

Porównanie właściwości wybranych mikroczujników parametrów środowiskowych

Streszczenie. W pracy przedstawiono porównanie podstawowych właściwości scalonych mikroczujników warunków środowiskowych pod kątem wykorzystania ich do pomiaru temperatury otoczenia, wilgotności względnej oraz ciśnienia w laboratorium pomiarowym, w którym te trzy wielkości charakteryzują się niewielkimi przedziałami zmian. Z przeprowadzonych badań wynika, iż w stosunkowo wąskim zakresie zmian wielkości mierzonych, wyniki pomiarów uzyskiwanych za pomocą porównywanych czujników charakteryzują się bardzo dobrą zgodnością.

Abstract. The paper presents a comparison of the basic properties of integrated micro-sensors of environmental conditions in terms of their use to measure the ambient temperature, relative humidity and pressure in a measurement laboratory, where these three values are characterized by small change intervals. The conducted research shows that in a relatively narrow range of changes in measured values, the results of measurements obtained with the compared sensors are characterized by very good compliance. (**Comparison of the properties of selected microsensors of environmental parameters**).

Słowa kluczowe: czujniki środowiskowe, badania porównawcze, dokładność, stabilność.

Keywords: environmental sensors, comparative tests, accuracy, stability.

Wstęp

Coraz częściej eksperymentom pomiarowym wykonywanym w nauce i technice towarzyszy stabilizacja oraz rejestracja warunków środowiskowych, występujących w miejscu i czasie wykonywania pomiarów. W niektórych sytuacjach wymagane jest nawet monitorowanie prędkości i charakteru przepływu powietrza (turbulentny lub laminarny) [1]. Ponadto z reguły producenci aparatury pomiarowej określają warunki środowiskowe, w których aparatura charakteryzuje się odpowiednimi parametrami. Zapewnienie prawidłowych warunków leży po stronie użytkownika tej aparatury.

Przykładem systemu pomiarowego, wymagającego stabilizacji oraz pomiaru i rejestracji warunków środowiskowych jest stanowisko do wzorcowego transferu AC-DC [2], w którym stosowane są wrażliwe na zmiany temperatury otoczenia termiczne przetworniki wartości skutecznej (TPWS) [3]. Czujnik warunków środowiskowych, wykorzystywany w tego rodzaju systemie pracuje w relatywnie wąskim przedziale temperatury (22,5 - 23,5)°C, wilgotności (40 - 60)% RH oraz ciśnienia (950 - 1050) hPa.

Niezbędnym elementem składowym systemu stabilizującego warunki środowiskowe są czujniki parametrów charakteryzujących to środowisko. Do parametrów tych należą z reguły: temperatura, wilgotność względna oraz ciśnienie atmosferyczne (barometryczne). Obecnie gama tego rodzaju czujników wydaje się być bardzo szeroka. Przy wyborze czujnika, oprócz aspektów technicznych (np. rodzaju interfejsu, sposobu montażu itp.), bierze się pod uwagę również aspekty pozatechniczne, np. jego aktualną lub perspektywiczną dostępność. Wśród aspektów technicznych doboru czujnika należy uwzględnić także: mierzone wielkości oraz ich zakres, rodzaj interfejsu, pobieraną i rozpraszaną energię, dokładność, powtarzalność, niezawodność, gabaryty oraz sposób montażu.

Opis i porównanie właściwości wybranych mikroczujników parametrów środowiskowych

Kierując się potrzebą monitorowania warunków środowiskowych w laboratorium wzorców AC-DC [2] oraz wymaganiami małej mocy rozpraszanej i małych gabarytów wytypowano grupę czujników, których podstawowe parametry i właściwości zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry wybranych czujników parametrów środowiskowych

