

*Dr hab. inż. Andrzej Płaskowski*  
*Dr Tadeusz Piotrowski*  
*Mgr inż. Cezary Gałęziewski*  
*Instytut Przemysłu Organicznego*

## PROBLEMY KALIBRACJI W POJEMNOŚCIOWEJ TOMOGRAFII PROCESOWEJ

System kalibracji tomografii pojemnościowej jest bardzo ważny zarówno ze względu na dokładność pomiaru jak również ze względu na rekonstrukcję obrazu. Zazwyczaj stosowana jest metoda dwupunktowa, która wymaga wypełnienia czujników dwoma materiałami po kolei. W wielu przypadkach jest wprost niemożliwe stosowanie metody dwupunktowej kalibracji. W takich przypadkach należy zastosować metodę jednopunktowej kalibracji, która bazuje na modelu matematycznym, elementach skończonych lub eksperymencie. W tej metodzie wymagane jest jedynie wypełnienie czujnika materiałem o małej wartości przenikalności a zakres systemu pomiarowego może być ustalony przez określenie wartości przenikalności materiału będącego przedmiotem uzyskania obrazu. Jeśli jest to konieczne może być zastosowana metoda adaptacyjna kalibracji tak aby zakres pomiarów był zawsze optymalny.

## CALIBRATION PROBLEMS IN ELECTRICAL CAPACITANCE TOMOGRAPHY

Calibration system of ECT is very important as well as measurement precision and image reconstruction. Two-point method is used usually. This method needs to fill sensors by two materials one after the other. It's impossible to use this method in most cases. In these cases should be used one-point calibration method which is based on mathematical model, finite elements and experiments. In this method only low permittivity material filling of sensor is required. Range of measurement system may be fixed by definition of pictured material permittivity. If it's necessary can be used adaptation method so the range of measurements will be always optimal.

### 1. PROBLEMY KALIBRACJI SYSTEMU

#### 1.1. Wprowadzenie

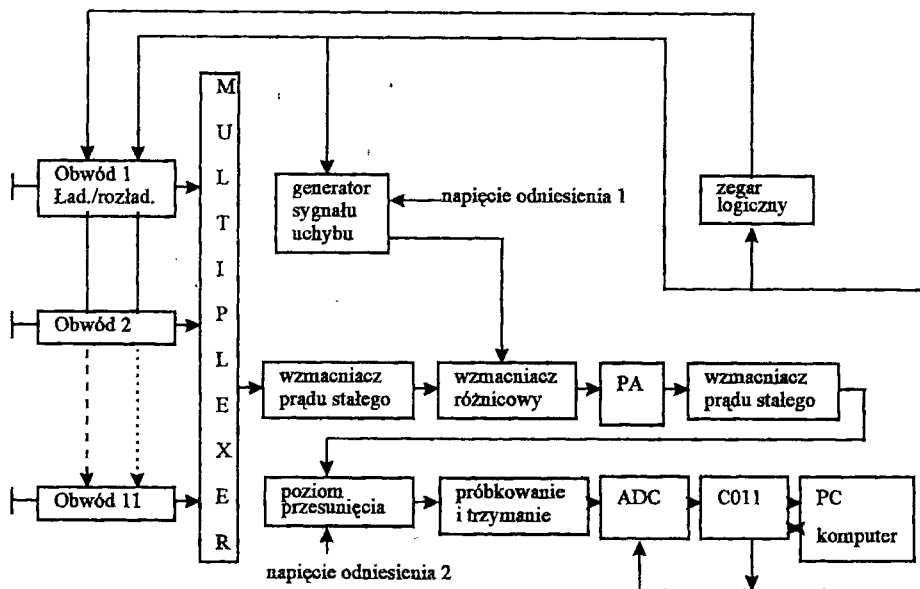
Jednym z kluczowych problemów tomografii jest problem kalibracji, od którego zależy dokładność pomiarów oraz jakość obrazu. Można wymienić następujące metody kalibracji:

- dwupunktową – można ją uznać za konwencjonalną
- jednopunktową
- adaptacyjną

Mówiąc o kalibracji zdajemy sobie sprawę, że w przypadku Elektrycznej Tomografii Procesowej mierzymy rozkład przestrzenny dwóch materiałów dielektrycznych o różnej przenikalności elektrycznej np. gaz i ropa.

