

Henryk URZĘDNICZOK

POLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT METROLOGII, ELEKTRONIKI I AUTOMATYKI
ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice

Numeryczna korekcja dynamiki półprzewodnikowych czujników gazów

Dr inż. Henryk URZĘDNICZOK

Ukończył studia na wydziale elektrycznym Politechniki Śląskiej, specjalność automatyka i metrologia elektryczna. Aktualnie jest zatrudniony na stanowisku adiunkta w Instytucie Metrologii, Elektroniki i Automatyki Politechniki Śląskiej. Jego zainteresowania naukowe dotyczą czujników, układów kondycjonowania i przetworników pomiarowych wielkości nieelektrycznych, a w szczególności obejmują zagadnienia kalibracji i korekcy statycznej czujników nieselektywnych oraz korekcy dynamicznej.



e-mail: henryk.urzedniczok@polsl.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę oraz wyniki badań właściwości dynamicznych typowego półprzewodnikowego rezystancyjnego czujnika gazów. W oparciu o uzyskane wyniki zaproponowano model dynamiczny czujnika, wyznaczono jego współczynniki oraz przedstawiono dopasowaną do tego modelu numeryczną procedurę korekcy dynamicznej zapewniającą istotne skrócenie czasu odpowiedzi przetwornika do pomiaru stężenia gazu. Pokazano skuteczność zaproponowanej metody korekcy.

Słowa kluczowe: czujniki gazów, czas odpowiedzi, właściwości dynamiczne, korekcja dynamiczna.

Numerical correction of dynamic properties of solid state gas sensors

Abstract

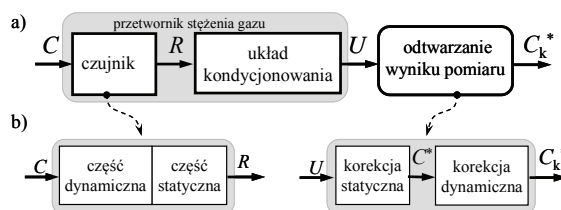
Solid state gas sensors have generally disadvantageous dynamic properties - their response time can reach several minutes or more. This is due to the fact that the chemical adsorption phenomena in the sensitive layer occur relatively slowly [1, 2]. In many measurement applications such a long response time is not acceptable. It is necessary to apply effective methods of dynamic correction. This paper presents a method and results of investigations of the dynamic properties of a typical semiconductor gas sensor with tin sensing layer. A numerical correction method is proposed, too. There were determined responses of the sensor to step changes in gas concentration by means of a measuring system shown schematically in Fig. 2. The results (see Figs. 3, 4 and 5) show that the first order inertia may be sufficient as an averaged dynamic model of the sensor. With respect to this model, the dynamic correction method is proposed. The procedure is illustrated in Fig. 6, and the calculation method is given in formula (3). Shortening of the step response time is expressed by the coefficient $\alpha \in (0, 1)$. Examples of application of that algorithm to reproduce the abruptly and sinusoidally varying gas concentration are shown in Figs. 7 and 8 (α was assumed equal to 1/3, which was the postulated 3-fold reduction of the step response time). The waveforms confirm the effectiveness of the proposed dynamic correction method.

Keywords: gas sensors, response time, dynamic properties, dynamic correction.

1. Wprowadzenie

Większość półprzewodnikowych, rezystancyjnych czujników gazów wykorzystujących tlenki metali (głównie dwutlenek cyny SnO_2) wykazuje dość znaczne czasy odpowiedzi na skokową zmianę stężenia gazów. Wynika to z faktu, że zjawiska adsorpcji chemicznej w warstwie czulej zachodzą relatywnie wolno [1, 2]. Sygnał wyjściowy przetwornika do pomiaru stężenia gazów osiąga wartość ustaloną po kilku, a czasem nawet po kilkunastu minutach. W wielu zastosowaniach pomiarowych tak długi czas odpowiedzi jest nie do zaakceptowania. Konieczne jest zastosowanie odpowiednio skutecznych metod korekcy dynamicznej. Realizacja techniczna takiej korekcy może być względnie prosta i nie musi pociągać za sobą konieczność rozbudowy toru pomiarowego, ponieważ ze względu na inne właściwości czujników (nielinio-

