

*pasmo przetwornika,
elektrometryczny przetwornik transimpedancyjny,
spektrometria ruchliwości jonów*

Piotr MADEJ*

PASMO PRZETWORNIKA PRĄD–NAPIĘCIE W SPEKTROMETRII RUCHLIWOŚCI JONÓW

W Spektrometrii Ruchliwości Jonów stosowany jest czuły przetwornik zbierający ładunek jonów osiagających końcową elektrodę w komorze. Wyjściowy, napięciowy sygnał przetwornika ma postać impulsów o kształcie zbliżonym do trójkąta, o amplitudzie od dziesiątków pikoamperów do pojedynczych nanoamperów i czasie trwania od 0,2 ms do kilku ms. Zarówno amplituda, jak kształt i moment pojawianie się tych impulsów są podstawą do identyfikacji rodzaju jonów dopływających do elektrody. Przetwornik zatem musi pracować w czasie rzeczywistym; jego pętla sprzężenia musi być rezystancyjna. Istotny jest poziom błędu zera – nieczułości przetwornika, zależny od napięcia niezrównoważenia i prądu polaryzacji zastosowanego wzmacniacza operacyjnego oraz od szumów całego przetwornika i komory, w której jony zdążają do elektrody zbiorczej. Celowe zatem jest ograniczenie pasma pracy przetwornika aby zmniejszyć wpływ wymienionych czynników; od dołu – dolna częstotliwość graniczna różna od zera oraz od góry – górna częstotliwość graniczna jak najmniejsza. Ale jednocześnie nie można zanadto zniekształcić istotnych cech sygnału, np. jego zbroczy. W opracowaniu przedstawiono próbę oszacowania minimalnego pasma pracy przetwornika w oparciu o przyjęte z literatury krytyczne wartości czasów trwania impulsów.

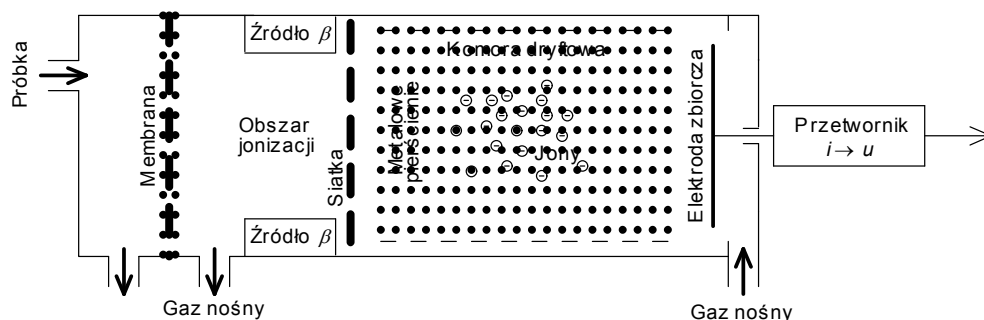
1. SPEKTROMETRIA RUCHLIWOŚCI JONÓW

Spektrometria ruchliwości jonów (ang. *Ion Mobility Spectrometry*, [2], [3], [5]) jest jedną z metod stosowanych w wykrywaniu śladowych zawartości substancji, szczególnie niepożądanych, w tym szkodliwych lub wręcz niebezpiecznych, jak m.in. narkotyki, gazy bojowe czy materiały wybuchowe. Zasada pracy spektrometru ruchliwości jonów opiera się na (rys. 1):

- wprowadzeniu gazowej próbki badanej substancji do spektrometru,

* Politechnika Wroclawska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: piotr.madej@pwr.edu.pl

- zjonizowaniu cząsteczek próbki, które przeszły przez półprzepuszczalną membranę, zazwyczaj za pomocą źródła promieniowania β ,
- otwarciu dostępu do komory dryftowej dla jonów określonej polaryzacji za pomocą impulsu „okna” na siatce,
- poddaniu jonów dwóm siłom w komorze dryftowej; jednej przyspieszającej od pola elektrycznego, drugiej hamującej od gazu obojętnego, płynącego przeciwnie do ruchu jonów,
- wychwytywaniu jonów za pomocą zbiorczej elektrody,
- wzmacnianiu sygnału z elektrody i przetwarzaniu go na sygnał napięciowy – impuls o kształcie zbliżonym do trójkąta,
- analizie kształtu impulsów, przede wszystkim: momentów pojawiania się, amplitud, czasów trwania impulsów i ich zbroczy, porównaniu z danymi z bibliotek spektrogramów.



