

Andrzej MAJOCHA
Instytut Elektrotechniki Teoretycznej,
Metrologii i Materiałoznawstwa
Politechnika Łódzka

KOREKCJA BŁĘDU TEMPERATUROWEGO I BŁĘDU NIELINIOWOŚCI KANAŁU POMIARU CIŚNIENIA W PRZELICZNIKU OBJĘTOŚCI GAZU O ZASILANIU BATERYJNYM

Streszczenie. W technice pomiarowej, związanej z opomiarowaniem różnego rodzaju mediów, bardzo duże znaczenie mają urządzenia pomiarowe do pomiaru ilości gazu. Przyrządami realizującymi ten pomiar są gazomierze oraz wspomagające je przeliczniki objętości gazu. W niniejszym referacie przedstawiono ogólną charakterystykę toru pomiaru ciśnienia gazu w przeliczniku objętości o zasilaniu bateryjnym oraz metodę korekcji jego błędów temperaturowego i błędów nieliniowości. Przedstawiono wyniki pomiarów parametrów dużej liczby przeliczników. Przedstawione wartości błędów pomiaru ciśnienia przed korekcją i po korekcji błędów są potwierdzeniem skuteczności zastosowanej metody korekcji błędów.

TEMPERATURE ERROR AND NON-LINEARITY ERROR CORRECTION OF THE PRESSURE MEASUREMENT CHANNEL IN THE BATTERY SUPPLYING GAS VOLUME CORRECTOR

Summary. Gas volume measurement devices are among the most important devices for the measuring technique concerning the measurement of different kinds of media. The devices which measure them are the gas-meters, volume correctors and flow computers. In this paper the general characteristic of the pressure measurement channel in the volume corrector, and the method of compensation of temperature error and non-linearity error are presented. Furthermore the results of measurements of parameters of a large number of correctors are shown here. The results presented are the confirmation of the effectiveness of the proposed method of error compensation.

1. WSTĘP

Przelicznik objętości gazu (niem.: Mengeumwerter, ang.: volume corrector) realizuje przeliczenie objętości V_1 gazu z warunków rzeczywistych (p_1, T_1) na objętość V_n w warunkach odniesienia (p_n, T_n). Stosowany jest głównie w gazownictwie, gdzie wyniki jego pomiarów i obliczeń są podstawą rozliczeń pomiędzy dostawcą a odbiorcą gazu. Ponadto, jest

wykorzystywany w przemyśle przy przeliczaniu objętości gazów energetycznych i technologicznych.

Przeliczanie objętości, nazywane również *korekcją objętości*, jest realizacją równania (1)

$$V_n = V_1 F_1. \quad (1)$$

Współczynnik korekcyjny F_1 w powyższym równaniu wyraża się zależnością:

$$F_1 = \frac{p_1}{p_n} \frac{T_n}{T_1} \frac{1}{K_1}, \quad (2)$$

gdzie względny współczynnik ściśliwości K_1 jest ilorazem współczynnika ściśliwości w warunkach pomiaru Z_1 i współczynnika w warunkach odniesienia Z_n :

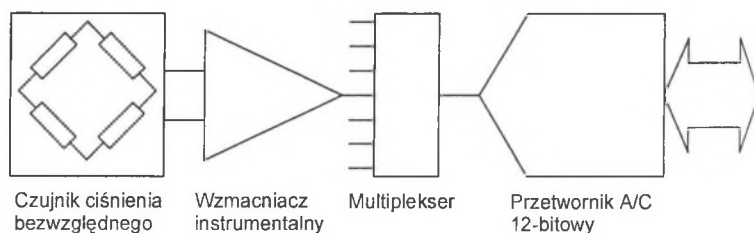
$$K_1 = \frac{Z_1}{Z_n}. \quad (3)$$

Warunki odniesienia, obowiązujące w Polsce i w większości krajów europejskich to: $T_n = 273,15$ K, $p_n = 101,325$ kPa. Współczynnik ściśliwości gazu, wykorzystywany w algorytmie przeliczania objętości, jest wyznaczany w przeliczniku objętości gazu lub jest przyjmowany jako stała. Do wyznaczania tego współczynnika wykorzystuje się różne metody, zależne od rodzaju gazu. Dla gazu ziemnego stosuje się, zgodnie z wymogami norm zakładowych PGNiG, metodę SGERG 88. Metody wyznaczania współczynnika ściśliwości bazują na różnych parametrach chemicznych gazu (skład chemiczny, udział procentowy niektórych jego składników), jak też na parametrach fizycznych (ciepło spalania, gęstość). Mają one swoje ograniczenia w stosowaniu w zależności od parametrów fizycznych gazu, w szczególności od ciśnienia.