wość, nieselektywność) w każdym przypadku musi być stosowana procedura odtwarzania wyniku pomiaru obejmująca korekcję tych cech czujnika. Typowa struktura toru pomiarowego miernika do pomiaru stężeń gazów z czujnikiem nieselektywnym, uwzględniająca możliwość korekcy nielinowości statycznej charakterystyki przetwarzania i korekcję dynamiczną, pokazana jest na rysunku 1. Zmiana koncentracji (stężenia) C wybranego gazu w atmosferze otaczającej czujnik powoduje zmianę rezystancji R jego części czulej. Odpowiedni elektroniczny układ kondycjonowania realizuje przetwarzanie tej rezystancji na wielkość wyjściową przetwornika, tj. napięcie U . Umownie można tu wyróżnić część dynamiczną, wynikającą z zachodzącej w miarę upływu czasu adsorpcji (lub desorpcji) cząsteczek na powierzchni warstwy gazoczułej czujnika oraz część statyczną wynikającą ze zmian przewodności elektrycznej tej warstwy wskutek adsorpcji cząsteczek. Obliczanie wyniku pomiaru stężenia (ozn. C_k^*) na podstawie napięcia U (tzw. „zadanie odwrotne”) realizowane jest dzięki numerycznej procedurze odtwarzania, opartej na odpowiednio dobranym modelu odwrotnym statycznym, zapewniającym linearyzację statycznej charakterystyki przetwarzania całego toru pomiarowego i korekcję wpływu wielkości dodatkowych [3]. Uzupełnienie odtwarzania o algorytm korekcy dynamicznej, wyznaczający skorygowaną wartość stężenia C_k^* , pozwoli na uzyskanie ustalonych wskazań miernika stężenia gazu po znacznie krótszym czasie.



Rys. 1. Tor pomiarowy miernika stężenia gazów (a) i struktura czujnika oraz procedury odtwarzania wyniku (b)

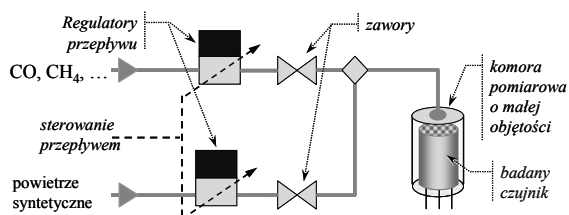
Fig. 1. Measuring chain of the gas concentration meter (a) and structures of sensor and the result recovery procedure (b)

2. Metoda badań właściwości dynamicznych czujników

Znane są metody korekcy dynamicznej nie wymagające pełnej znajomości modelu [4, 5], jednakże mogą być stosowane jedynie w torach pomiarowych zawierających co najmniej dwa czujniki. W przypadku stosowania pojedynczego czujnika, realizacja praktyczna korekcy dynamicznej bazuje na znajomości modelu dynamicznego tego czujnika. Pociąga to za sobą konieczność przeprowadzenia badań właściwości dynamicznych stosowanego czujnika, opracowania modelu dynamicznego czujnika, a następnie dopasowanej do niego procedury korekcy dynamicznej.

Wyznaczenie modelu dynamicznego czujnika może być oparte na analizie zjawisk fizycznych [6]. Ze względu na złożoność tych zjawisk [1, 2, 6], w przypadku czujników gazów takie podejście prowadzi jednak zwykle do wyników ogólnych, dotyczących jedynie struktury modelu. Weryfikacja poprawności takiego modelu oraz ustalenie liczbowych wartości parametrów modelu, których znajomość jest niezbędna do realizacji korekcy dynamicznej, wymaga przeprowadzenia odpowiednich badań eksperymentalnych. W przypadku czujników gazów dogodną jest tzw. metoda odpowiedzi skokowej. Realizacja tej metody polega na wymuszeniu skokowej (w przybliżeniu) zmiany stężenia gazu w otoczeniu czujnika i zarejestrowaniu jego sygnału wyjściowego. W przeprowadzonych badaniach wykorzystano stanowisko do wzorcowania czujników, pokazane schematycznie na rysunku 2,

