

SYSTEM DO BADANIA WPŁYWU WILGOTNOŚCI NA CZUJNIKI GAZÓW

Karol JABŁOŃSKI

Politechnika Śląska, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki, Instytut Automatyki
tel.: (32) 237 23 76 e-mail: karol.jablonski@polsl.pl

Streszczenie: Czujniki gazów są bardzo istotnym elementem wielu instalacji przemysłowych – nie tylko jako elementy bezpośredniej kontroli i obserwacji procesów chemicznych, ale także jako kluczowy komponent systemów bezpieczeństwa. Istotne jest więc zapewnienie odpowiednich parametrów metrologicznych tego typu sensorów, w tym odporności na działanie czynników zewnętrznych. Jednym z czynników mogących silnie wpływać na pomiary stężenia gazu jest jego wilgotność. Niniejszy artykuł przedstawia projekt i konstrukcję urządzenia pozwalającego na regulację wilgotności mieszanek kalibracyjnych gazów, a także jego testy i przeprowadzone z jego pomocą badania czujników katalitycznych i z absorpcją podczerwieni, dowodzące użyteczności zbudowanego prototypu w roli sprzętu laboratoryjnego.

Słowa kluczowe: czujniki gazów, regulacja wilgotności, wpływ wilgotności, błędy czujników.

1. WPROWADZENIE

Czujniki gazów, pozwalające na pomiar stężenia poszczególnych substancji chemicznych w mieszaninach gazów, mają bardzo szerokie zastosowania: od analizatorów laboratoryjnych, poprzez układy regulacji w wielu gałęziach przemysłu chemicznego, po systemy bezpieczeństwa i monitorowanie stanu środowiska. Również pod względem konstrukcji i zasad działania jest to bardzo zróżnicowana grupa sensorów. W zależności od właściwości wykrywanych substancji oraz wymaganych parametrów metrologicznych mamy do czynienia z tak różnymi konstrukcjami, jak detektory absorpcji w podczerwieni, rezystancyjne czujniki półprzewodnikowe, czujniki bazujące na zmianach potencjału elektrolitu, możliwości jonizacji gazu lub jego parametrów termodynamicznych, nie wspominając o biosensorach.

Wspólnym problemem wielu z tych konstrukcji jest jednak wrażliwość na parametry fizyczne badanej mieszaniny gazów. Na wiele z wykorzystywanych do pomiaru zjawisk fizykochemicznych wpływa nie tylko stężenie mierzzonego składnika, ale także temperatura, wilgotność, prędkość przepływu czy ciśnienie badanego gazu. Wpływ tych czynników na sensor powinien być znany przed jego zastosowaniem. O ile większość producentów przedstawia w kartach katalogowych dryft temperaturowy czujnika, o tyle inne parametry nie są często tak łatwo dostępne. Badania nad tego typu problemami przedstawiają m.in. Korotcenkov et al. [1], Bârsan i Weimar [2], czy Hübner et al. [3]. Zazwyczaj do zbadania ich działania niezbędna jest także złożona i kosztowna aparatura.

Przykładem urządzenia teoretycznie pozwalającego na zbadanie wpływu niektórych z czynników zewnętrznych jest

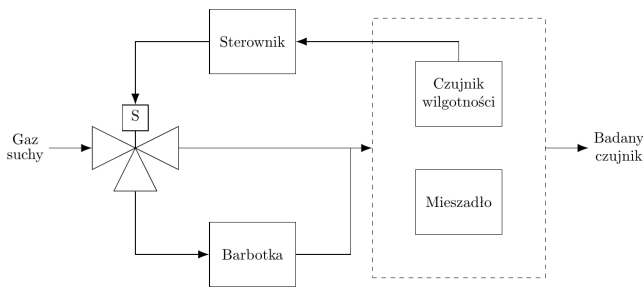
komora klimatyczna. Świetnie nadaje się ona do sprawdzania oddziaływania temperatury na prototypy układów elektrycznych, także na czujniki gazów, zarówno w czystym powietrzu, jak w gazie testowym (poprzez doprowadzenie mieszanki do głowicy czujnika z zewnątrz komory odpowiednio długim przewodem, w którym temperatura gazu będzie mogła zrównać się z temperaturą wewnątrz komory). Niestety nie jest możliwe wykorzystanie w ten sposób funkcji regulacji wilgotności w komorach klimatycznych. Wypełnienie takiej komory gazem testowym zazwyczaj jest niemożliwe – nie są one projektowane w tym celu, więc nie ma gwarancji szczelności, ani odporności urządzenia na konkretne substancje, wymagana byłaby również stosunkowo duża objętość gazu testowego, co wiąże się z kosztami.