Jednym z rodzajów przeliczników objętości są przeliczniki o zasilaniu bateryjnym, które znalazły zastosowanie tam, gdzie nie jest możliwe (lub nieopłacalne) doprowadzenie sieci zasilającej. Przeliczniki te posiadają zintegrowane (zainstalowane wewnątrz) kanały pomiarowe do pomiaru ciśnienia i temperatury gazu. Są przyrządami energooszczędnymi, dzięki czemu mogą pracować kilka lat bez wymiany baterii zasilającej. Przepisy metrologiczne ani normy państwowe lub zakładowe nie precyzują, jak długo powinien poprawnie pracować przelicznik pomiędzy wymianami baterii zasilającej, ale ze względu na obowiązujący w Europie okres relegalizacji przeliczników wynoszący 5 lat, przelicznik powinien przez ten właśnie okres poprawnie realizować swoje funkcje. Jest rzeczą oczywistą, że czas pracy przelicznika będzie zależał od sposobu jego obsługi i ustawionych parametrów pracy.

2. CHARAKTERYSTYKA KANAŁU POMIARU CIŚNIENIA

Przeliczniki objętości o zasilaniu bateryjnym realizują swoje funkcje na podstawie informacji pomiarowej o ilości gazu pomierzonego przez gazomierz (V_1), temperatury gazu (T_1) oraz ciśnienia (p_1).



Rys. 1. Schemat uproszczony kanału pomiaru ciśnienia

Fig. 1. Simplified diagram of pressure measurement channel

Kanał pomiaru ciśnienia jest złożony z czujnika ciśnienia bezwzględego, wzmacniacza instrumentalnego oraz 12-bitowego kompensacyjnego przetwornika A/C. Zakresy pomiarowe przeliczników objętości stosowanych w polskim gazownictwie zawierają się w zakresach od 100 kPa ÷ 600 kPa do 0,8 MPa ÷ 6,3 MPa. Stosowane w przelicznikach czujniki ciśnienia mają znormalizowaną stałą przetwarzania oraz parametrycznie skompensowany błąd nieliniowości i błąd temperaturowy. Jednakże taka kompensacja jest niewystarczająca z punktu widzenia dopuszczalnych wartości błędów zawartych w obowiązujących przepisach metrologicznych [1,4]. Zastosowany ośmiowieściowy multiplexer pozwala na pomiar temperatury gazu, temperatury czujnika ciśnienia oraz innych dodatkowych sygnałów umożliwiających sprawdzanie poprawności działania przetwornika A/C w każdym cyklu pomiarowym.

Tabela 1

Dopuszczalne błędy graniczne odniesione do wartości mierzonych

Pomiar lub wynik obliczeń	Warunki laboratoryjne	Warunki eksploatacyjne
Objętość normalna	0,5%	1%
Kalkulator	0,2%	0,4%
Temperatura	0,1%	0,2%
Ciśnienie	0,3%	0,6%

Warunki laboratoryjne [1,4]:

Temperatura otoczenia	20°C ± 3°C
Wilgotność względna otoczenia	60% ± 10%
Napięcie zasilania przyrządu	wartość nominalna

Warunki eksploatacyjne [4]:

Temperatura otoczenia	-25°C + 55°C
Wilgotność względna otoczenia	10% ÷ 100%
Napięcie zasilania przyrządu	85% do 110% wartości nominalnej

Dotrzymanie dopuszczalnych wartości błędów w odniesieniu do kalkulatora i pomiaru temperatury gazu jest zagadnieniem stosunkowo prostym, możliwym do zrealizowania prostymi środkami. W przelicznikach objętości jako czujniki temperatury gazu są stosowane najczęściej czujniki platynowe Pt100 oraz Pt1000 klasy A. Rzadziej stosuje się czujniki termistorowe. Natomiast o odniesieniu do pomiaru ciśnienia, jak wspomniano powyżej, aby spełnić powyższe wymagania w przeliczniku, należy przeprowadzić proces korekcji błędu nieliniowości i błędu temperaturowego całego kanału pomiaru ciśnienia.