## 1.2. Kalibracja dwupunktowa

Rys. 1 przedstawia schemat obecnie produkowanego systemu tomografii przez UMIST i PT Ltd., który zawiera układ przetworników ładowania/rozładowania pojemności oraz wspólny układ pomiarowy (CMC). Układ pomiarowy kompensuje pojemności stałe poprzez wprowadzenie napięcia uchybu z 10 bitowego przetwornika cyfrowo –analogowego (DAC). Skompensowane wyjście zostaje wzmacnione przez wzmacniacz prądu stałego (DC) i attenuated wyrównany przez programowy attenuator (PA) wykonany z następnego 10 bitowego przetwornika cyfrowo – analogowego (DAC) a następnie przechodzi przez przetwornik analogowo – cyfrowy (ADC).

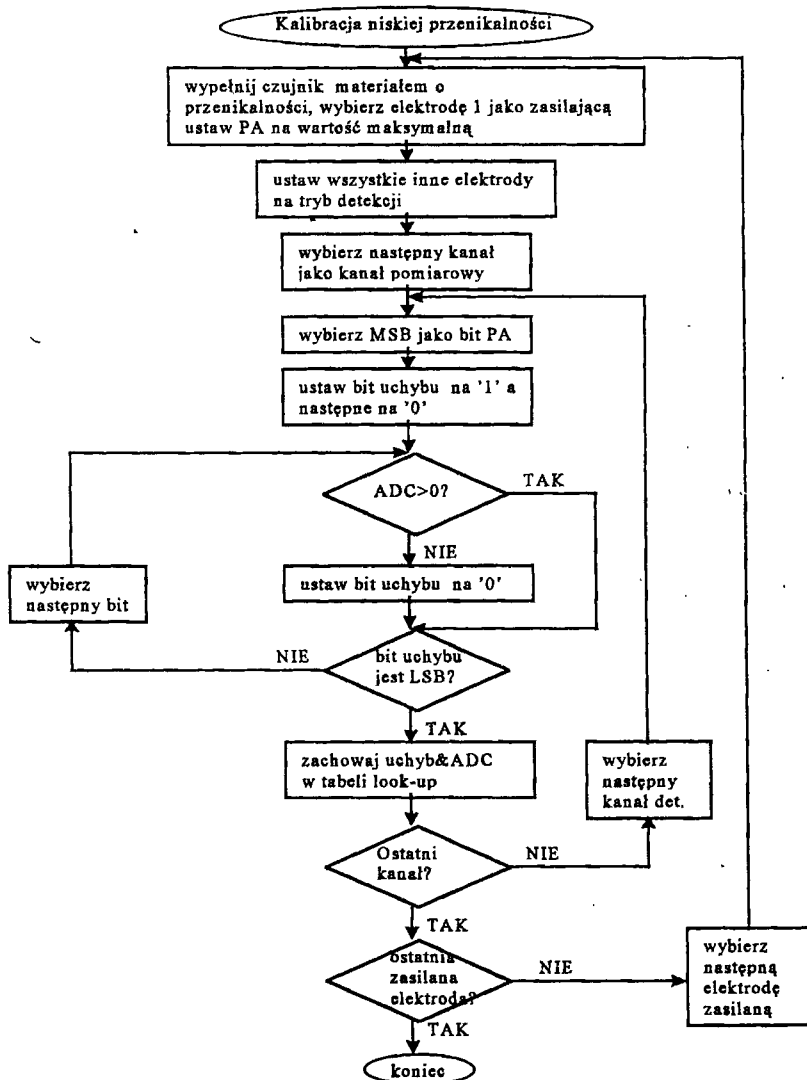


Rys.1. Schemat systemu tomografii obecnie produkowanego przez UMIST i PT Ltd.

System jest zazwyczaj kalibrowany wykorzystując dwa materiały mające być przedmiotem uzyskania obrazu, aby być pewnym, że punkty zerowy i pełnej skali są właściwe. Dlatego też ta metoda kalibracji nazywa się metodą dwupunktową. Procedura kalibracji ustawia zbiór współczynników, które określają wartości uchybów i wartości wzmacnień jakie będą zastosowane przy pomiarach pojemności dla każdej z poszczególnych par elektrod w czasie zbierania

danych procesu. Kalibracja jest trzystopniowa:

1. Czujnik zostaje wypełniony materiałem o niskiej przenikalności. Przy ustawienia wzmocnień maksymalnych na CMC uruchamiany jest kolejno układ kompensujący dla każdej pary elektrod. Wszystkie wartości uchybów wymaganych do skompensowania układu są zbierane jako zliczanie M1 odpowiednich DAC (66 wartości dla 12 elektrodowego systemu). Prowadzi to do tego, że stałe pojemności związane z badanym materiałem o niskiej przenikalności czujnika zostają anulowane. Na rys.2 podano schemat blokowy postępowania przy kalibracji w tym kroku.



Rys.2. Schemat blokowy postępowania przy kalibracji dla niskiej przenikalności ośrodka badanego.