Istnieją również rozwiązania przemysłowe pozwalające na regulację wilgotności mieszanin gazów w trakcie ich przepływu, są to jednak metody bardzo kosztowne i niepraktyczne w zastosowaniach laboratoryjnych przy niewielkiej skali, szczególnie do testowania pojedynczych prototypów lub zastosowań dydaktycznych. Możliwe jest także zastosowanie tzw. barbotki, czyli naczynia laboratoryjnego, które umożliwia wprowadzenie gazu pod powierzchnię cieczy, co powoduje jego nawilżenie do wysokich wilgotności względnych podczas drogi na powierzchnię. Takie rozwiązanie prezentuje m.in. patent „Bubbler assembly and method for vapor flow control” [4]. Zakłada on m.in. sterowanie dzięki regulatorom przepływu i stabilizacji temperaturowej cieczy.

Niniejszy artykuł ma na celu zaprezentowanie układu nawilżania mieszanek gazowych, który charakteryzuje się możliwie najprostszą konstrukcją, niskim kosztem budowy, a przy tym wystarczającą dokładnością i krótkim czasem reakcji. Ze względu na wykorzystane rozwiązania system umożliwia regulację wilgotności dowolnych mieszanek gazów słabo rozpuszczalnych w wodzie.

2. KONSTRUKCJA UKŁADU

Trafiający do systemu suchy gaz jest kierowany przez trójdrożny elektrozawór bezpośrednio do komory mieszania lub do barbotki, czyli naczynia w którym zachodzi nawilżanie, a dopiero później do komory mieszania. W komorze znajduje się wentylator oraz czujnik wilgotności względnej, z którego sygnał trafia na regulator, który odpowiednio steruje elektrozaworem tak, aby dobrać odpowiednie proporcje gazu suchego i wilgotnego trafiającego do komory mieszania. Opuszczająca ją mieszanina gazowa ma żadaną wilgotność i może być wykorzystana do dalszych badań. Opisany system został przedstawiony na rysunku 1.

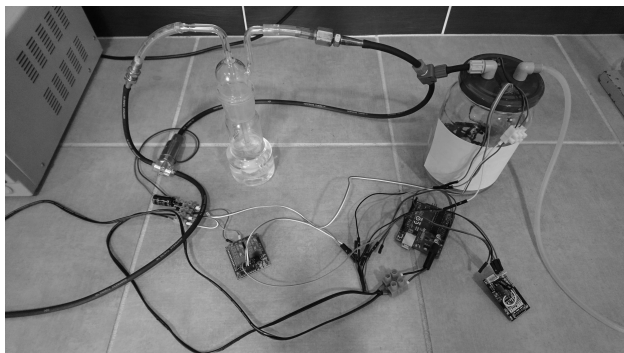


Rys. 1. Schemat blokowy układu

2.1. Zastosowane podzespoły

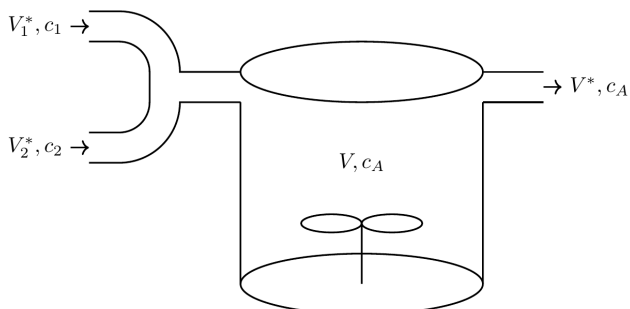
W zbudowanym systemie rolę sterownika, na którym zaimplementowano algorytm regulacji, pełni układ Arduino UNO z mikrokontrolerem Atmega328, bardzo dobrze nadający się do budowy prototypów i ich wstępnych testów. W docelowym urządzeniu zostanie on zastąpiony układem dedykowanym. Dzięki wbudowanemu stabilizatorowi jest zasilany napięciem 12 V, podobnie jak pozostałe urządzenia w systemie.