Wartość dopuszczalnego błędu korekcji objętości (w tabeli 1: objętość normalna), zgodnie ze wzorami (2) i (3) jest funkcją błędów pomiarów ciśnienia i temperatury gazu oraz błędu wyznaczenia względnego współczynnika ściśliwości. Należy zauważyć, że wartość względnego współczynnika ściśliwości zależy zarówno od składu gazu, jak i jego temperatury i ciśnienia. W związku z tym błędy pomiaru ciśnienia i temperatury gazu propagują do błędu korekcji objętości dwoma drogami. Ze względu na fakt, że błąd pomiaru ciśnienia ma wartość dopuszczalną większą niż błąd pomiaru temperatury, jego wpływ na błąd korekcji objętości jest bardziej znaczący. Właśnie dlatego przy projektowaniu przeliczników zapewnienie małej wartości błędu pomiaru ciśnienia jest zagadnieniem najważniejszym, a jednocześnie technicznie najtrudniejszym.

3. METODA KOREKCJI BŁĘDÓW KANAŁU POMIARU CIŚNIENIA

Jak wspomniano wcześniej, przedstawiana metoda korekcji błędów odnosi się do przeliczników o zasilaniu bateryjnym. W takich przyrządach stosowane są układy cyfrowe (mikroprocesory, pamięci, funktry logiczne, układy komunikacyjne, wyświetlacze) i analogowe (przetworniki A/C, wzmacniacze operacyjne) o niskim napięciu zasilania (2,7 V – 3,6 V) i bardzo małym poborze prądu. Niskie napięcie zasilania pozwala stosować baterie litowe, które charakteryzują się napięciem 3,6 V oraz stosunkowo dużymi pojemnościami (rzędu kilku lub kilkunastu Ah) oraz długim czasem pracy (do 10 lat). Są więc najlepszym źródłem zasilania dla tej klasy przyrządów. Ponadto, charakteryzują się innymi parametrami pozwalającymi na stosowanie ich w przyrządach w wykonaniu iskrobezpiecznym, przeznaczonych do pracy w strefach zagrożonych wybuchem.

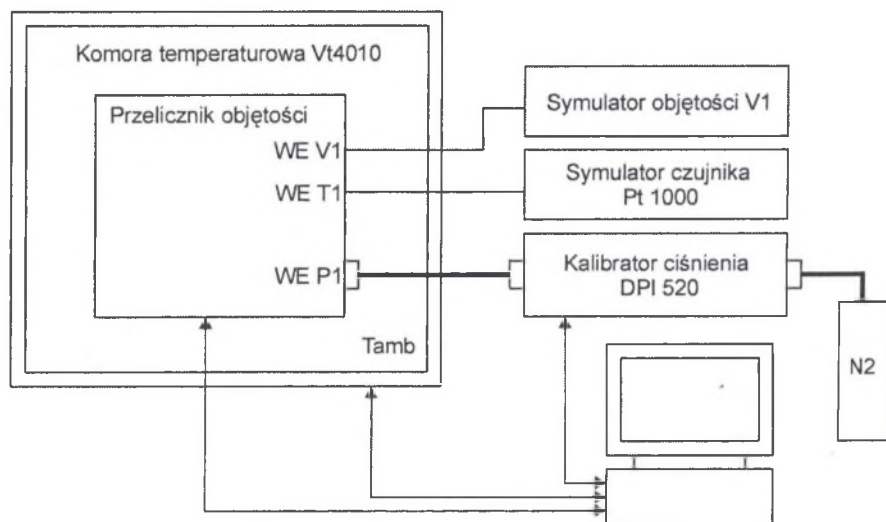
Program wewnętrzny przelicznika również musi charakteryzować się energooszczędnością, tzn. algorytm musi być tak skonstruowany, aby procesor (lub mikrokontroler), który pobiera bardzo znaczącą część ładunku z baterii zasilającej, pracował jak najkrócej. Ten ostatni fakt determinuje sposób metody korekcji błędów kanału pomiaru ciśnienia.