Typ czujnika=> Parametr	BME 688	BME 280	BMP 280	MS 8607	AHT 15	AHT 20
Mierzone wielkości	T, RH, p, VOC	T, RH, p	T, RH, p	T, RH, p	T, RH	T, RH
Błąd pomiaru temperatury (°C)	±1,0	±1,0	±1,0	±1,0	±1,5	±1,8
Błąd pomiaru RH (%RH)	±3,0	±3,0		±3,0	±3,0	±3,0
Błąd histerezy pomiaru RH (%RH)	±1,5	±1,0			±1,0	±1,0
Błąd pomiaru ciśnienia (hPa)	±0,6	±1,0	±1,0	±2,0		
Rodzaj interfejsu	SPI, I ² C	SPI, I ² C	SPI, I ² C	I ² C	I ² C	I ² C
Gabaryty (mm)	3,0x3,0x0,93	2,5x2,5x0,93	2,0x2,5x0,95	5,0x3,0x1,0	6,0x5,0x2,2	3,0x3,0x1,0

Mikroczujnik BME688, produkowany przez firmę Bosch-Sensortec [4], jest najbardziej zaawansowanym z prezentowanych w niniejszej pracy czujników, umożliwiającym pomiar temperatury, wilgotności, ciśnienia, stężenia lotnych związków organicznych (*Volatile Organic Compounds*, VOC), m.in. wodoru, etanolu i tlenku węgla oraz lotnych związków siarki (*Volatile Sulfur Compounds*, VSC) dzięki czemu może być wykorzystywany do wykonywania pomiarów czystości powietrza, wykrywania substancji niebezpiecznych lub mogących wywołać pożar lub eksplozję, a nawet zjawiska namnażania się bakterii. Zakres mierzonej temperatury zawiera się w przedziale (-40...85) °C, wilgotności (0...100) %, a ciśnienia: (300...1100) hPa. Producent określa czujnik jako charakteryzujący się sztuczną inteligencją (*Artificial Intelligence*, AI). Ponadto cechuje go niewielki pobór prądu, nie przekraczający 4 mA w trybie detekcji (skanowania) gazów. Na uwagę zasługuje również wyposażenie czujnika BME688 w dwa popularne interfejsy szeregowo: SPI oraz I²C.

Mikroczipnik BME280, produkowany przez firmę Bosch-Sensortec [5], jest średnio zaawansowanym z prezentowanych w niniejszej pracy czujników, umożliwiającym pomiar temperatury, wilgotności i ciśnienia. Zakres mierzonej temperatury zawiera się w przedziale (-40...85)°C, wilgotności (0...100)% RH, a ciśnienia: 300...1100 hPa. Producent określa budowę czujnika jako niezwykle kompaktową o małym poborze prądu (maksymalnie 0,714 mA podczas pomiaru ciśnienia). Mała wartość prądu zasilającego czyni ten czujnik szczególnie przydatnym w aplikacjach wymagających minimalnej mocy rozpraszaney. Czujnik wyposażono w dwa popularne interfejsy szeregowo: SPI oraz I²C.

Mikroczipnik BMP280, produkowany również przez firmę Bosch-Sensortec [6], jest wcześniejszą wersją czujnika BME280, pozbawioną funkcji pomiaru wilgotności. Jako następcą BMP180 został zoptymalizowany pod kątem zmniejszenia zapotrzebowania na energię oraz skrócenia czasu przetwarzania. Maksymalna wartość chwilowa pobieranego prądu wynosi 1,12 mA co w połączeniu z konfigurowalnym czasem repetycji zapewnia uśredniony w ciągu sekundy prąd zasilający mniejszy od 5 µA. Czujnik wyposażono w dwa popularne interfejsy szeregowo: SPI oraz I²C.

Mikroczipnik MS8607, produkowany przez firmę Measurement Specialties, Inc., należąca do TE Connectivity Company [7], jest średnio zaawansowanym układem w grupie prezentowanych w niniejszej pracy czujników, umożliwiającym pomiar temperatury, wilgotności i ciśnienia. Zakres mierzonej temperatury zawiera się w przedziale (-40...85)°C, wilgotności (0...100)% RH oraz ciśnienia (300...1100) hPa. Producent określa maksymalny pobór prądu na 1,25 mA podczas pomiaru oraz wartość średnią sekundową równą maksymalnie 20 µA. Czujnik wyposażono w popularny interfejs szeregowy I²C.