Element wykonawczy składa się z przełącznika sterującego zaworem trójdrożnym SMC Pneumatic VDW250-6G-2-M5-Q. Wewnątrz komory mieszania o objętości 1 l (sposób doboru objętości wyjaśniony w podrozdziale 2.3) znajduje się wentylator o wydajności 23 m³/h, co teoretycznie umożliwia przepompowanie pełnej objętości komory 6-krotnie w ciągu sekundy, dzięki czemu zasadne jest założenie mieszania idealnego i rozpatrywanie jej jako układu o parametrach skupionych.



Rys. 2. Fotografia głównych elementów układu

W komorze zamontowano czujnik wilgotności Honeywell HIH-4000-002 o dokładności 3,5% RH [5]. Dodatkowo urządzenie posiada także czujniki parametrów otoczenia: temperatury i wilgotności względnej GE ChipCap2 oraz ciśnienia atmosferycznego FS MPL115A2. Fotografie układu przedstawia rysunek 2.



Rys. 3. Schemat ideowy komory mieszania

2.2. Modelowanie

W celu uproszczenia procesu doboru parametrów układu oraz strojenia regulatora zbudowano model matematyczny komory mieszania. Schemat, na podstawie którego wyprowadzono równania przedstawia rysunek 3.

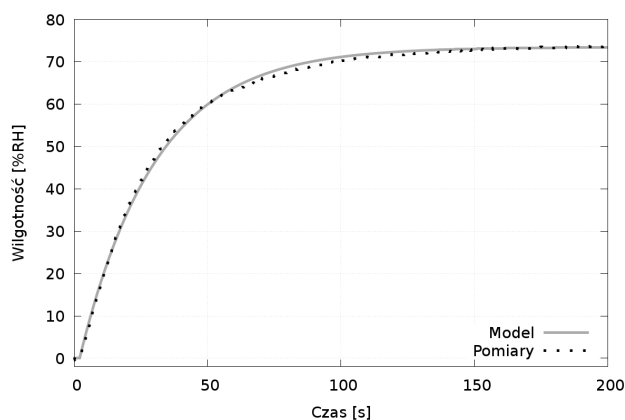
Przyjęto założenie o stałym ciśnieniu w instalacji i stałej objętości jej elementów, a także idealnym mieszanii. Na podstawie bilansu przepływu i bilansu masy pary wodnej w układzie wyprowadzono następujące równanie stanu:

$$\frac{dc_A}{dt} = -\frac{V^*}{V}c_A + \frac{V^*}{V}(c_1 - c_2)\alpha + \frac{V^*}{V}c_2; \quad (1)$$

gdzie c_1 , c_2 to wilgotności w strumieniach wejściowych, a c_A w komorze, V to objętość komory, V^* to przepływ całkowity, a α to stosunek objętości podawanego gazu wilgotnego do objętości całkowitej. Zakładając jeden ze strumieni wejściowych idealnie suchy $c_2=0$, uzyskujemy transmitancję:

$$\frac{c_A(s)}{\alpha(s)} = \frac{c_1}{1 + \frac{V}{V^*}s}. \quad (2)$$

Stosując transformację Tustina, otrzymano transmitancję dyskretną układu, a wynikające z niej równanie różnicowe zostało zaimplementowane w środowisku Octave. Aby zamodelować cały układ, a nie tylko komorę mieszania, dodane zostało opóźnienie transportowe. Weryfikację odpowiedzi skokowej modelu z rzeczywistym obiektem przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Odpowiedź obiektu i modelu na skok jednostkowy

