

ASPEKTY KONSTRUKCYJNE PRZENOŚNYCH KALIBRATORÓW CIŚNIENIA

W referacie omówiono problemy konstrukcyjne i technologiczne związane z opracowaniem przenośnych, mikroprocesorowych kalibratorów ciśnienia i wielkości pochodnych. Jako przykład przedstawiono, opracowane w PIAP - OBRAP ramach projektu celowego, mikroprocesorowe kalibratory ciśnienia o klasie 0,05 przeznaczone do kalibracji przetworników ciśnienia bezpośrednio w miejscu zainstalowania na obiekcie przemysłowym, jak też do pomiarów i badań laboratoryjnych.

THE CONSTRUCTION ASPECTS OF HAND HELD PRESSURE CALIBRATORS

Problems of the construction and technology for microprocessor-based pressure calibrator are presented. PIAP-OBRAP's calibrator is a high-accuracy (0,05% FS) handheld tester suitable for the most demanding field and laboratory applications.

1. WSTĘP

Kalibracja eksploatowanych w dłuższym okresie przetworników ciśnienia jest niezbędną operacją gwarantującą utrzymanie ich pierwotnej klasy dokładności lub jej uwiaryzelnianie. Pogarszanie dokładności przetworników jest spowodowane przede wszystkim pełzaniem wartości parametrów czujników i starzeniem lub zużyciem elementów mechanicznych głowic pomiarowych.

Podstawową funkcją współczesnych kalibratorów jest pomiar charakterystyk przetwarzania sprawdzanego lub wzorcowanego przetwornika z odpowiednią dokładnością. W przypadku kalibratorów ciśnienia jest to współbieżny pomiar ciśnienia (sygnał wejściowy przetwornika) i pomiar sygnału elektrycznego (sygnał wyjściowy przetwornika), przy czym wymagana dokładność omawianych kalibratorów obiektowych nie może być obecne niższa niż 0,1% wartości odczytanej (lub 0.05% zakresu pomiarowego).

Analizując trendy rozwojowe mikroprocesorowych kalibratorów ciśnienia można zauważyć, że skupiają się one przede wszystkim na następujących zagadnieniach konstrukcyjnych i funkcjonalnych:

- miniaturyzacja kalibratorów;
- zapewnienie wysokiej klasy przyrządu poprzez dobór odpowiednich czujników;
- integracja wielu funkcji pomiarowych i obliczeniowych w jednym przyrządzie;
- rozwiązywanie zagadnienia łatwości obsługi przyrządu;

- rozwiązanie problemu zasilania przyrządu, uwzględniając także zastosowania w strefach zagrożonych wybuchem.

2. WYBRANE PROBLEMY KONSTRUKCYJNO-TECHNOLOGICZNE PRZENOŚNYCH KALIBRATORÓW CIŚNIENIA

2.1. Miniaturyzacja przyrządów

Analizy dotyczące optymalizacji kosztów serwisowania instalacji przemysłowych, w ramach której mieści się obsługa zainstalowanych, w układach automatyki, przetworników, uzasadniają stosowanie kalibratorów przenośnych, które pozwalają na weryfikację lub wzorcowanie przetworników bezpośrednio w miejscu zamontowania [1]. Zapewnienie dostatecznej odporności projektowanego kalibratora na różnorodne warunki otoczenia narzuca wysokie wymagania także na obudowę kalibratora. Przy niemal wszystkich zastosowaniach przemysłowych układ kalibratora musi być chroniony przed rozproszonym polem elektromagnetycznym, które jest jednym z istotnych czynników zewnętrznych wpływających na ograniczenie dokładności przyrządu.

Wybór optymalnej obudowy dla kalibratora jest ściśle związany z konstrukcją i technologią przyrządu. W przypadku kalibratorów krytycznymi elementami są czujniki ciśnienia oraz mikroprocesorowe układy elektroniczne.