2. Czujnik zostaje wypełniony materiałem o wysokiej przenikalności. Stosując te same wartości uchybów, które zostały określone w pierwszym kroku, współczynnik wzmocnienia (wzmocnienie) PA rośnie dopóki napięcie wejściowe ADC osiągnie wartość ok. 4 V, odpowiadającemu liczbie  $M_3$  przetwornika ADC. Współczynniki wzmocnienia (wzmocnienie), określone jako liczby  $M_2$  przetwornika DAC zostają zbierane dla każdej z par elektrod czujnika. Jeśli nie jest możliwe ustawienie wyjścia CMC na wartość 4V, współczynniki zostają ustawiane na wartość maksymalną a wartości wyjściowe są zapisywane jako odpowiadające liczbom  $M_3$  przetwornika ADC. Ten etap określa specjalny zbiór współczynników wzmocnienia  $M_2$ , które są wykorzystane następnie przy pomiarach pojemności w czasie zbierania danych procesu. Rys.3. podaje schemat blokowy procedury tego stopnia kalibracji.

3. Ten końcowy stopień kalibracji dokonuje pomiaru w przypadkach wartości pojemności, które pojawiają się na wyjściu CMC, gdy napięcie wzbudzające jest doprowadzone do zera. Mimo to, że wyjście na CMC powinno być w tych warunkach równe zero, kombinacja uchybów wzmacniacza DC oraz rozproszenie (leakage) sygnałów sterujących bramki poprzez przełączniki CMOS, wykorzystanych w przetwornikach pojemnościowych (tzw. wstrzyknięcie ładunków) są źródłem błędów. Te przypadkowe wartości pojemności są mierzone dla każdego z 11 przetworników pojemnościowych. Więcej o tym problemie kalibracji można znaleźć w [2]

Dwa pierwsze kroki generują dwa zbiory pojemności  $C_l$  oraz  $C_h$  odpowiadającym niskiej i wysokiej przenikalności materiałów i zostały wyliczone według następującej zależności

$$C = \frac{\left( \frac{FM_3}{4095K_{sh}} + V_{r2}K_{r2} \right) * \frac{1023}{K_{d2} K_{d2}M_2} + V_{r10} * \left( \frac{K_{d1}M_1}{1023} + K_{r1} \right)}{K_1 K_{a1}} (pF)$$

Gdzie:  $K_1$  – czułość układu pomiarowego pojemności (V/pF)

$K_{a1}, K_{a2}$  – wzmocnienie wzmacniaczy DC (V/V)

$K_{r1}, K_{r2}$  – wzmocnienie wzmacniaczy DC napięcia odniesienia 1 i 2 (V/V)

$K_{d1}, K_{d2}$  – współczynniki wzmocnienia DAC, związane z ich nieliniowością

$K_{sh}$  – wzmocnienie wzmacniacza próbkowania z pamięcią (V/V)

$V_{r1}, V_{r2}$  -- napięcia odniesienia (V)