Korekcja błędów powinna być wykonana w jak najkrótszym czasie, czyli przy jak najmniejszej liczbie rozkazów procesora. Przy takim założeniu odrzucić należy arytmetyczną korekcję błędu nieliniowości i błędu temperaturowego, polegającą na wykorzystaniu wielomianów lub funkcji sklepanych, która wymaga zastosowania operacji zmiennoprzecinkowych, charakteryzujących się wykonywaniem stosunkowo dużej liczby rozkazów i skutkuje stosunkowo dużym zużyciem ładunku baterii zasilającej. Jednakże wspomniane wyżej metody są powszechnie stosowane w przelicznikach o zasilaniu sieciowym, w których nie istnieje problem skończonej pojemności źródła zasilania.

W prezentowanym przeliczniku zastosowano obliczanie poprawnej wartości ciśnienia poprzez dodanie poprawki do wyniku pomiaru ciśnienia. Relacja *wynik pomiaru + poprawka = wartość poprawna* jest słuszna jedynie w przypadku, gdy dla każdej temperatury pracy charakterystyka przetwarzania jest monotoniczna. Wtedy w sposób jednoznaczny każdej wartości wyniku pomiaru w dziedzinie ciśnienia i temperatury czujnika ciśnienia jest przyporządkowana wartość ze zbioru wartości poprawnych. Zbiór poprawek jest więc tablicą dwuwymiarową. Zaproponowana metoda spełnia podstawowy postulat, mianowicie jest realizowana w bardzo krótkim czasie, gdyż w celu uzyskania wartości poprawnej przeprowadza się prostą, wymagającą kilku rozkazów procesora, operację dodawania dwubajtowych liczb całkowitych, wyniku przetwarzania i poprawki. W jednym procesie jest więc dokonana korekcja błędu nieliniowości charakterystyki przetwarzania całego toru pomiaru ciśnienia oraz korekcja jego błędu temperaturowego.

W omawianym korektorze do pomiaru temperatury czujnika ciśnienia zastosowano scalony czujnik półprzewodnikowy o stałej przetwarzania $1 \mu\text{A}/\text{K}$ i błędzie $\pm 0,3^\circ\text{C}$. Jest on dołączony do jednego z wejść przetwornika A/C. Z punktu widzenia jakości identyfikacji kanału pomiaru ciśnienia taki czujnik jest wystarczająco dokładny w odniesieniu do pomiaru temperatury czujnika ciśnienia.

Pierwszą czynnością zmierzającą do wyznaczenia dwuwymiarowej tablicy poprawek jest identyfikacja pierwotnej charakterystyki przetwarzania kanału pomiaru ciśnienia. Na podstawie licznych pomiarów przeprowadzonych w systemie pomiarowym o strukturze przedstawionej na rys. 2 i analizy wyników ustalono wartości temperatur przelicznika (temperatur komory), dla których jest przeprowadzana identyfikacja. Ustalenie tych wartości jest istotne z punktu widzenia czasu trwania identyfikacji. Wybrano pięć wartości temperatur w zakresie od -20°C do 50°C . Liczba wartości ciśnień, przy których przeprowadzane są pomiary, nie jest krytyczna ze względu na bardzo krótki czas ustalania wartości ciśnienia zadawanego przez kalibrator ciśnienia. Dla przelicznika o zakresie pomiarowym ciśnienia od 100 kPa do 600 kPa pomiary są wykonywane dla kilkunastu wartości ciśnienia.



Rys. 2. Struktura systemu pomiarowego
Fig. 2. The structure of the measuring system

Kolejną czynnością realizowaną w systemie jest dwuwymiarowa aproksymacja średniokwadratowa funkcją sklejaną trzeciego rzędu dwuwymiarowego zbioru wartości wyników pomiaru ciśnienia. Wynik aproksymacji jest podstawą do wyznaczenia tablicy poprawek. W prezentowanej metodzie tablica ta ma wymiar 64 w dziedzinie ciśnienia z krokiem 128 oraz 71 w dziedzinie temperatury z krokiem 1°C . Poprawka jest liczbą dwubajtową. Pomiar ciśnienia jest wykonywany wielokrotnie w czasie jednego cyklu pomiarowego przelicznika. Taki zabieg wprowadza uśrednianie wyniku oraz możliwe jest uzyskanie słowa wyniku dłuższego niż 12 bitów. W tym przypadku wynik pomiaru jest reprezentowany słowem 13-bitowym. Na podstawie wartości znamionowej stałej przetwarzania czujnika ciśnienia, wzmocnienia wzmacniacza instrumentalnego przyjęto znormalizowaną stałą przetwarzania całego kanału C_p o wartości 77 Pa/bit . W wyniku korekcji błędów dokonywana jest normalizacja charakterystyki przetwarzania do tej właśnie wartości.