Dobranie obudowy pod względem konstrukcji i materiału, jest trudnym kompromisowym wyborem uwzględniającym następujące czynniki:

- ekranowanie układu przed zaburzeniami elektromagnetycznymi;
- zmniejszenie poziomu zaburzeń emitowanych przez układ do otoczenia;
- zapewnienie szczelności i wytrzymałości mechanicznej;
- ergonomiczność;
- uzyskanie dostatecznie niskiej ceny.

Ważnym kryterium przy wyborze obudowy jest zapewnienie ekonomicznego montażu zespołów w obudowie.

2.2. Klasa kalibratora – dobór czujnika ciśnienia

Najważniejszym etapem projektowania kalibratora ciśnienia jest rozstrzygnięcie o rodzaju czujnika ciśnienia. W przypadku projektowania przyrządu przenośnego mogą się liczyć przede wszystkim czujniki wykonane w technologii mikromechaniki krzemowej. W tej technologii wytwarzane są przede wszystkim czujniki piezorezystancyjne i pojemnościowe.

Czujniki piezorezystancyjne są obecnie najczęściej stosowane w technice pomiaru ciśnień z uwagi na następujące ich zalety:

- szeroki zakres pomiarowy;
- duża trwałość i stabilność parametrów;
- stosunkowo wysoka dokładność przetwarzania;
- małe wymiary gabarytowe;

- niski pobór mocy zasilania;
- stosunkowo niska cena;
- łatwy dostęp do wysokiej klasy wzmacniaczy pomiarowych przystosowanych do współpracy z tego typu czujnikami.

Jednym z podstawowych wymagań projektowanego kalibratora było założenie, że będzie on stosowany zarówno do pomiaru ciśnień zanieczyszczonych gazów, jak też i cieczy, dlatego element czujnikowy musi być chroniony za pomocą membrany separującej.

Ważnym parametrem czujników ciśnienia przeznaczonych do zastosowania w precyzyjnych przyrządach pomiarowych jest ich klasa dokładności. Światowe firmy produkujące głowice czujnikowe wykonują je w klasach od 0,2 do 0,5, co z góry narzuca konieczność dodatkowej poprawy parametrów poprzez kondycjonowania sygnałów czujnikowych w programowalnym układzie mikroprocesorowym kalibratora. Tak więc, głowice czujnikowe skompensowane temperaturowo, które mogą znaleźć zastosowanie w kalibratorze klasy 0,05, powinny charakteryzować się co najmniej następującymi wartościami parametrów:

- szerokość zakresu napięcia wyjściowego:
(przy zasilaniu mostka 1 mA): $100 \text{ mV} \pm 10 \text{ mV}$;
- napięcie niezrównoważenia - $\pm 1 \text{ mV}$;
- nieliniowość charakterystyki - 0,2 %;
- błąd powtarzalności i histereza mechaniczna - 0,01%;
- błąd temperaturowy szerokości zakresu napięcia pomiarowego
(zakresie temperatur od 0 - 70°C) - 0,2 %;
- błąd temperaturowy napięcia niezrównoważenia
(zakresie temperatur od 0 - 70°C) - 0,2 %;
- histereza termiczna (zakresie temperatur od 0 - 70°C) - 0,1 %;
- stabilność długoterminowa - 0,1%.

2.3. Wzorcowanie i kompensacja wpływu temperatury

2.3.1 Przetwarzanie sygnałów ciśnienia

Wybór głowicy czujnika ciśnienia charakteryzującej się wysoką dokładnością nie wystarcza do "bezpośredniego" zastosowania jej w kalibratorze ciśnienia. Spełnienie wymagań kalibratora narzuca konieczność wprowadzenia indywidualnego procesu wzorcowania i kompensacji temperaturowej. W tym celu wykorzystuje się możliwości inteligentnego przetwarzania sygnałów czujnikowych oferowanych przez układ mikroprocesorowy kalibratora, co pozwala na zwiększenie dokładności pomiarów ciśnienia, teoretycznie ograniczonej jedynie niestabilnością i histerezą czujnika, a nie jego nieliniowością ciśnieniową, czy też temperaturową.