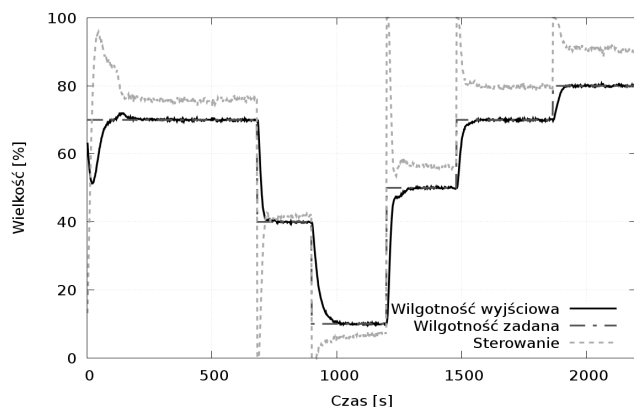
2.3. Sterowanie

Docelowa wilgotność na wyjściu z urządzenia jest uzyskiwana dzięki odpowiedniemu dobieraniu proporcji suchej i wilgotnej mieszanki poprzez przełączanie zaworu. Zawór pracuje w cyklach o stałym okresie, natomiast o zmiennym stosunku czasu podawania gazu wilgotnego do długości cyklu. Jest to więc sterowanie z użyciem modulacji szerokości impulsów (PWM). Szerokość impulsu jest obliczana przez algorytm regulatora proporcjonalno-całkująco-różniczkującego (PID) z modyfikacją zapobiegającą windupowi całkowania [6].

Okres sygnału sterującego wynosi 2 s i został dobrany w celu zoptymalizowania żywotności układu ze względu na zużycie zaworu. Jego producent deklaruje możliwość wykonania miliona przełączeń, co teoretycznie powinno umożliwić 277 godzin pracy, pozwalając na przeprowadzenie kilkudziesięciu kilgodzinnych badań. W celu uniknięcia przenoszenia pulsacji sygnału PWM na wyjście obiektu

zaleca się, aby jego okres był co najmniej 10-krotnie krótszy od stałej czasowej. Biorąc pod uwagę fakt, że stała czasowa zgodnie z równaniem (2) wynosi V/V^* , a docelowe przepływy wynoszą poniżej 3 l/min, w układzie wykorzystano komorę mieszania o objętości $V = 1$ l.

Dzięki budowie modelu, będącego układem I rzędu z opóźnieniem, strojenie regulatora PID mogło w prosty sposób odbyć się metodą Cohena-Coona [7]. Uzyskane na jej podstawie parametry zostały skorygowane eksperymentalnie, w celu zmniejszenia oscylacji w układzie. Przykładowy przebieg wilgotności względnej zadanej, wyjściowej oraz sterowania uzyskane podczas prowadzenia badań zostały zaprezentowane na rysunku 5.



Rys. 5. Przykładowe przebiegi sterowania

2.4. Weryfikacja dokładności układu

W celu weryfikacji funkcjonowania systemu wykonano pomiary wilgotności powietrza na jego wyjściu przy użyciu miernika Delta Ohm HD2101.1r z sondą HP472ACR C-RH o dokładności $\pm 1,5\%$ RH. Sonda została umieszczona w przystawce o objętości 40 cm^3 do której podłączono wyjście układu. Przy zastosowanym przepływie 2 l/min układ osiąga wartość zadaną po ok. 2 minutach. Po każdym ustabilizowaniu wartości dokonywano pomiaru. Wyniki badania przedstawia tabela 1. Otrzymane błędy bezwzględne są niższe od dokładności czujnika HIH-4000-002 deklarowanej przez producenta.

3. BADANIA SENSORÓW

3.1. Wpływ wilgoci na stężenie

Przed przystąpieniem do badania z użyciem gazów kalibracyjnych należy zwrócić uwagę na fakt, że jeśli zwiększymy wilgotność mieszanki danego gazu z powietrzem, to poprzez dodanie do niej pary wodnej zmniejszymy procentowy udział pozostałych gazów. Stężenie gazu wymaga więc przeliczenia, aby badać faktyczny wpływ wilgotności na sensor, bez błędów wynikających z rozcieńczenia mieszaniny kalibracyjnej.

Z prawa Daltona wynika, iż ciśnienie mieszanki P to suma ciśnień parcjalnych składników, w tym przypadku gazu P_g i pary wodnej P_p i jest ono stałe. Natomiast z prawa Boyle'a-Mariotte'a wynika [8]:

$$V_b = V_a \frac{P}{P_g} = V_a \frac{P}{P - P_p}; \quad (3)$$

gdzie: V_a – objętość gazu suchego; V_b – objętość gazu wilgotnego. Aby obliczyć aktualne ciśnienie parcjalne pary wodnej stosujemy wzór Magnusa, pozwalający wyliczyć

ciśnienie nasycenia przy danej temperaturze otoczenia T , oraz definicję wilgotności względnej ϕ . Ostatecznie stężenie objętościowe gazu ρ_b w mieszance wilgotnej, przy stężeniu w suchej równym ρ_a :

$$\rho_b = \rho_a \frac{P - \phi \left(0.6112 \exp \left(\frac{17.62T}{243.12 + T} \right) \right)}{P}. \quad (4)$$

Tabela 1. Wyniki sprawdzenia dokładności układu.