Kolejnymi czynnościami realizowanymi w systemie są: umieszczenie tablicy poprawek w programie przelicznika i sprawdzenie skuteczności korekcji błędów.

Zastosowane w systemie przyrządy charakteryzują się następującymi podstawowymi właściwościami metrologicznymi:

- kalibrator ciśnienia typu DPI520: błąd podstawowy 0,025% wartości mierzonej w zakresie od 20% do 100% wartości znamionowej oraz 0,01% wartości znamionowej w zakresie od 0 do 20% wartości znamionowej, zakres pomiarowy $0 \div 700$ kPa abs,
- symulator czujnika Pt1000: klasa dokładności 0,02,
- komora temperaturowa Vt 4010: błąd graniczny temperatury $0,2^{\circ}\text{C}$ w całym zakresie temperatur $(-40 \div 180)^{\circ}\text{C}$.

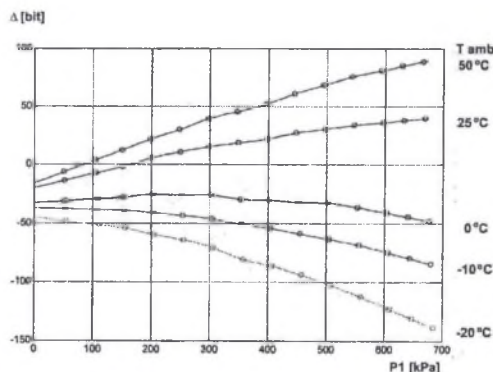
Pozostałe elementy systemu pomiarowego to:

- symulator objętości V1 w postaci sterowanego nadajnika impulsów z wyjściem kontaktronowym,
- butla azotu N_2 ,
- komputer.

Przyrządy zostały skompletowane tak, aby można było jak najtaniej przeprowadzić automatyczny proces korekcji błędów przelicznika.

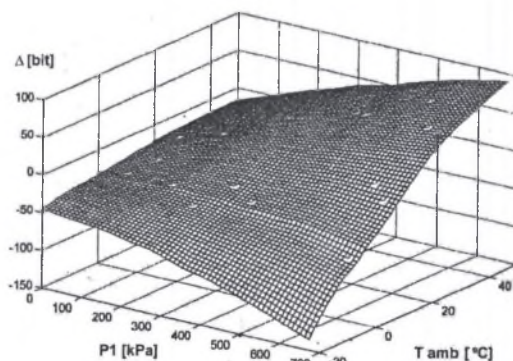
4. WYNIKI POMIARÓW CIŚNIENIA PRZED I PO KOREKCJI BŁĘDÓW

Na kolejnych rysunkach przedstawiono wyniki pomiarów przed korekcją błędów (rys. 3 i 4) oraz wykres błędu pomiaru ciśnienia po korekcji błędów (rys. 5).



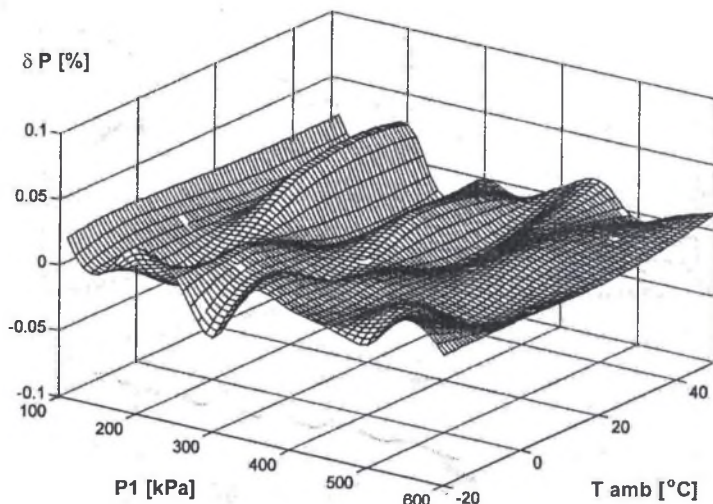
Rys. 3. Błąd pomiaru ciśnienia (w bitach) przed korekcją błędów