Pierwszym krokiem przy realizacji programowej linearyzacji charakterystyki przetwarzania czujnika jest podstawowe wzorcowanie wskazań kalibratora (niedokładność pomiarów ciśnienia wzorcowego 0,01%). Charakterystyką przetwarzania jest zwykle wzorcowana w temperaturze otoczenia 20 °C. W prezentowanym dalej rozwiązaniu zastosowano 10 odcinkową aproksymację liniową dla charakterystyki

przetwarzania. Uzyskany błąd liniowości charakterystyki pomiarowej ciśnienia mieści się w granicach 0,02%.

Następnym krokiem, dla potrzeb algorytmicznej kompensacji wpływu temperatury, wprowadza się węzły interpolacji charakterystyk korekcyjnych dla 4 różnych temperatur (5, 30, 40, i 50 °C), do których zastosowano dwuodcinkową aproksymację liniową. Monitorowanie temperatury kalibratora dla potrzeb kalibracji jest realizowane przez wewnętrzny czujnik temperatury włączony w system pomiarowy kalibratora. Dodatkowo, odczyt z czujnika temperatury może być wyświetlony jako niezależny pomiar temperatury otoczenia kalibratora. Badania temperaturowe kalibratora wykazały, że tą metodą ograniczono błąd temperaturowy kalibratora przy pomiarze ciśnienia do poziomu 0,03 %/10°C.

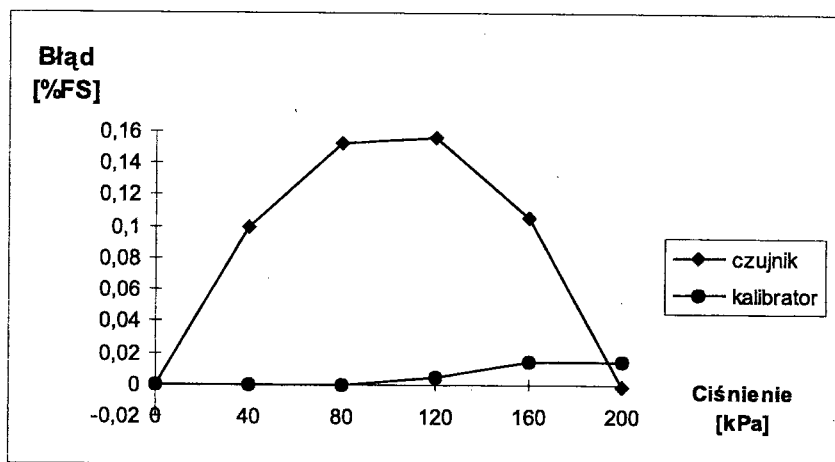
2.3.2. Przetwarzanie sygnałów wielkości elektrycznych

Algorytm wzorcowania kompensacji temperaturowej sygnałów elektrycznych (prądowych i napięciowych) jest analogiczny jak dla sygnałów ciśnieniowych, z tym że wzorcowanie charakterystyk wykonuje się odpowiednio w 4 i 5 punktach kontrolnych. Wymagana dokładność pomiarów wzorcowych wynosi co najmniej 0,001%.

2.3.3 Odczyt wartości mierzonych

Każdy odczyt wartości wielkości mierzonej (ciśnienia lub sygnału elektrycznego) podlega filtracji. Filtracja polega na wykonaniu 6 pomiarów danej wielkości. Po odrzuceniu wartości najmniejszej i największej, z pozostałych 4 wartości jest wyznaczana średnia wartość, którą przyjmuje się za wartość reprezentującą wielkość mierzoną. Na podstawie tej reprezentatywnej wartości jest wyznaczana wartość wskazywana w jednostkach fizycznych. Wyznaczanie tej wartości odbywa się w oparciu o dane zapisane w pamięci nieulotnej kalibratora, wprowadzone w procesie wzorcowania i kompensacji temperaturowej.

Na rys. 1 przedstawiono błędy liniowości charakterystyki czujnika ciśnienia oraz błędy wskazań kalibratora po korekcy z użyciem tego samego czujnika.