$M_1$  – wartość uchybu cyfrowego ustawionego na wyjściu DAC

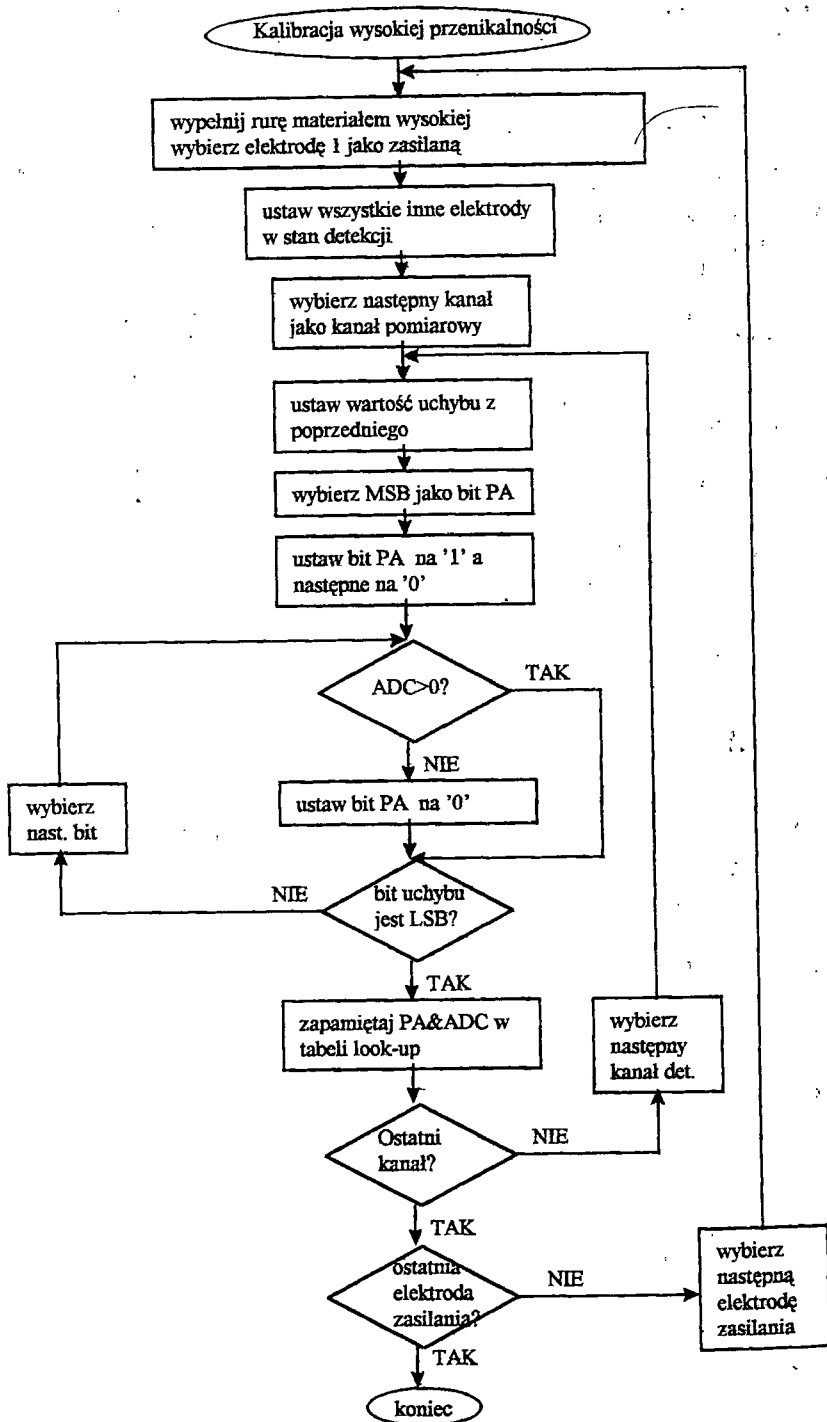
$M_2$  -- współczynnik cyfrowej wzmocnienie innego DAC

$M_3$  – odczyt ADC

F – zakres całkowity wejścia ADC (V)

W procesie zbierania danych wartości uchybów i współczynników wzmocnienia są stałe i równe wartościom ustawionym w czasie kalibracji. Pojemności między elektrodami są uzyskiwane z pomiarów  $M_1, M_2, M_3$  i są korygowane dla pojemności przypadkowych. Skorygowane wartości pojemności między elektrodami są normalizowane do wartości  $\lambda$ , które normalnie mieszczą się między 0 (dla materiałów o małej przenikalności) a 1 (materiałów o wysokiej przenikalności).

$$\lambda = \frac{C_m - C_l}{C_h - C_l}$$



Rys.3. Schemat blokowy postępowania przy kalibracji dla wysokiej przenikalności ośrodka badanego.

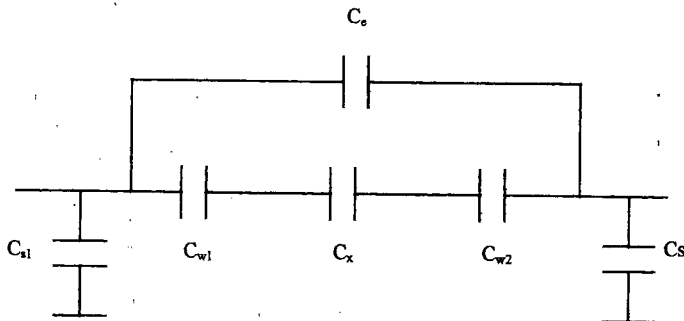
Te znormalizowane pojemności są następnie wykorzystane do rekonstrukcji obrazów przy zastosowaniu odpowiednich algorytmów. Tego rodzaju kalibracja została zastosowana do zobrazowania przepływu ropa/gaz, ropa/woda, rozkład ciała stałego w gazie w złożu fluidalnym [1], gęstość gaz/ciało stałe w transporcie pneumatycznym [3], oraz monitorowaniu zjawiska 'młota wodnego' (gaz/woda) [4].