Za-dana	Wilgotność [% RH]		Błąd bezwgl. [% RH]
	Osiągnięta (HP472ACR)	Zmierzona (HIH-4000)	
0	2,3	3,3	-1,0
10	9,9	10,2	-0,3
20	20,1	20,2	-0,1
30	30,2	31,0	-0,8
40	40,1	41,4	-1,3
50	49,9	50,7	-0,8
60	60,6	64,0	-3,4
70	70,7	73,4	-2,7

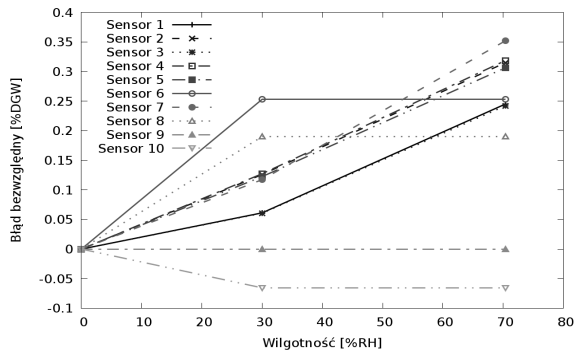
3.2. Sensory katalityczne

Pierwszym rodzajem sensorów, które poddano testom, były katalityczne czujniki gazów palnych. W tej konstrukcji na powierzchni platynowej spirali grzejnej pokrytej katalizatorem dochodzi do spalania gazów, co zmienia jej temperaturę, a więc także rezystancję, której pomiar pozwala określić stężenie gazów. Sensor jest więc wrażliwy na zmianę własności termodynamicznych otaczającego go gazu – zmiana temperatury lub przewodnictwa cieplnego ośrodka (np. przez zmianę wilgotności), pomimo kompensacji w układzie mostkowym, często prowadzi do powstawania błędów. W badaniu 5 sztuk sensorów Nemoto NAP-56a (nr 1-5) oraz 5 sztuk Winsen-Sensor MC105 (nr 6-10) poddano działaniu czystego powietrza o różnej wilgotności oraz mieszanki powietrza i 1,44% vol. metanu (oznaczanej także jako 40% DGW – dolnej granicy wybuchowości). Następnie został obliczony błąd bezwzględny pomiędzy wartością wskazaną przez sensory podczas jednokrotnego pomiaru, a wartością wynikającą z równania (4). Uzyskane błędy przedstawiono na rysunkach 6 i 7. Wilgotność przy podaniu czystego powietrza spowodowała dla większości sensorów niewielki wzrost odczytów, natomiast w mieszance z metanem spadek, w przypadku MC105 sięgający nawet 10% wartości pomiaru już przy 50% RH.

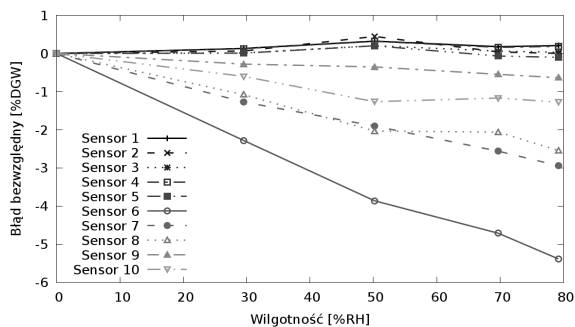
3.3. Sensory z absorpcją w podczerwieni

Drugim badanym typem sensora był sensor z absorpcją w podczerwieni: urządzenie w którym wyemitowany promień podczerwieni przechodzi przez badany gaz, który może zaabsorbować jego określone częstotliwości. Na podstawie intensywności tej absorpcji można określić stężenie badanego gazu. Para wodna jest jednak bardzo dobrym absorberem promieniowania podczerwonego, wilgotność powietrza może więc zawyżać wyniki.

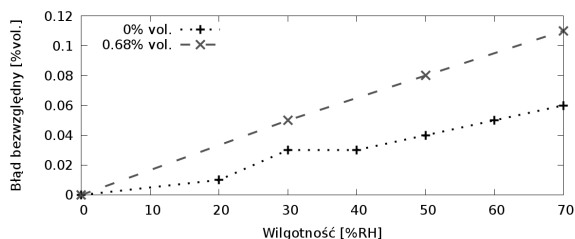
Przedmiotem badania był sensor Dynament S-IR-08.01, na który podano czyste powietrze o różnej wilgotności oraz mieszankę z 0,68% vol. propanu. Wyniki zostały zaprezentowane na rysunku 8.