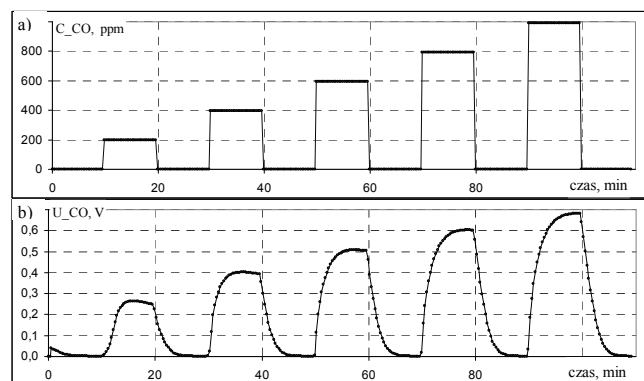
w którym stężenie gazów zmienia się poprzez zmianę przepływu odpowiednich gazów składowych. Mieszanie gazów odbywa się w kanale dolotowym, tak, że w komorze pomiarowej stężenie jest już ustalone. Istotne jest, aby czas ustalania się stężenia był odpowiednio krótki. Można to uzyskać na drodze konstrukcyjnej poprzez zastosowanie kanału dolotowego i komory pomiarowej o odpowiednio małych wymiarach i jednocześnie nastawianie dużych wartości przepływu. Na podstawie objętości kanału dolotowego i komory oraz przepływu gazów oszacowano czas ustalania się stężenia w komorze na mniej niż 10 s. Jest to czas wystarczająco krótki. Wykresy odpowiedzi skokowych uzyskanych w trakcie badań czujnika pokazano na rysunku 3.



Rys. 2. Uproszczony schemat stanowiska do badania czujników gazów
Fig. 2. Simplified scheme of the stand for gas sensor investigations

3. Model dynamiczny czujnika

Badany czujnik, pomimo zastosowania linearyzacji w układzie kondycjonowania, wykazuje nieliniowość charakterystyki statycznej [3]. Analiza przebiegów pokazanych na rysunku 3b prowadzi do wniosku, że czujnik ten wykazuje również nieliniowość dynamiczną – stała czasowa, a nawet przebiegi odpowiedzi skokowych nie są jednakowe dla zmian stężenia o różnych zakresach. Szczególnie duże różnice widoczne są w przypadku zmniejszania stężenia. Poprawna realizacja korekcji dynamicznej wymagałaby uwzględnienia zmian parametrów modelu w zależności od ustalonego wskazywanego stężenia gazu. W przeprowadzonych badaniach założono jednakże wykorzystanie modelu uśrednionego. Jak pokazują wyniki odtwarzania z korekcją dynamiczną omówione w punkcie 4, takie uproszczenie prowadzi do niewielkich błędów dynamicznych, które można w pierwszym przybliżeniu zaniedbać wobec błędów statycznych wynikających z nieidealnej korekcji nieliniowości i wielkości wpływających [7].



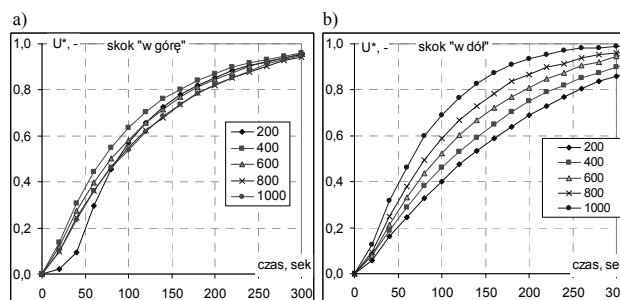
Rys. 3. Zadawane skokowe zmiany stężenia gazu (a) i zarejestrowane odpowiedzi badanego przetwornika z czujnikiem typu TGS2442 (b)
Fig. 3. Step changes of gas concentration (a) and recorded responses of the tested transducer with TGS2442 sensor (b)