### 1.3. Kalibracja jednopunktowa.

W wielu przypadkach jest trudno, a nawet nie można zastosować dwupunktowej kalibracji, np. przy otrzymywaniu obrazu płomienia wewnątrz komory spalania [5], mały przepływ gaz/ciało stałe w transporcie pneumatycznym lub zbiornikach procesowych w operacjach ciągłych. Jeśli system jest kalibrowany przy zastosowaniu materiałów o niewłaściwie wysokiej przenikalności wtedy system pomiarowy będzie miał za wysoki zakres pomiarowy powodując stratę czułości i znaczące problemy nieliniowości. W tym przypadku czujnik może jedynie zostać skalibrowany bezpośrednio tylko dla materiału o niskiej przenikalności (zazwyczaj powietrze), natomiast współczynnik kalibracji wysokiej przenikalności musi zostać wyznaczony w inny sposób. W metodzie jednopunktowej kalibracji system tomografii pojemnościowej jest kalibrowany jedynie dla małej przenikalności. W wielu przypadkach jest realizowane przy pustym czujniku. Kalibrację współczynnika wysokiej przenikalności uzyskuje się przez przewidywanie bazując na wartościach uzyskanych dla małej przenikalności oraz stosunku przenikalności materiałów mających być zobrazowane. Mimo zastosowanie metody przewidywania niezbędne jest wyliczenie pojemności między elektrodami gdy czujnik jest wypełniony materiałem o wysokiej przenikalności.

#### 1.3.1. Metoda oparta na modelu matematycznym

Jedną z metod stosowaną do kalibracji jednopunktowej jest metoda oparta na modelu matematycznym każdej pary elektrod czujnika przedstawionej na rys.4.



Rys.4. Model pojemności elektrod czujnika.

Model ten może się zmieniać ze strukturą czujnika, wewnętrznymi i zewnętrznymi elektrodami, z lub bez ekranów promieniowych. Na ogół mierzone pojemności zawierają pojemności wynikające bezpośrednio z materiału znajdującego się między elektrodami, dwóch pojemności do ścian rury, które mają prawie stałą wartość, zewnętrzną pojemność między elektrodami poprzez przestrzeń poza elektrodami oraz dwie pojemności pasywnicze.

Te ostatnie mogą być pominięte gdy zastosowany jest układ pomiarowy odporny na te pojem-

ności. Przez wypełnienie czujnika różnymi materiałami, w zależności od typu czujnika należy dokonać jednego lub dwa pomiary. Nieznane (tzn. pojemność wewnętrzna dla powietrza, pojemność do ścian rury oraz/ lub zewnętrzne pojemności między elektrodami) mogą być otrzymane z tych pomiarów.

Gdy pojemność wewnętrzna dla powietrza została znaleziona, wewnętrzne pojemności dla materiałów o względnej przenikalności w pewnym przedziale mogą być wyliczone, ponieważ pojemność wewnętrzna jest proporcjonalna do przenikalności, oraz całkowita pojemność może być wyliczona dla materiału o wysokiej przenikalności. W tym przypadku kalibracje dla niskiej przenikalności jest taka sama jak na rys.2. Procedura „kalibracji” dla wysokiej przenikalności podano na rys.5., głównie dla ustalenia współczynników wzmocnienia. Tą drogą może być ustalony zakres pomiarowy przez zdefiniowanie wartości przenikalności materiału, który ma być zobrazowany.

Ten rodzaj kalibracji został wykorzystany przy uzyskiwaniu obrazu płomienia w wewnętrznej komorze cylindra silnika. Pojemność modelu matematycznego została wyliczona z pomiaru pojemności gdy czujnik jest pusty i wypełniony polistyrenem ( $\epsilon_r=1.5$ ) (Uwaga: stała dielektryczna polistyrenu jest 2.56 [6], ale ze względu na powietrze między kulkami przenikalność wynosi ok.1.5). Zakres pomiarowy został ustawiony dla  $\epsilon_r=1.2$ . Obraz płomienia był prawie w pełnym zakresie.