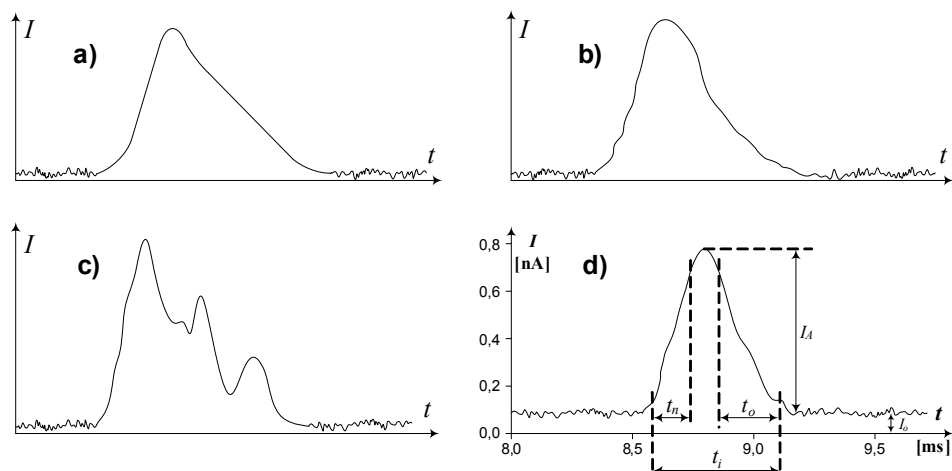
Rys. 1. Ilustracja idei pracy spektrometru ruchliwości jonów

Wymienione, analizowane parametry impulsów zależą od masy, ładunku i rozmiarów jonów, a więc od ich ruchliwości w komorze dryftowej; tym samym są charakterystyczne dla konkretnego pierwiastka lub cząsteczki związku chemicznego. Porównanie parametrów impulsu z danymi zebranymi dotąd, dostępnymi w różnych bazach pozwala z dużym prawdopodobieństwem wykryć i zidentyfikować obce składniki np. w powietrzu.

Tego typu spektrometry mają na tyle niewielkie rozmiary i zapotrzebowanie na energię, że mogą być urządzeniami przenośnymi, o dużych możliwościach wykrywania niepożądanych i niebezpiecznych substancji. Czulość ich może być nawet rzędu $\mu\text{g}/\text{m}^3$ czyli na poziomie stężenia cząsteczkowego 10^{-9} [3].

Amplituda impulsów prądowych (I_A – rys. 2, [2], [3]) jest rzędu dziesiątek do setek pA, rzadko pojedynczych nA, czas trwania t_i zależy od czasu otwarcia komory i jest rzędu od setek μs w spektrometrach o wysokiej czułości do pojedynczych ms a czasy narostu t_n i opadania t_o średnio do około 45% czasu t_i . W przypadku impulsów niesy-

metrycznych może być to stosunek rzędu $0,25/0,65t_i$. Zakłócenia ograniczające czułość (przesunięcie i fluktuacje poziomu zerowego I_0) osiągają poziom kilkunastu do kilkudziesięciu pA.

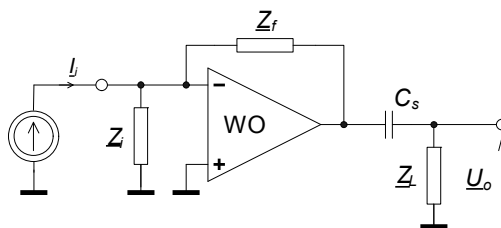


Rys. 2. Przykłady a)–c) kształtu impulsu prądowego na elektrodzie zbiorczej oraz d) zdefiniowanie istotnych wielkości wraz z przykładowymi wartościami

2. PRZETWORNIK TRANSIMPEDANCYJNY W SPEKTROMETRZE

Jednym z istotnych podzespołów, umożliwiających osiągnięcie wymaganej wykrywalności jest przetwornik $i \rightarrow u$ połączony ze zbiorczą elektrodą, zamieniający sygnał prądowy (zmiany ładunku w czasie) na sygnał napięciowy i równocześnie wzmacniający jego energię. Tak zdefiniowany sposób przetwarzania oznacza, że musi to być przetwornik transimpedancyjny (rys. 3, [4]).