Mikroczipnik AHT15, produkowany przez firmę Guangzhou Aosong Electronics Co. Ltd. [8], jest w porównaniu z opisanymi powyżej czujnikami relatywnie mniej zaawansowanym technologicznie czujnikiem, umożliwiającym pomiar temperatury i wilgotności. Zakres mierzonej temperatury zawiera się w przedziale (-40...80)°C, a wilgotności (0...100)% RH. Czujnik jest kalibrowany przez producenta tak, iż możliwa jest wymiana czujnika bez potrzeby jego ponownej kalibracji lub modyfikacji oprogramowania. AHT15 podczas pomiaru pobiera prąd rzędu 23 µA. Czujnik posiada filtr z teflonu (PTFE), zapewniający wodo- i pyłoszczelność. Filtr ten nie ma wpływu na dynamikę odpowiedzi czujnika. Przetwornik wyposażono w interfejs I²C.

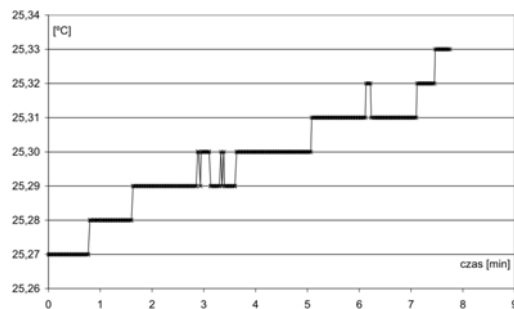
Mikroczipnik AHT20, produkowany przez firmę Guangzhou Aosong Electronics Co.,Ltd. [9] posiada parametry zbliżone do przedstawionego wcześniej czujnika typu AHT15 jednak jest zamknięty w mniejszej obudowie.

Biorąc pod uwagę wymagania stawiane czujnikom wykorzystywanym do monitorowania warunków środowiskowych w laboratorium wzorców AC-DC [2] oraz mając na względzie ewentualne problemy z dostępnością, wykluczono z grupy badanych czujników mikroczujniki typu AHT15 i AHT20.

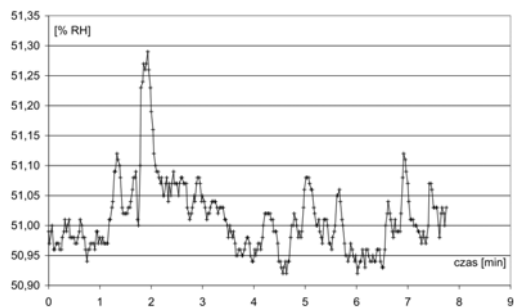
Metodyka badań

Szczególny obszar zastosowania omawianych czujników środowiskowych polegający na określeniu zmian wartości temperatury, wilgotności względnej i ciśnienia podczas porównania termicznych przetworników wartości skutecznej w laboratorium wzorców AC-DC implikuje zastosowaną metodykę badań. Uwagę skoncentrowano na porównaniu wskazań oraz określeniu rozrzutu statystycznego poszczególnych egzemplarzy i typów

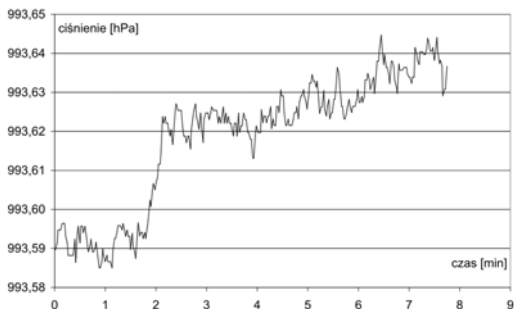
czujników. Do realizacji tak postawionego zadania pomiarowego potrzebne jest przygotowanie stanowiska umożliwiającego równoczesny pomiar wieloma czujnikami oraz zapewniającego jednakowe warunki zewnętrzne każdemu badanemu egzemplarzowi czujnika. W związku z brakiem dostępu do odpowiedniej komory klimatycznej, pozwalającej na badanie wielu czujników jednocześnie, sprawdzono jednorodność przestrzenną i stabilność czasową warunków środowiskowych w pomieszczeniu laboratorium o kubaturze równej około 45 m³. Wybrano symetryczną lokalizację czujników, zapewniającą jedynie niewielkie ruchy konwekcyjne, a do stabilizacji temperaturowej wykorzystano czasową nieobecność personelu laboratorium. Pomiary realizowano przez ponad 16 godzin, a końcowe fragmenty „ustabilizowanych” wartości przedstawiono na rysunkach od 1 do 3. Ilustrują one zmiany wskazań dla jednego z badanych czujników BME280. Wykazują one dryfty i fluktuacje, utrudniające opracowanie statystyczne wyników porównania. Dlatego odstąpiono od ich dalszego opracowania, a pomiary powtórzono w opisaney dalej komorze.