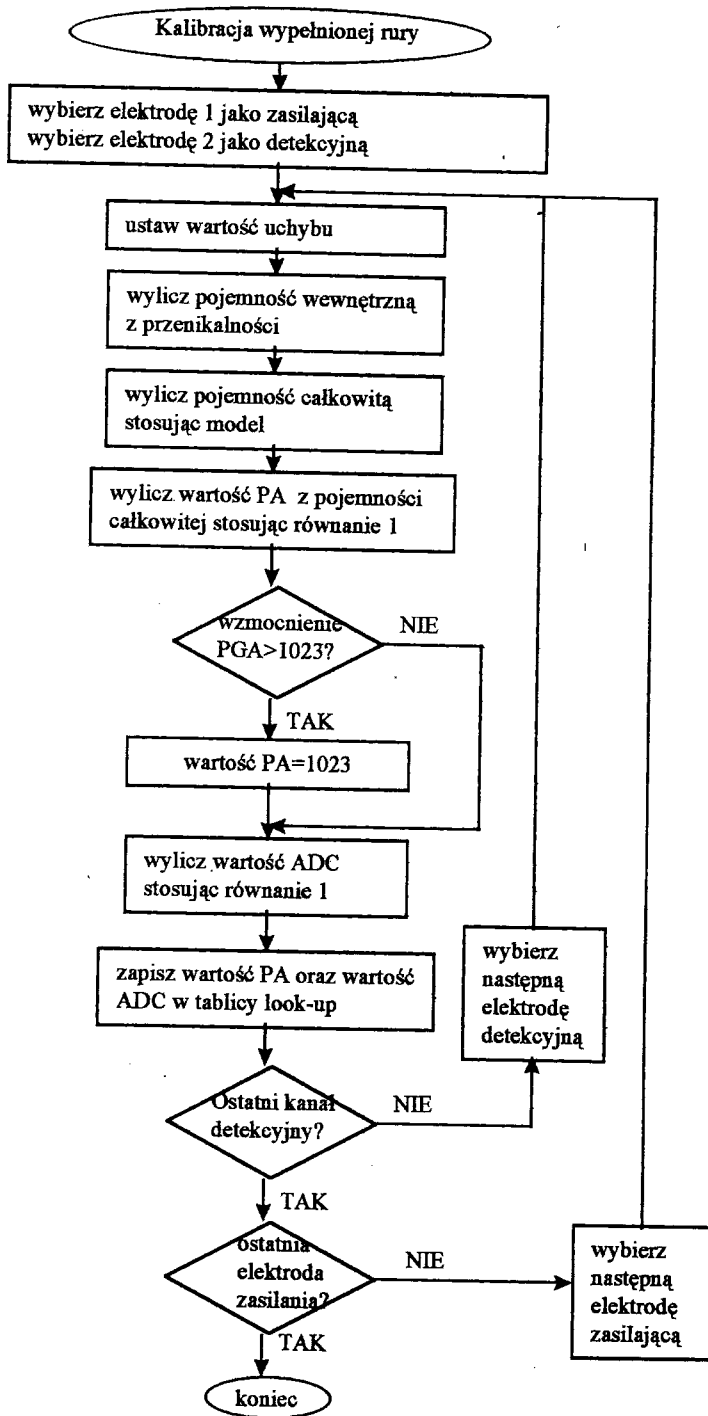
Metoda ta została zastosowana z sukcesem przy czujnikach o małej ilości elektrod oraz względnie długich elektrodach. (tzn. przy czujnikach o dużych wartościach pojemności między elektrodami.) Niestety przy mniejszych elektrodach efekt jest mniejszy ze względu na efekt brzegowy i błędów pomiarowych, które występują w systemie UMIST, szczególnie ze względu na przypadkowe sprzężenia między kanałami pomiarowymi.

### 1.3.2. Metody elementów skończonych i bazujących na doświadczeniach

Alternatywnym postępowaniem przy przewidywaniu wartości pojemności wysokiej przenikalności jest zastosowanie techniki elementów skończonych do wyliczenia wartości pojemności między elektrodami dla danej wartości przenikalności. I ta metoda daje większe błędy przy małych elektrodach.

Trzecią metodą kalibracji jednopunktowej, która obecnie jest jeszcze w stadium badania, jest metodą czysto empiryczną i odnosi się do mierzenia zbioru pojemności między elektrodami z czujnikiem wypełnionym różnymi materiałami o znanej przenikalności. Przedmiotem jest ustalenie zbioru krzywych empirycznych lub w formie tabel dla każdej wartości pojemności między elektrodami jako funkcji przenikalności. Gdy te dane zostaną uzyskane będzie możliwe zebranie punktów kalibracji wysokich przenikalności dla danego poziomu przenikalności przez interpretację z krzywych pomiarowych jak również zestawienie zestawu wzmocnień lub czułości dla każdej wartości.

Wadą metody jest fakt, że wyniki są unikalne dla danego rozwiązania konstrukcyjnego czujnika i systemu tomografii. Tym niemniej szersze informacje bardziej dokładne o obwodach pomiarowych pojemności stają się niezbędne i sądzimy, że zostaną zaoferowane bardziej skuteczne metody kalibracji jednopunktowej.