Z przebiegu pokazanego na rysunku 3b dla każdej z faz skokowego zwiększania i zmniejszania stężenia gazu wyodrębniono poszczególne odpowiedzi skokowe oraz zastosowano przeskalowanie względem wartości ustalonych. Tak unormowane wartości napięć wyjściowych wykreślono na rys. 4. Na ich podstawie obliczono unormowane uśrednione odpowiedzi skokowe (rys. 5a), wykorzystane następnie do obliczenia parametrów modeli dynamicznych. Wstępnie założono modele inercyjne: pierwszego rzędu

z opóźnieniem oraz drugiego rzędu, wyrażone w postaci transmitancji operatorowych

$$K_{p1}(s) = \frac{k}{sT+1} e^{-t_0s}; \quad K_{p2}(s) = \frac{k}{(sT_1+1)(sT_2+1)}. \quad (1)$$

Stałe czasowe tych modeli dynamicznych wyznaczono na podstawie uśrednionych odpowiedzi skokowych tzw. metodą płaszczyny półlogarytmicznej. Uzyskane wartości parametrów podano w tabelicy 1. Ponieważ różnice pomiędzy uśrednioną odpowiedzią skokową przetwornika, a odpowiedziami wyliczonymi dla obu przyjętych modeli są nieistotne (niewielką różnicę można zauważyć jedynie w początkowej fazie przebiegu - rys. 5b), do realizacji algorytmu korekcji dynamicznej wykorzystano prostszy numerycznie model pierwszego rzędu.



Rys. 4. Unormowane wykresy odpowiedzi skokowych przy zwiększaniu (a) i zmniejszaniu (b) stężenia

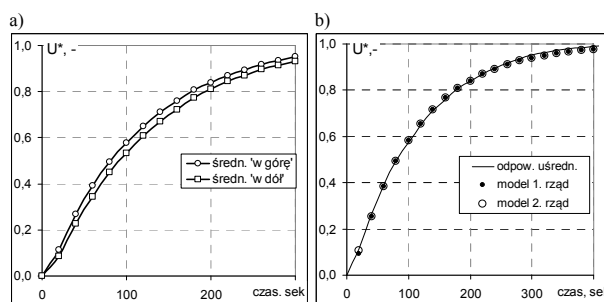
Fig. 4. The normalized step responses for rising (a) and falling (b) gas concentration

Tab. 1. Zestawienie parametrów przyjętych modeli dynamicznych

Tab. 1. Parameters of the adopted dynamic models

| typ modelu | | wzrost stężenia | spadek stężenia |
|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| inercyjny 1-go rzędu z opóźnieniem | wzmocnienie statyczne*) $k = 1$ | $T = 103,5$ [s] $t_0 = 9,9$ [s] | $T = 103,5$ [s] $t_0 = 10$ [s] |
| inercyjny 2-go rzędu | $k = 1$ | $T_1 = 103,5$ $T_2 = 9,4$ [s] | $T_1 = 117,2$ [s] $T_2 = 9,7$ [s] |

*) w odniesieniu do unormowanych wartości napięcia wyjściowego



Rys. 5. Uśrednione odpowiedzi skokowe przy zwiększaniu i zmniejszaniu stężenia gazu (a) oraz odpowiedzi uzyskane dla przyjętych modeli dynamicznych (b)

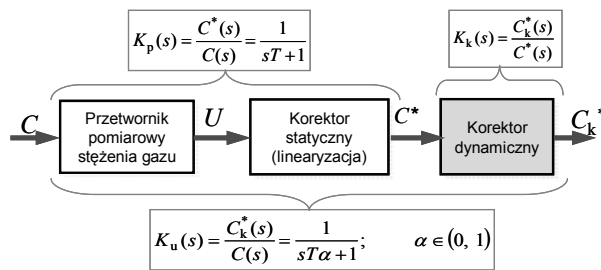
Fig. 5. The average step responses for rising and falling gas concentration (a) and responses calculated for the assumed dynamic models (b)

4. Algorytm korekcji dynamicznej

Przyjmując model dynamiczny przetwornika (z uwzględnieniem korekcji nieliniowości statycznej, tak jak to ilustruje rysunek 6), a także całego układu po korekcji w postaci inercji pierwszego rzędu o transmitancjach odpowiednio $K_p(s)$ i $K_u(s)$ oraz zakładając, że czas odpowiedzi przy zastosowaniu korekcji dynamicznej zostanie skrócony ze współczynnikiem $\alpha \in (0, 1)$, transmitancję korektora dynamicznego można obliczyć jako:

$$K_k(s) = \frac{C_k^*(s)}{C^*(s)} = \frac{K_u(s)}{K_p(s)} = \frac{1}{sT\alpha+1} \left(\frac{1}{sT+1} \right)^{-1} = \frac{sT+1}{sT\alpha+1}, \quad (2)$$

gdzie C^* i C_k^* oznaczają wyliczone wartości mierzonego stężenia gazu przed i po korekcyi dynamicznej (rys. 1b).