Rys. 1 Krzywe błędów liniowości charakterystyki czujnika ciśnienia oraz błędów wskazań kalibratora ciśnienia

2.4. Źródła zasilania przenośnych przyrządów pomiarowych

W przypadku przyrządów przenośnych jednym z kluczowych problemów do rozwiązania jest wybór źródła zasilania.

Podstawowe cechy, które powinno posiadać dobre źródło zasilania przeznaczone dla przenośnych urządzeń pomiarowych są następujące:

- niewielki ciężar
- długa żywotność;
- duża pojemność;
- niska cena;
- mała zależność od temperatury;
- nie zanieczyszczanie środowiska.

Źródła zasilania można ogólnie podzielić na dwie podstawowe grupy:

1. Ogniwa nieładowalne (baterie).
2. Ogniwa ładowalne - akumulatory.

Akumulatory, które są ogniwami ładowanymi, są optymalnym rozwiązaniem dla przyrządów przenośnych. Obecnie na rynku znajduje się następujące typy akumulatorów: ołowiowe, niklowo-kadmowe, litowo-jonowe (Li-Ion) oraz niklowo – metaliczno- wodorkowe (NiMH).

Podstawową wadą akumulatorów ołowiowych jest jego duży ciężar i gabaryty oraz, z uwagi na zawartość ołowiu, bardzo niekorzystny wpływ na środowisko. Podobnie niekorzystne w użytkowaniu są akumulatory niklowo-kadmowe, z uwagi na zawartość silnie szkodliwego kadmu [2].

Jedynym typem akumulatorów, który nie zawiera metali ciężkich, zanieczyszczających środowisko naturalne są akumulatory typu NiMH i dlatego tylko ten typ był brany pod uwagę przy wyborze źródła zasilania dla projektowanego kalibratora.

Akumulatory NiMH charakteryzują się stosunkowo niewielkimi gabarytami i mają stosunkowo dużą pojemność. Jest to również ogniwo o dużej gęstości energii, co jest jego kolejną zaletą. Żywotność, przy pracy pełnymi cyklami ładowania i rozładowania, jest wystarczająca, dlatego w trakcie eksploatacji tego typu ogniw należy unikać doładowywania. Ładowanie wymaga bardziej precyzyjnej kontroli niż ładowanie innych typów akumulatorów. Wadą omawianych akumulatorów jest zależność parametrów ogniwa od temperatury.

2.5. Funkcje kalibratorów ciśnienia

Z uwagi na szeroki rynek klientów trudno jest zdefiniować optymalny zestaw funkcji, w które powinien być wyposażony kalibrator. Najlepszym rozwiązaniem jest w tym przypadku wprowadzenie modułowej architektury kalibratora, co pozwala na jego opcjonalne dopasowanie do potrzeb metrologicznych i możliwości finansowych konkretnego odbiorcy.

W tablicy 1 przedstawiono zestaw funkcji kalibratora wraz z dialogami definiowania wartości parametrów testowych.