Rys. 1. Czasowe zmiany temperatury w odosobnionym pomieszczeniu po 16 godzinach stabilizacji



Rys. 2. Czasowe zmiany wilgotności względnej w odosobnionym pomieszczeniu po 16 godzinach stabilizacji

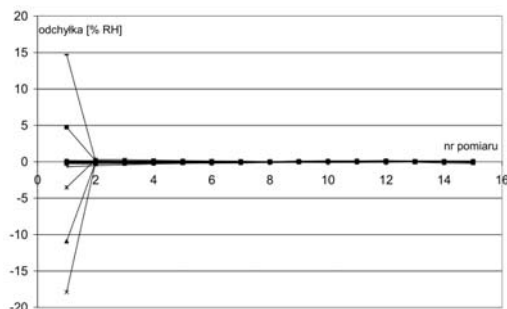


Rys. 3. Czasowe zmiany ciśnienia w odosobnionym pomieszczeniu po 16 godzinach stabilizacji

W niektórych specyficznych obszarach zastosowania wymagane jest wyłączanie zasilania czujników. Na przykład ograniczanie czasu aktywności czujników uzasadnione jest powiązaną z ich pracą emisją zakłóceń, wynikających z transmisji synchronicznej i jej wpływem na pracę aparatury laboratoryjnej. Dlatego do badań włączono test odpowiedzi czujników po włączeniu ich zasilania. Podczas testu

rejestrowano wartości pierwszych piętnastu wyników. Wyniki uzyskane podczas wielokrotnego powtarzania tego testu dla przykładowego czujnika BME280_R przedstawiono na rysunku 4. Zebrane dane wykazują iż niekiedy pierwsza zmierzona wartość znacząco odbiega od reszty wyników.

W celu zmniejszenia wpływu zmiennych warunków środowiskowych czujniki umieszczono w specjalnie do tego celu wykonanej komorze z wymuszonym obiegiem powietrza o wymiarach (0,6x0,6x0,2) m. Izolację termiczną ścianek komory wykonano ze styropianu. Co prawda komora w dalszym ciągu nie zapewniała możliwości regulacji ciśnienia, niemniej stabilizacja wskazań następowała już po kilkudziesięciu sekundach, nie wykazując istotnego dryftu w ciągu najbliższej godziny. Ponadto zastosowana izolacja cieplna w wystarczający sposób zmniejszyła wpływ zmian temperatury otoczenia, spowodowanych obecnością personelu laboratorium.

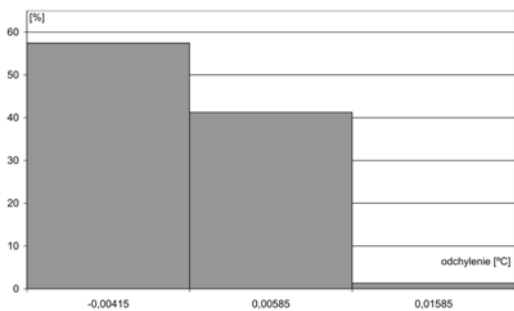


Rys. 4. Przebiegi czasowe wyników pomiarów wilgotności czujnikiem BM280_R po włączeniu jego zasilania (pierwszych 15 wartości względem średniej z wyników o indeksach od 2 do 15)

Wyniki pomiarów

Po umieszczeniu czujników w komorze i włączeniu zasilania czujników dokonano wstępnej stabilizacji ich parametrów, trwającej około 20 minut. Po upływie tego czasu rejestrowano wyniki uzyskiwane za pomocą badanych czujników w seriach liczących od 303 do 755 pomiarów. W celu ujednoczenia procedury pomiarowej, a zwłaszcza szybkości przetwarzania i związanej z tym ilości ciepła rozpraszanego w strukturze pomiarowej czujników, skonfigurowano je do pracy ciągłej z odczytem ostatniego dostępnego wyniku. Uzyskano w ten sposób 5 kompletów wyników na sekundę, zatem przybliżony czas akwizycji w każdej z tych serii był równy od 1,0 do 2,5 min.