Fig. 3. Pressure error (in bits) before error correction



Rys. 4. Błąd z rys. 3 po aproksymacji – zobrazowanie 3D

Fig. 4. Error from fig. 3. after approximation – visualisation 3D



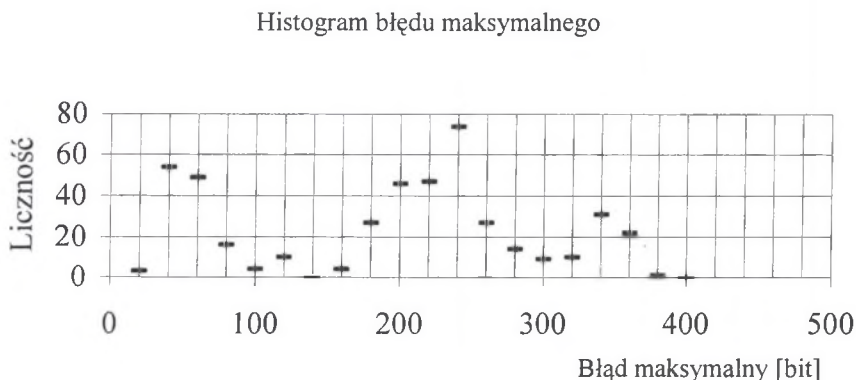
Rys. 5. Błąd względny pomiaru ciśnienia odniesiony do wartości mierzonej w funkcji zadanego ciśnienia i temperatury otoczenia po korekcji błędów

Fig. 5. Relativ pressure error in relation to the actual value vs proper pressure and ambient temperature after error correction

Zobrazowany na rysunkach 3 i 4 błąd pomiaru ciśnienia wyrażony w bitach (Δ) jest zdefiniowany jako różnica wartości wyniku przetwarzania analogowo-cyfrowego $N(P1, T_{amb})$ i wartości poprawnej wynikającej z przyjętej wartości stałej przetwarzania C_p kanału pomiaru ciśnienia dla zadanej wartości ciśnienia $P1$.

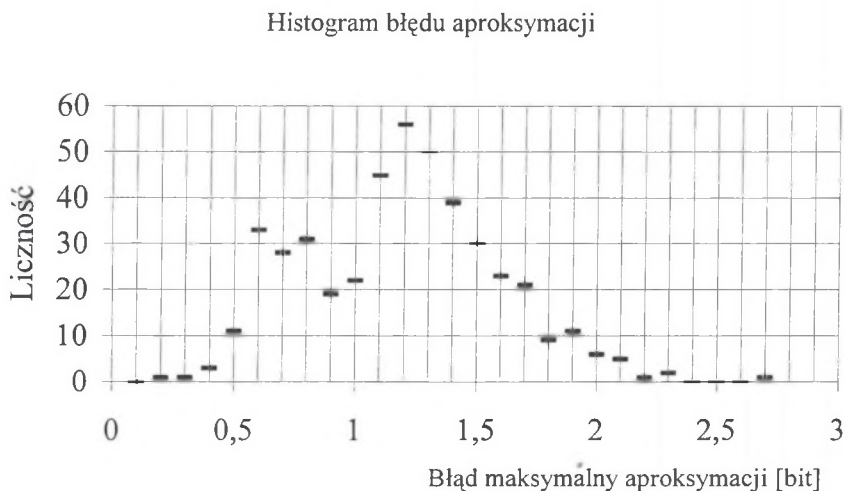
$$\Delta(P1, T_{amb}) = N(P1, T_{amb}) - \left[\frac{P1}{C_p} + \frac{1}{2} \right]. \quad (4)$$

Powyższe rysunki odnoszą się do jednego z wielu przebadanych przeliczników. Potwierdzają one skuteczność opracowanej metody kompensacji błędów toru pomiaru ciśnienia tego konkretnego przyrządu. Kolejnym dowodem potwierdzającym skuteczność metody są zebrane wyniki pomiarów dla zbioru 448 przeliczników o takiej samej konstrukcji jak przedstawiony poprzednio. Na rys. 6 przedstawiono histogram maksymalnego bezwzględnego błędu pomiaru ciśnienia wyrażony bitami wyjściowego 13-bitowego słowa kodowego. Na tym wykresie wyraźnie widoczne są trzy ekstrema. Wynikają one z faktu, że w zbiorze przyrządów stosowano czujniki ciśnienia dwóch typów dostarczanych przez dwóch różnych producentów. Widać bardzo wyraźnie różnice w wartościach błędu maksymalnego. Czujniki pierwszego typu charakteryzują się błędem w przedziale od 20 do 120 bitów. Większym błędem charakteryzują się czujniki drugiego typu.