Wymagany współczynnik przetwarzania osiąga się dużą wartością rezystancji R_f w pętli sprzężenia (wraz z równoległą C_f tworzą Z_f) wokół wzmacniacza operacyjnego WO o cechach elektrometrycznych, tj. o bardzo małym wejściowym prądzie polaryzacji i bardzo dużej impedancji wejściowej. Wierne odtworzenie na wyjściu impulsów ze zbiorczej elektrody wymagałoby przetwornika o częstotliwościach granicznych; bardzo małej a najlepiej zerowej dolnej oraz dużej górnej. Jednak oznaczałoby to duże pasmo częstotliwościowe dla szumu niskoczęstotliwościowego – różowego szczególnie uciążliwego w czułych układach elektrometrycznych oraz szumu białego. Efektem byłby wzrost poziomu błędu zera I_0 . Dlatego należy ograniczyć pasmo do rozsądnego minimum, pozwalającego jeszcze na wiarygodną identyfikację wykrytej substancji przy dobrej czułości.



Rys. 3. Podstawowa struktura przetwornika transimpedancyjnego, o celowo ograniczonych częstotliwościach granicznych

O dolnej częstotliwości granicznej f_d układu z rys. 3 decyduje czwórnik na wyjściu z kondensatorem szeregowym C_s i impedancją obciążenia Z_L o składowych $R_L||C_L$. Natomiast o górnej f_g , przy spełnieniu warunku

$$f_T \gg \frac{C_i}{2\pi R_f C_f^2} \quad (1)$$

decyduje stała czasowa $R_f C_f$ i ostatecznie (rys. 4)

$$\omega_d = 2\pi f_d = \frac{1}{R_L(C_s + C_L)}, \quad \omega_g = 2\pi f_g = \frac{1}{R_f C_f}, \quad (2)$$

gdzie: $\omega_d, \omega_g, f_d, f_g$ – pulsacje i częstotliwości, dolna i górna, wg kryterium – 3 dB,
 $f_T = BW1$ – pasmo jednostkowe wzmacniacza operacyjnego o wewnętrznej kompensacji częstotliwościowej, czyli pasmo wtórnika,
 R_f, C_f – równoległe składniki impedancji w pętli Z_f ,
 C_i – równoległy składnik w zastępczej impedancji Z_i , obejmującej wszystkie równoległe impedancje na wejściu układu,
 C_s – szeregową pojemność na wyjściu, do separacji składowej stałej,
 R_L, C_L – równoległe składniki w impedancji Z_L obciążającej wyjście układu.
 Moduł transmitancji rośnie w zakresie małych częstotliwości (odcinek 1 na rys. 4)

$$\underline{k}_Z = -jR_f(\omega R_L C_s) \quad \text{do } \omega_d, \quad (3)$$

następnie ma stałą wartość między ω_d i ω_g ; jest to właściwy, roboczy odcinek 2

$$\underline{k}_Z = -R_f \frac{C_s}{C_s + C_L}, \quad \text{przy } \omega_d < \omega < \omega_g, \quad (4)$$

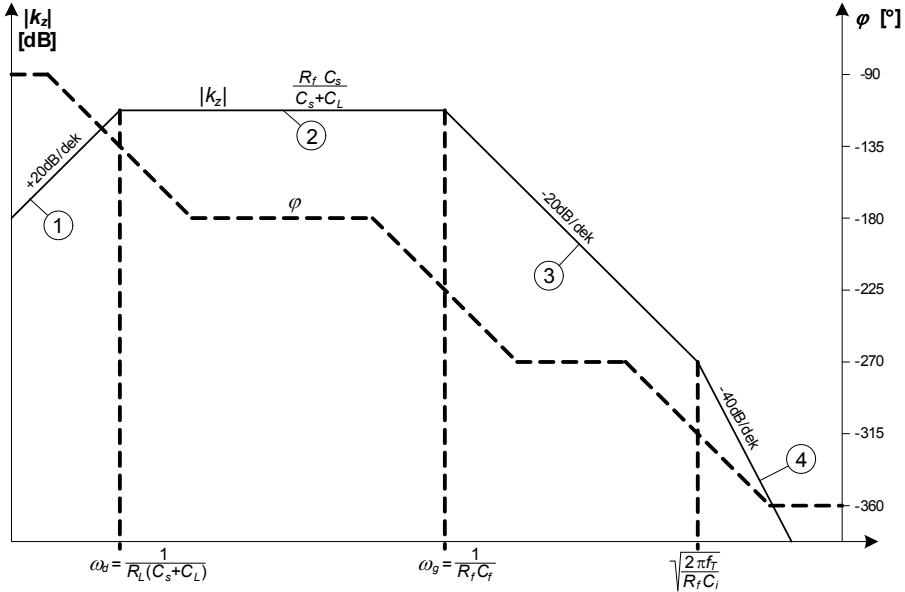
dalej maleje w tempie – 20 dB/dek powyżej ω_g – odcinek 3