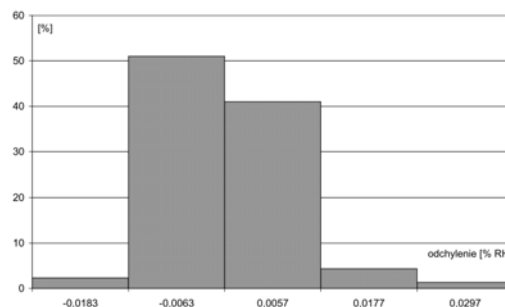
Po wyznaczeniu średniej dla danej serii i mierzonej wielkości (temperatury, względnej wilgotności oraz ciśnienia) sporządzono histogramy częstości uzyskanych wyników. Przykładowe histogramy wyników pomiaru wykonanych czujnikiem BME280_R przedstawiono na rysunkach od 5 do 7.



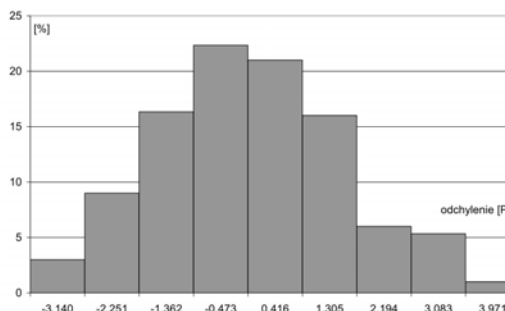
Rys. 5. Histogram częstości wyników pomiaru temperatury czujnikiem BME280_R

Z uwagi na relatywnie mały rozrzut wyników pomiaru czujnik ten przyjęto jako czujnik odniesienia (referencyjny). Wyniki z poszczególnych serii poddano uproszczonej

analizie, polegającej na wyznaczeniu średniej arytmetycznej serii, jej empirycznego odchylenia standardowego s oraz różnic Δ pomiędzy średnimi wyników serii wyników pomiaru poszczególnymi czujnikami a średnią serii wyników pomiaru czujnikiem BME280_R. Wyniki przedstawiono w tabeli 2 oraz na rysunkach 11 – 13.

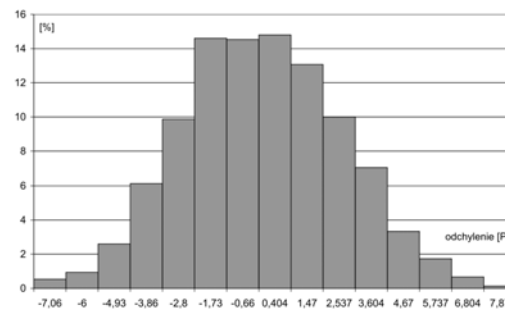


Rys. 6. Histogram częstości wyników pomiaru wilgotności względnej wykonanych za pomocą czujnika BME280_R

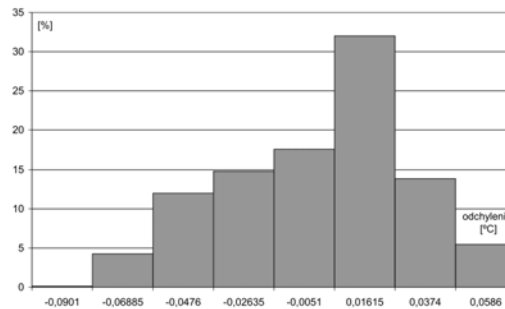


Rys. 7. Histogram częstości wyników pomiaru ciśnienia wykonanych za pomocą czujnika BME280_R