Rys.5. Schemat blokowy procedury kalibracji jednopunktowej

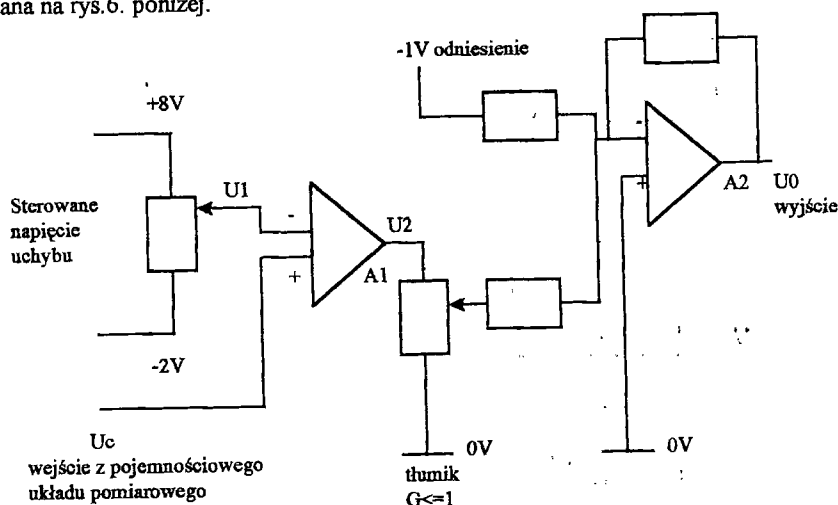


## 1.4. Kalibracja adaptacyjna

Dalszym rozwojem metod kalibracji jednopunktowej jest metoda adaptacyjnej kalibracji. W tym przypadku zakres pomiarowy nie jest stały ale zmienia się zgodnie z aktualną wartością przenikalności materiału. To umożliwi uzyskanie optymalnych warunków pomiarowych w czasie rzeczywistym. Potencjalne zastosowaniem może być ubogie przepływy gaz/ ciało stałe (np. 5%) w transporcie pneumatycznym, gdzie odpowiednia przenikalność ubogiego przepływu jest poniżej przepływu skupionego materiału stałego i może zmieniać się znacząco co pewien czas.

## 2. ZASADA POMIARÓW

W tej części zostaną podane szczegółowiej rozwiązania techniczne elektronicznego układu pomiarów i kalibracji. Zasada przetwarzania wspólnej części pomiarów analogowych została podana na rys.6. poniżej.



Rys.6. Zasada działania wspólnego układu analogowego

Para napięć wyjściowych wybranych przez multiplexer są odejmowane w wzmacniaczu różnicowym otrzymując na wyjściu napięcie  $U_c$ :

$$U_c = U_b - U_a = 2 \cdot f \cdot U_s \cdot R_f \cdot C_x + e_2 - e_1$$

Napięcie wyjściowe  $U_c$  z układów związanych z poszczególnymi parami elektrod jest proporcjonalne do pojemności  $C_x$ . Jeśli dwa błędy napięciowe są podobne wtedy będą się częściowo eliminować a przez to zakłócające wyjście wynikające z zakłócającego ładunku zostanie zminimalizowany. Tym niemniej może pozostać jeszcze nie skompensowany ładunek porównywalny z wartością wyjściową nieznaną pojemności. Metoda pomiarowa musi rozdzielić wartości tych dwóch napięć.

Wspólny obwód analogowy działa na zasadzie mostka i jego uproszczony schemat podano powyżej. Napięcie z układu pomiarowego pojemności  $U_c$  jest mierzone przez porównanie go z

napięciem  $U_1$  uzyskanym z układu sterowania napięciem uchybu. Gdy układ został zrównoważony napięcie wyjściowe wzmacniacza A1 jest równe zero. Napięcie z A1 jest tłumione i sumowane z napięciem odniesienia 1V we wzmacniaczu A2. W ten sposób uzyskuje się na wyjściu wzmacniacza A2 napięcie odniesienia równe 1V i to napięcie jest oznaczone jako zerowe napięcie bilansujące obwód VBAL. Jest ono mierzone na początku procedury kalibracji i jest następnie stosowane jako punkt odniesienia do dalszych pomiarów.

Mówiąc dokładniej zsumowane napięcie  $U_c$  z układów pomiarowych pojemności tworzą jedno wejście do wzmacniacza różnicowego A1. Drugie wejście tego wzmacniacza jest zmieniane napięciem uchybu  $U_1$  w zakresie  $-1$  do  $+8V$ , uzyskanych z 10 bitowego programowalnego układu sterującego napięciem uchybu. Wyjście ze wzmacniacza A1 jest tłumione ( $G \leq 1$ ) przez programowalny, 10 bitowy tłumik a wyjście tego tłumika staje się jednym wejściem wzmacniacza sumującego A2 o wzmocnieniu równym jedności. Drugim wejściem wzmacniacza A2 jest stałe napięcie odniesienia (w przybliżeniu równe  $-1V$ ). Wyjście wzmacniacza A2 jest mierzone przy zastosowaniu 12 bitowego przetwornika analogowo - cyfrowego (ADC).