$$\underline{k}_Z = j \frac{1}{\omega C_f} \cdot \frac{C_s}{C_s + C_L} \quad \text{przy } \omega > \omega_g, \quad (5)$$

aż w końcu przyspiesza malenie do -40 dB/dek na odcinku 4

$$\underline{k}_z = \frac{2\pi f_T}{\omega^2 C_i} \cdot \frac{C_s}{C_s + C_L} \quad \text{przy} \quad \omega > \sqrt{\frac{2\pi f_T}{R_f C_i}}, \quad (6)$$

Następnie należy powiązać parametry impulsów z właściwościami pasmowymi przetwornika – sformułować warunki na częstotliwości graniczne f_d i f_g .



Rys. 4. Aproksymacyjne charakterystyki częstotliwościowe przetwornika z rys. 3

3. WARUNKI NA PASMO PRZETWORNIKA

Dolna częstotliwość graniczna przetwornika ma wpływ na wierzchołki impulsów, powodując efekt tzw. zwisu. Do analizy przyjęto, że wierzchołek modelowego impulsu z rys. 2d stanowi czasowo około 20% całego impulsu t_i . Aby zniekształcenia spowodowane zwisem nie przekroczyły 5% amplitudy I_A , powinien być spełniony warunek, wynikający ze znanych z literatury zależności, np. [1]:

$$2\pi f_d = \omega_d < \frac{-1}{0,2t_i} \ln\left(1 - \frac{\Delta I_A}{I_A}\right) \approx \frac{1}{0,2t_i} \cdot \frac{\Delta I_A}{I_A} = \frac{0,25}{t_i}. \quad (7)$$

Decydujące w tym przypadku będą czasy długich impulsów. Na przykład gdy $t_i = 5$ ms, maksymalna częstotliwość f_d obliczona z (7) powinna być mniejsza od 8 Hz.

Mała wartość górnej częstotliwości granicznej powoduje zniekształcenia zbocza impulsów i zwiększa czas ich trwania. W punkcie 1 podano, że minimalny czas trwania zbocza t_n będzie stanowił około 25% całego impulsu t_i . Tzw. własny czas narostu przetwornika t_{np} , zdefiniowany dla idealnego skoku jednostkowego na wejściu, nie powinien być dłuższy niż około 1/3 czasu zbocza przetwarzanego impulsu. Zapewni to zmianę czasu zbocza nie większą od 5%. Odpowiedni warunek na częstotliwość graniczną, wyprowadzony na podstawie zależności podanych w [1] ma postać

$$2\pi f_g = \omega_g > \frac{2,2}{t_{np}} = \frac{6,6}{t_n} \approx \frac{26}{t_i} \quad (8)$$

i dla krótkich impulsów o t_i np. rzędu 0,5 ms wymagana jest górna częstotliwość graniczna f_g większa od 8,3 kHz.

LITERATURA

- [1] GOLDENBERG L.M., *Teoria i obliczanie półprzewodnikowych układów impulsowych*, WNT, Warszawa 1972, 11–40.
- [2] KOPCZYNSKI D., BAUMBACH J.J., RAHMANN S., *Peak modeling for Ion Mobility Spectrometry measurements*, 20th European Signal Processing Conference, Bucharest, Romania, August 27–31, 2012, 1801–1805.
- [3] MAZIEJUK M., MIERCZYK J., *Spektrometry ruchliwości jonów w zastosowaniu do wykrywania bojowych substancji toksycznych*, Biuletyn WAT, vol. LVI, nr 1, Warszawa 2007, 159–177.
- [4] NAWROCKI Z., *Wzmacniacze operacyjne i przetworniki pomiarowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008.
- [5] SKOWRON M. i in., *Zarys metod analitycznych w badaniach oddechu dla celów diagnostyki medycznej*, Raport nr 2055/Ch, Instytut Fizyki Jądrowej PAN, Kraków 2012.

BANDWIDTH OF THE CURRENT–VOLTAGE CONVERTER IN THE ION MOBILITY SPECTROMETRY

Described a method for the selection of the converter frequency band, which is used to amplify signals from chamber in the ion mobility spectrometer. Bandwidth should not be broad because of the noise and bias current, offset voltage in the OpAmp. Awarded permissible errors of signal amplitude and slope of 5%. Presented formulas to calculate the frequency limits of the converter.