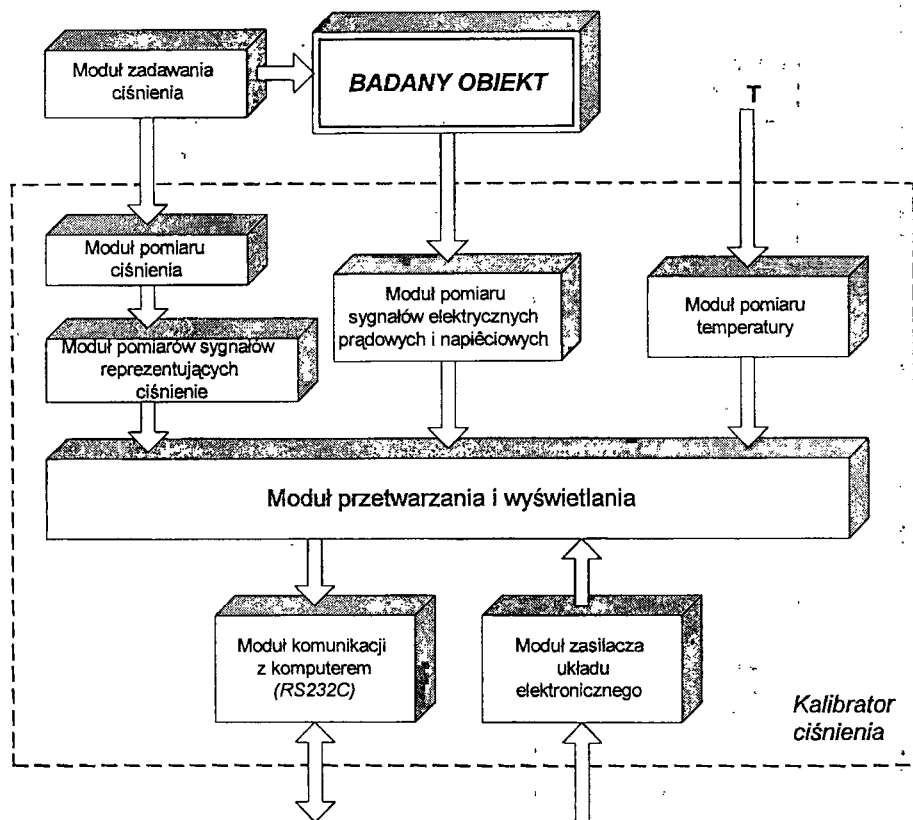
Tablica 1: Struktura funkcjonalna kalibratora

L.p.	Nazwa funkcji kalibratora	Dialog definiowania parametrów	Wskazania kalibratora
1.	Autotest	Włączenie kalibratora	Kolejne wyświetlanie danych kalibratora (po pozytywnym autoteście)
2.	Kalibracja lub sprawdzanie przetwornika	Jednostka ciśnienia; Zakres pomiarowy; Liczba punktów pomiarowych; Rodzaj sygnału elektrycznego; Zakres pomiarowy sygnału elektrycznego; Rodzaj charakterystyki przetwornika (liniowa, pierwiastkowa)	Procedura kalibratora i wartości: <ul style="list-style-type: none"> • ciśnienia • sygnału prądowego lub napięciowego; • błędu przetwarzania
3.	Kalibracja lub sprawdzanie manometru	Jednostka ciśnienia; Zakres pomiarowy; Liczba punktów pomiarowych	Wartości: <ul style="list-style-type: none"> • ciśnienia • błędu wskazania manometru
4.	Przegląd pamięci zawierającej wyniki pomiarów	Wskazanie wprowadzonych danych dotyczących badanego przyrządu (typ, numer seryjny)	Tablice z wynikami pomiarów
5	Przepisywanie wyników pomiarów z pamięci kalibratora do komputera (typu PC)	Wybór bloku danych do transmisji do PC	Procedura obsługi transmisji
6.	Pomiar temperatury	°C	Temperatura otoczenia
7.	Pomiar ciśnienia i sygnału elektrycznego	Jednostkę ciśnienia; Zakres pomiarowy; Sygnał prądowy lub napięciowy	Wartości: <ul style="list-style-type: none"> • ciśnienia • prądu lub napięcia

3. MIKROPROCESOROWY KALIBRATOR CIŚNIENIA PC -01 (przykład)

W wyniku kompromisowego wyboru między poziomem ceny akceptowanym przez rynek a presją potrzeb klientów został opracowany w PIAP OBRAP przenośny kalibrator ciśnienia typ PC -01.

Na rys. 2 przedstawiono schemat blokowy mikroprocesorowego kalibratora ciśnienia.



Rys.2 Schemat blokowy kalibratora ciśnienia PC -01

Najważniejszym elementem konstrukcyjnym kalibratora jest moduł czujników ciśnienia, który może zawierać jeden lub dwa niezależne czujniki. W omawianych kalibratorach zastosowane piezorezystancyjne, krzemowe czujniki, które są zamontowane w głowicy wykonanej ze stali kwasoodpornej. Głowica jest zamknięta membraną separującą (również wykonaną ze stali nierdzewnej), dzięki czemu kalibrator może być stosowany przy dowolnych mediach pomiarowych, do

agresywnych lub zanieczyszczonych włącznie. Czujniki wybrane do kalibratora charakteryzują się małymi błędami nieliniowości, skompensowane wstępnie w zakresie temperatur $0 \div 70^{\circ}\text{C}$. Końcowa kompensacja wpływu temperatury na zero i szerokość zakresu jest realizowana przez układ mikroprocesorowy za pomocą programowo uwzględnianych współczynników kompensacji, które zostały wyznaczone na podstawie pomiarów w procesie wzorcowania kalibratora.