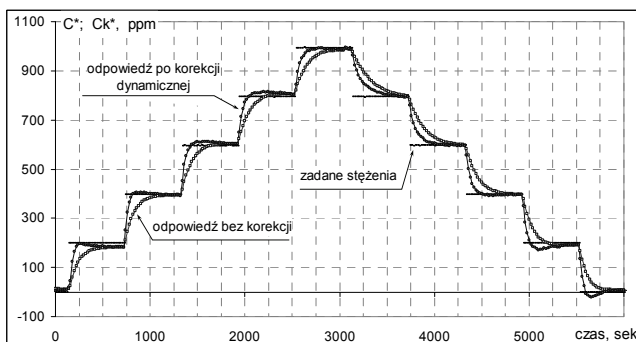
Rys. 6. Sposób wyznaczenia transmitancji korektora dynamicznego
Fig. 6. A method of determining the corrector transfer function

Stosując dyskretyzację sygnałów (co jest naturalne w odniesieniu do numerycznej procedury korekcji dynamicznej) i wykorzystując metodę Eulera do przybliżenia pochodnych, można wyprowadzić równanie rekurencyjne, opisujące algorytm obliczeń tworzący korektor dynamiczny. Ma ono następującą postać:

$$\hat{S}_k[n] = \frac{T+t_p}{\alpha T+t_p} \hat{S}[n] - \frac{T}{\alpha T+t_p} \hat{S}[n-1] + \frac{\alpha T}{\alpha T+t_p} \hat{S}_k[n-1], \quad (3)$$

gdzie t_p jest czasem powtarzania obliczeń, $C^*[n]$ i $C_k^*[n-1]$ oznaczają obliczone wartości stężeń przed korekcją dynamiczną, zaś $C_k^*[n]$ i $C_k^*[n-1]$ po korekcji dynamicznej, odpowiednio w aktualnym (n) i poprzednim ($n-1$) cyklu obliczeń rekurencyjnych.

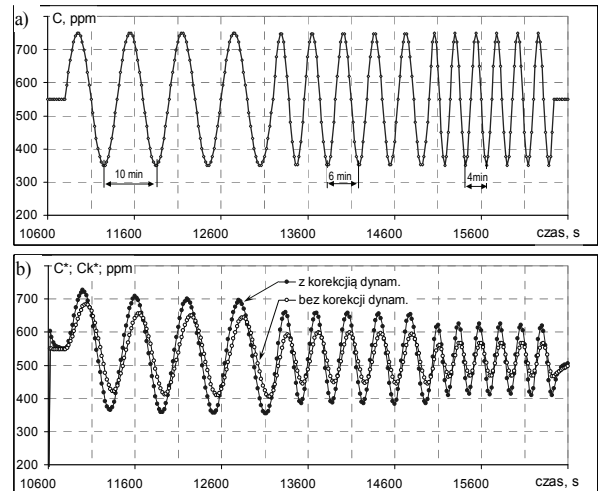
Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono przykłady zastosowania omawianego algorytmu korekcji dynamicznej do odtwarzania stężenia gazu zmiennych w czasie skokowo i sinusoidalnie. Przyjęto parametr α równy 1/3, co oznacza postulowane 3-krotne skrócenie czasu odpowiedzi. Skokowe zmiany stężenia o 20% zakresu pomiarowego następowały co 15 minut.