Rys. 6. Błędy sensorów katalitycznych w czystym powietrzu.



Rys. 7. Błędy sensorów katalitycznych w 40% DGW metanu.



Rys. 8. Błędy sensora z absorpcją w podczerwieni.

4. PODSUMOWANIE

W ramach artykułu przedstawiono system nawilżania mieszanek gazów pozwalający na przeprowadzanie badań wpływu wilgotności na czujniki różnej konstrukcji. Pośród zalet rozwiązania można wyróżnić prostotę i niski koszt budowy (poniżej 400 zł), dużą dokładność (3,5% RH) oraz zadowalający względem dynamiki badanych sensorów czas ustalania wartości zadanej (poniżej 2 minut). Wadą jest trudność osiągnięcia wilgotności powyżej 80% RH. Funkcjonalność urządzenia może być zwiększona przy porzuce-

niu założenia o niskim koszcie, przez zastosowanie np. rurek nafionowych w roli nawilżacza, regulatorów przepływu jako elementów wykonawczych oraz stabilizacji temperatury wody.

Badania wykazały użyteczność urządzenia przy sprawdzaniu wpływu wilgotności względnej na czujniki gazów. Aktualnie znajduje zastosowanie przy sporządzaniu zestawienia jakości różnych modeli sensorów katalitycznych. Posiada ono także duży potencjał jako stanowisko dydaktyczne, pozwalając nie tylko na prowadzenie zajęć laboratoryjnych z czujnikami gazów, ale także umożliwiając ćwiczenie procedury kalibracji czujników wilgotności, czy – ingerując w jego algorytm – strojenie regulatora PID lub regulację przekąźnikową.

5. PODZIĘKOWANIA

Badania zostały częściowo sfinansowane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Laboratoria, część aparatury i materiały eksploatacyjne zostały zapewnione przez firmę Atest-Gaz A. M. Pachole sp. j.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Korotcenkov G., Blinov I., Brinzari V., and Stetter J.: Effect of air humidity on gas response of SNO₂ thin film ozone sensors, *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 122, no. 2, pp. 519–526, 2007.
2. Hübner M., Simion C., Tomescu-Țănoiu A., Pokhrel S., Bârsan N., Weimar U.: Influence of humidity on co sensing with p-type CuO thick film gas sensors, *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 153, no. 2, pp. 347–353, 2011.
3. Barsan N., Weimar U.: Understanding the fundamental principles of metal oxide based gas sensors; the example of co sensing with SNO₂ sensors in the presence of humidity, *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 15, no. 20, p. R813, 2003.
4. Oosterlaken T. G., van Eijden J. T.: Bubbler assembly and method for vapor flow control, Dec. 6 2012. US Patent App. 13/118,953.
5. Honeywell: HIH-4000 Series, 2016.
6. Gessing R.: *Podstawy automatyki*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2005.
7. Cohen G., Coon G.: Theoretical consideration of retarded control, *Trans. ASME*, vol. 75, pp. 827–834, 1953.
8. Pudlik W.: *Termodynamika*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 1995.

SYSTEM FOR EXAMINATION OF HUMIDITY INFLUENCE ON GAS SENSORS

Gas sensors are significant elements of many plants in industry. They do not only serve as indicators and elements of control loops in chemical processes, but also are the main part of the safety systems. In many situations a gas sensor is the first line of defence against leakage of dangerous substances. Therefore, ensuring its appropriate metrological parameters is crucial. The fact that sensors should not be sensitive to environmental parameters is very important. Unfortunately, influence of air humidity, which can strongly affect measurements, is difficult to measure. This paper proposes a system for preparation of gas mixtures with specific relative humidity. It allows to examine the reaction of gas sensors to changes of vapour concentration in calibration gases. One of assumptions of this project was low cost of manufacturing the system and simple, modular construction. The design, construction and examination of the device are presented. The exemplary tests of catalytic sensors and infrared sensors are also described. The accuracy and practical utility of the system were proved by results of conducted research.

Keywords: gas sensors, humidity control, humidity influence, errors of sensor.