1989.
- [4] Waterfall R C, He R, White N B and Beck C M: „Combustion imaging from electrical impedance measurements”, *Meas. Sci. Technol.*, No. 7, pp.369-374, 1996.
- [5] Gut Z, Wolanski P, He R, Waterfall R C: „Application of Electrical Tomography to Combustion Studies”, 16th ICDERS, Kraków, 1997.
- [6] [www.tomography.com](http://www.tomography.com): „An iterative method for improving ECT images”, *Process Tomography Ltd.*, UK. April 1999.
- [7] Clements R.M.: „The variation of ionization with air/fuel ratio for a spark-ignition engine”, *Journal of Applied Physics*, Nr 57 pp. 505-509.
- [8] Lawton J, Weinburg F J: „Electrical Aspects of Combustion”, Chap 6. Clarendon Press, Oxford, UK, 1969.