Rys. 7. Przykład ilustrujący skuteczność zastosowanego algorytmu korekcji dynamicznej dla skokowych zmian stężenia gazu
Fig. 7. Illustration of the effectiveness of dynamic correction algorithm used for step changes of the gas concentration

Przedstawione przebiegi potwierdzają skuteczność korekcji dynamicznej. Widoczne jest niewielkie przeregulowanie dla małych wartości stężeń. Wynika to z nieidealnego dopasowania modelu uśrednionego – w tym przypadku stałe czasowe są mniejsze niż przyjęta w obliczeniach uśredniona wartość T . Podobnie dla dużych stężeń, a szczególnie przy skokowych zmianach „w dół”, skuteczność korekcji jest mniejsza niż zakładana, ze względu na większe wartości stałych czasowych.

Skuteczność korekcji dynamicznej testowano również dla sinusoidalnych zmian stężeń zadanych. Amplituda zmian wynosiła 20% zakresu wokół wartości średniej równej 55% zakresu, a okresy zmian były równe 10, 6 i 4 minuty (co odpowiada ok. 6 i 2 stałym czasowym modelu uśrednionego). Uzyskane przebiegi pokazano na rysunku 7. Po zastosowaniu korekcji dynamicznej odtwarzanie amplitudy zmian stężenia gazu uległo poprawie w znacznym stopniu (od 1,4 do 2,1 raza), zależnym od okresu zmian stężenia.



Rys. 8. Korekcja dla sinusoidalnych zmian stężenia – zadane zmiany stężenia (a), wyniki pomiaru bez korekcji i z korekcją dynamiczną (b)
Fig. 8. Correction for sinusoidal changes in concentration - a real changes (a) and the measurement results without and with dynamic correction (b)

5. Podsumowanie

Czasy odpowiedzi typowych, dostępnych komercyjnie półprzewodnikowych rezystancyjnych czujników do pomiaru stężenia gazów osiągają wartości rzędu kilkunastu minut. W wielu zastosowaniach pomiarowych jest to czas zbyt długi i zachodzi konieczność stosowania korekcji dynamicznej w oparciu o odpowiedni model dynamiczny czujnika. Jak wynika z zaprezentowanych wyników badań dynamikę typowego czujnika z akceptowalnym przybliżeniem można opisać modelem inercyjnym pierwszego rzędu. Wyznaczone wartości stałych czasowych zależne są od wartości mierzonego stężenia (czujnik wykazuje nieliniowość dynamiczną), co utrudnia realizację skutecznej korekcji dynamicznej. Możliwe i efektywne jest jednak stosowanie korekcji w oparciu o model uproszczony, w którym wykorzystano uśrednioną wartość stałej czasowej

Podobne właściwości wykazują innego typu czujniki stężenia gazów, np. czujniki z przetwornikami SAW. Zastosowanie analogicznej metody korekcji dynamicznej wydaje się być możliwe.

6. Literatura

- [1] Pisarkiewicz T.: Mikrosensory gazów. AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo Dydaktyczne, Kraków 2007.
- [2] Teterycz H.: Grubowarstwowe chemiczne czujniki gazów na bazie dwutlenku cyny. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.
- [3] Urzędniczek H.: A numerical method of correcting the influence of the additional quantities for nonselective sensors. Proceedings of the 19th IMEKO TC-4 Symposium "Measurements of Electrical Quantities", Barcelona, July 18-19, 2013.
- [4] Nabelec J., Jamróz P.: Wzorcowanie w pomiarach dynamicznych. PAK, vol. 59, s. 526-528, 06/2013.
- [5] Nalepa J.: The 'blind' dynamic error correction method – simulation. Study for the first- and second-order measurement channel. Measurement Science Review, Volume 2, Section 1, 2002, p. 33-42.
- [6] Matsunaga N., Sakai G., Shimano K., Yamazoe N.: Formulation of gas diffusion dynamics for thin film semiconductor gas sensor based on simple reaction-diffusion equation. Sensors and Actuators B-Chemical, Vol. Issue:1-2 p. 226-233, 2003.
- [7] Urzędniczek H.: Przetwornik do pomiaru stężeń gazów w mieszaninie gazowej. Przegląd Elektrotechniczny 2010 R. 86 nr 10, s. 114-117.

otrzymano / received: 01.12.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.01.2014

artykuł recenzowany / revised paper