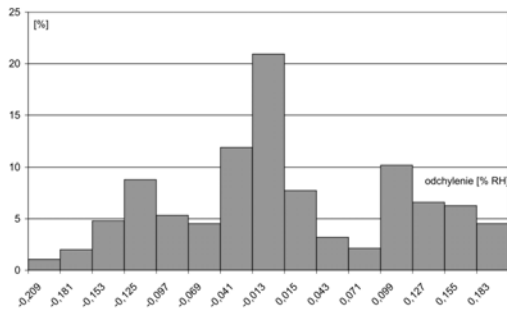
W podobny sposób sporządzono histogramy wyników pomiarów wykonanych pozostałymi porównywanymi czujnikami. Na rysunkach od 8 do 10 przedstawiono histogramy wyników dla czujnika MS8607₁.



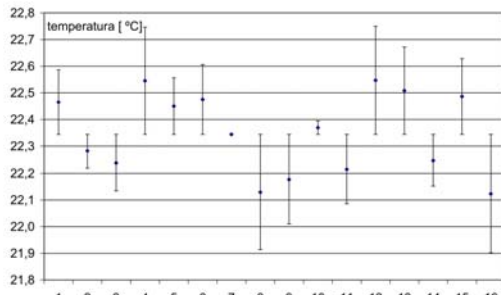
Rys. 8. Histogram częstości wyników pomiaru ciśnienia czujnikiem MS8607₁



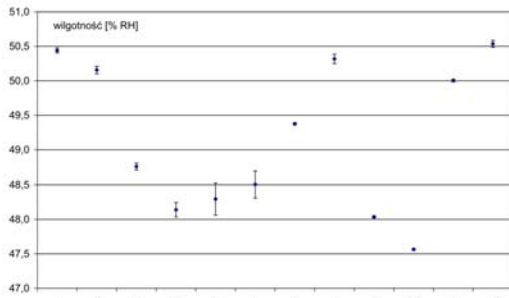
Rys. 9. Histogram częstości wyników pomiaru temperatury czujnikiem MS8607₁



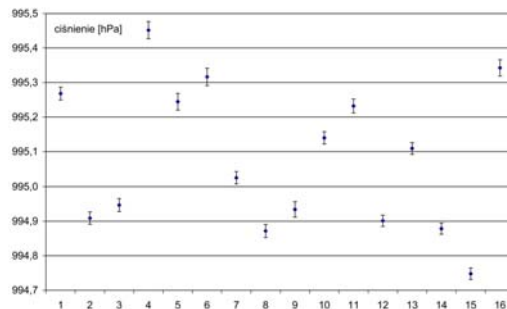
Rys. 10. Histogram częstości wyników pomiaru wilgotności względnej czujnikiem MS8607₁



Rys. 11. Wartości średnie temperatur wraz z odchyleniami standardowymi. Oznaczenie numeryczne osi poziomej oznacza kolejną pozycję w tabeli 2 (nr 7 – BME280_R)



Rys. 12. Wartości średnie wilgotności względnej wraz z odchyleniami standardowymi. Oznaczenie numeryczne osi poziomej oznacza kolejną pozycję w tabeli 2 (nr 7 – BME280_R)



Rys. 13. Wartości średnie ciśnienia wraz z odchyleniami standardowymi. Oznaczenie numeryczne osi poziomej oznacza kolejną pozycję w tabeli 2 (nr 7 – BME280_R)

Wartości zestawione w tabeli 2 wykazują niewielki rozrzut wyników pomiaru uzyskanych poszczególnymi czujnikami oraz niewielkie różnice pomiędzy uśrednionymi odczytami.

Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań wynika, iż w stosunkowo wąskim zakresie zmian wielkości mierzonych, występujących w warunkach laboratoryjnych, wyniki pomiarów uzyskiwanych za pomocą porównywanych

czujników warunków środowiskowych okazały się nadspodziewanie zgodne. Oznacza to możliwość wykorzystania badanych egzemplarzy czujników do monitorowania warunków środowiskowych występujących w laboratorium wzorców AC-DC lub do monitorowania warunków występujących na obwodach drukowanych aparatury pomiarowej, konstruowanej w laboratorium.

Eliminacja błędów w początkowych wynikach po włączeniu zasilania możliwa jest przez wydłużenie czasu aktywności i kilkakrotne powtórzenie pomiarów.