Moduł pomiarów sygnałów reprezentujących ciśnienie składa się z układu formowania sygnału z czujników ciśnienia, multiplexera analogowego i przetwornika analogowo-cyfrowego (ADC)

Układy formowania wzmacniają sygnał z czujnika ($0 \div 100\text{mV}$) do wartości stanowiącej pełny zakres przetwornika ADC. Multiplexer analogowy dołącza do przetwornika ADC sygnał z czujnika wybranego przez układ sterowania kalibratora. W układzie zastosowano przetwornik analogowo-cyfrowy ADC 24-bitowy.

Pozostałe moduły kalibratora zostały szerzej opisane w [3]

4. WYNIKI BADAŃ

Prototypy kalibratora PC -01 zostały przebadane w certyfikowanym Laboratorium PIAP LAB. W tabeli 2 przedstawiono wyniki badań wyniki badań oraz porównanie z założeniami podanymi w Projekcie Celowym.

Tabela 2: Wyniki badań modelu kalibratora ciśnienia

Parametr	Jednostka	Wartość założona	Wartość osiągnięta
Zakres pomiarowy ciśnienia	kPa	0...200 0...700	0...200 0...700
Zakres pomiarowy sygnału prądowego	mA	0...20	0...20
Zakres pomiarowy sygnału napięciowego	V	0...10	0...10
Zakres temperatur pracy	$^{\circ}\text{C}$	5 ... 50	5 ... 50
Błąd podstawowy wskazania ciśnienia	% FS	0,05	0,025
Błąd podstawowy wskazania prądu	% FS	0,015	0,008
Błąd podstawowy wskazania napięcia	% FS	0,015	0,001
Błąd temperaturowy wskazania ciśnienia	%/ $^{\circ}\text{C}$	0,01	0,0075
Błąd temperaturowy wskazania prądu	%/ $^{\circ}\text{C}$	0,0015	0,0015
Błąd temperaturowy wskazania napięcia	%/ $^{\circ}\text{C}$	0,0015	0,001

5. WNIOSKI

1. W referacie przedstawiono wybrane problemy konstrukcyjne i technologiczne związane z opracowywaniem przenośnych kalibratorów ciśnienia.
2. Jako przykład przedstawiono opis konstrukcji i metody kompensacji wykorzystanej w mikroprocesorowym kalibratorsze ciśnienia. Ponadto przedstawiono wyniki badań prototypu kalibratora.
3. W kalibratorsze można zamontować jednocześnie dwa, a opcjonalnie trzy, czujniki, co znacznie poszerza zakres pomiarowy przyrządu.
4. Zastosowana metoda kalibracji pozwala na osiągnięcie klasy dokładności przyrządu na poziomie 0,05% FS umożliwia wykorzystanie omawianego przyrządu do kalibracji większości przetworników ciśnienia i różnicy ciśnień obecnie oferowanych na polskim rynku.
5. Wstępna cena kalibratora, która jest niższa o ok. 30% od najtańszych zagranicznych kalibratorów oferowanych w Polsce, daje podstawę do stwierdzenia, że jest możliwe pozyskanie rynku krajowego w zakresie obiektowych kalibratorów ciśnienia.

LITERATURA

1. Lang W.: Reflexion on the future of microsystems. *Sensors & Actuators*, vol. 72, no 1, 1999, pp.1-15.
2. Katalog firmy ELFA, 2000 r. str. 1197 –1237.
3. Janyszek B. i in.: Mikroprocesorowy kalibrator ciśnienia. MWK 2001, Warszawa, str. 93 – 98.