Nieznaną pojemność może być wyliczona w zasadzie z napięcia uchybu  $U_1$  koniecznego dla zrównoważenia do zera  $U_2$  stosując powyższą zależność.

### 3. FORMAT PLIKU DANYCH KALIBRACJI

W pliku kalibracji zapisane są następujące dane:

1. Współczynniki równowagi niskiej przenikalności M3L(ij) (wartości ADC 0 - 4095) (66 danych)
2. Współczynniki uchybu niskiej przenikalności M1L(ij) (wartości DAC 0-1023) (66 danych)
3. Współczynniki równowagi wysokiej przenikalności M3H(ij) (wartości ADC 0 - 4095) (66 danych)
4. Współczynniki wzmocnienia wysokiej przenikalności M2H(ij) (wartości DAC 0-1023) (66 danych)
5. Współczynniki równowagi zera M30(j) (wartości ADC 0 - 4095) (12 danych)
6. Współczynniki zera uchybu M10(j) (wartości DAC 0 - 1023) (12 danych)

Dane są wyświetlane jako zbiór współczynników par międzyelektrodowych jak podano poniżej, gdzie 1-2 określa współczynnik, który odpowiada pojemności pomierzonej między elektrodami 1 oraz 2 itp.

#### Kombinacje par elektrod

1-2, 1-3, 1-4, 1-5, 1-6, 1-7, 1-8, 1-9, 1-10, 1-11, 1-12,  
2-3, 2-4, 2-5, 2-6, 2-7, 2-8, 2-9, 2-10, 2-11, 2-12,  
3-4, 3-5, 3-6, 3-7, 3-8, 3-9, 3-10, 3-11, 3-12,  
4-5, 4-6, 4-7, 4-8, 4-9, 4-10, 4-11, 4-12  
5-6, 5-7, 5-8, 5-9, 5-10, 5-11, 5-12,  
6-7, 6-8, 6-9, 6-10, 6-11, 6-12,  
7-8, 7-9, 7-10, 7-11, 7-12,  
8-9, 8-10, 8-11, 8-12,  
9-10, 9-11, 9-12,

#### 4. WYNIKI POMIARÓW KALIBRACYJNYCH

Dane kalibracyjne odniesione do wzorcowej laski.

12

978 928 897 995 1006 922 922 1014 1002 1029 1003

896 1043 1025 1042 1008 910 907 955 1001 926

962 924 956 1046 978 1043 972 964 1017

887 1036 975 998 904 898 965 1002

1063 906 955 991 1027 981 977

1001 1046 939 1027 967 986

1000 1040 1018 916 1016

907 965 915 948

954 946 1037

943 925

1008

#### 5. PODSUMOWANIE

System kalibracji tomografii pojemnościowej jest bardzo ważnym zarówno ze względu na dokładność pomiaru jak również ze względu na rekonstrukcję obrazu. Zazwyczaj stosowana jest metoda dwupunktowa, która wymaga wypełnienie czujników dwoma materiałami po kolei. W wielu przypadkach jest wprost nie możliwe stosowanie tej metody dwupunktowej kalibracji. W takich przypadkach należy zastosować metodę jednopunktowej kalibracji, która bazuje na modelu matematycznym, elementach skończonych lub eksperymencie. Ta metoda wymaga jedynie wypełnienia czujnika materiałem o małej wartości przenikalności a zakres systemu pomiarowego może być ustalony przez określenie wartości przenikalności materiału będącego przedmiotem uzyskania obrazu. Jeśli jest to konieczne może być zastosowana metoda adaptacyjna kalibracji tak aby zakres pomiarów był zawsze optymalny.

Te zasady kalibracji mogą również być zastosowane dla innych elektrycznych systemów tomografii np. opornościowej, indukcji elektromagnetycznej.

#### LITERATURA

1. Barber D.C., Brown B.H., Applied potential tomography, *J.Phys.E. Sci. Instr.* 17 723-33
2. Beck M S, Plaskowski A, Otrzymywanie obrazu przepływu, *PAK* 10/87 pp 221-223
3. Beck M S, Plaskowski A A, Cross-Correlation Flowmeters - their design and application, Adam Hilder, Bristol 1987
4. Beck M.S. and Williams R.A. - Sensor Design and Selection in Frontiers of Industrial Process Tomography, (New York Engineering Foundation) 1995
5. M.S. Beck and R.A. Williams Process tomography: a European innovation and its applications - pp 215-224, Institute of Physics Publishing- Special issue: Process Tomography March 1996
6. Beck M.S., Williams R.A., Hoyle B.S. Morris M.A. Waterfall R.C. (eds) - Process Tomography '95 Implementation for Industrial Process (Manchester UMIST) 1995