Tabela 2. Zestawienie odchyłeń standardowych wyników s oraz różnic Δ pomiędzy uśrednionymi wynikami serii pomiaru porównywanych czujników a średnią serii wyników pomiaru czujnikiem odniesienia BME280_R. Indeks przy nazwie oznacza numer porządkowy czujnika. Pola puste wskazują na brak możliwości pomiaru wielkości danym czujnikiem

Lp.	Czujnik	N	$\Delta(t)$ °C	$s(t)$ °C	$\Delta(\text{RH})$ %RH	$s(\text{RH})$ %RH	$\Delta(p)$ Pa	$s(p)$ Pa
1	BME688 ₁	313	0,121	0,007	1,064	0,035	24,21	1,85
2	BME688 ₂	325	-0,062	0,005	0,781	0,054	-11,68	1,77
3	BME688 ₃	319	-0,105	0,005	-0,609	0,049	-7,91	1,88
4	MS8607 ₁	752	0,201	0,042	-1,237	0,105	42,59	2,49
5	MS8607 ₂	736	0,106	0,084	-1,081	0,234	21,84	2,42
6	MS8607 ₃	755	0,131	0,028	-0,869	0,197	29,04	2,51
7	BME280 _R	517	0	0,0051	0	0,016	0	1,8
8	BME280 ₁	303	-0,215	0,032	0,942	0,068	-15,42	1,90
9	BME280 ₂	324	-0,167	0,011	-1,341	0,016	-9,16	2,23
10	BME280 ₃	312	0,025	0,005	-1,811	0,009	11,38	1,78
11	BME280 ₄	321	-0,129	0,004	0,628	0,019	20,61	2,02
12	BME280 ₅	315	0,203	0,005	1,161	0,051	-12,48	1,62
13	BMP280 ₁	356	0,164	0,017			8,31	1,70
14	BMP280 ₂	349	-0,096	0,004			-14,75	1,62
15	BMP280 ₃	365	0,142	0,005			-27,81	1,67
16	BMP280 ₄	336	-0,221	0,016			31,66	2,35

Autor: dr inż. Wiesław Domański, Politechnika Śląska, Katedra Metrologii Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: wieslaw.domanski@polsl.pl

LITERATURA

- [1] Kampik M., Domański W., Grzenik M., Majchrzyk K., Musioł K., Tokarski J., „System stabilizacji warunków środowiskowych w Laboratorium Wzorców AC-DC”, PAK, (2014), nr 2, 73-76
- [2] Kampik M., Stanowisko do wzorcowania termicznych przetworników wartości skutecznej napięcia przemiennego, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2010), nr 1, 239-244
- [3] Laiz H., Klonz M., Kessler E., Kampik M., Lapuh R. Low-Frequency AC-DC Voltage Transfer Standards with New High Sensitivity and Low-Power-Coefficient Thin-Film Multijunction Thermal Converters, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 52, (2003), No. 2, 350-354
- [4] BME688 4-in-1 environmental sensor unit with AI. Data sheet, *Bosch Sensortec*, Doc.-Number: BST-BME688-DS000-01, (2022), Version 1.1, 1-60
- [5] BME280 Combined humidity and pressure sensor. Final data sheet, *Bosch Sensortec*, Doc.-Number: BST-BME280-DS001-11, (2015), Revision 1.2, 1-54
- [6] BMP280 Digital Pressure Sensor. Data sheet, *Bosch Sensortec*, Doc.-Number: BST-BMP280-DS001-19, (2019), Revision 1.19, 1-50
- [7] MS8607 PHT Combination Sensor Module. Specification, *Measurement Specialties, Inc., a TE Connectivity Company*, Doc.-Number: MS8607-02BA01, (2017), 1-22
- [8] AHT15 Temperature and humidity sensor. AHT15 Technical Manual, *Guangzhou Aosong Electronics Co.,Ltd.*, Rev. 1.0, (2018), 1-9
- [9] AHT20 Temperature and humidity sensor. AHT15 Product Manual, *Guangzhou Aosong Electronics Co.,Ltd.*, Rev. 1.1, (2020), 1-11