Rys. 6. Histogram maksymalnego błędu przed korekcją
 Fig. 6. Histogram of the maximum error before correction

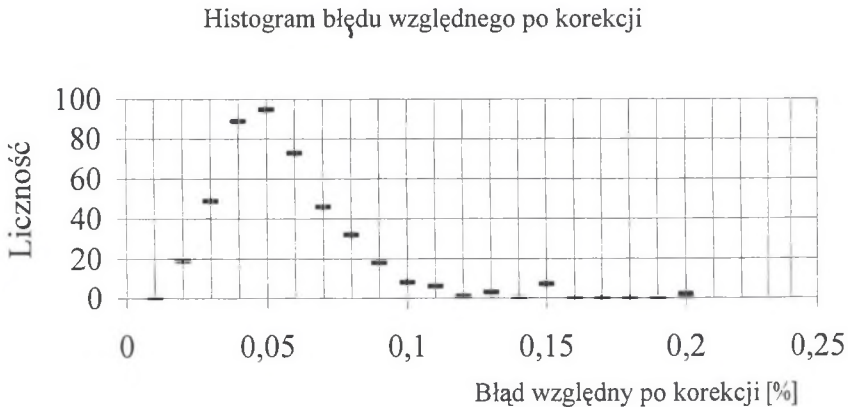
Kolejny rysunek przedstawia histogram maksymalnej wartości błędu aproksymacji średniokwadratowej wyrażony bitami słowa kodowego w punktach pomiarowych procesu identyfikacji charakterystyki kanału pomiaru ciśnienia.



Rys. 7. Histogram maksymalnego błędu aproksymacji
 Fig. 7. Histogram of the maximum error of approximation

Również na powyższym wykresie zauważalne są ekstrema i podobnie jak poprzednio mniejszym błędem charakteryzują się czujniki pierwszego typu. Błąd aproksymacji czujników drugiego typu jest większy, ale nie tak bardzo jak ma to miejsce w odniesieniu do błędu przed korekcją. Wynika to z faktu, że charakterystyka pierwotna (przed korekcją) czujnika drugiego typu jest bardziej gładka niż charakterystyka czujnika pierwszego typu. Ta właściwość ma również swoje zobrazowanie na kolejnym rysunku przedstawiającym histogram błędu

względne odniesionego do wartości mierzonej po korekcji. Histogram wykazuje jedną wartość dominującą. W efekcie zastosowanej korekcji błędów zostały więc skutecznie zniwelowane wyraźne różnice błędów przed korekcją dla dwóch rodzajów czujników ciśnienia.



Rys. 8. Histogram błędu względnego po korekcji błędów kanału pomiaru ciśnienia

Fig. 8. Histogram of the relative error after correction of pressure measurement channel

5. WNIOSKI

Przedstawiona metoda korekcji błędów kanału pomiaru temperatury jest metodą skuteczną i zapewnia utrzymanie wartości błędu pomiaru ciśnienia o wartościach zgodnych z wymaganiami odnośnych przepisów [1,4]. Jest metodą, która normalizuje charakterystykę przetwarzania całego kanału, czyli czujnika, wzmacniacza instrumentalnego i przetwornika analogowo-cyfrowego. Jest metodą bardzo szybką w swej realizacji, co jest jej najważniejszą właściwością ze względu na zastosowanie w przyrządzie o zasilaniu bateryjnym. Jej skuteczność może być zmniejszona jedynie w przypadku wystąpienia zmian charakterystyk pierwotnych (przed korekcją) elementów składowych kanału pomiaru ciśnienia (np. zjawisko starzenia czujnika ciśnienia). Wyniki badań dużej liczby przeliczników wskazują, że zaproponowana metoda może być z powodzeniem stosowana w produkcji precyzyjnych przyrządów pomiarowych.

Literatura

1. Pierwszy wstępny projekt zaleceń międzynarodowych na temat: *Przyrządy elektroniczne do gazomierzy objętościowych*. OIML SP 6 Sr 9.
2. Polska Norma PN – EN 60751 + A2: 1997 *Czujniki platynowe przemysłowych termometrów rezystancyjnych*.
3. Polska Norma PN – EN 50020:2000 *Urządzenia elektryczne w przestrzeniach zagrożonych wybuchem – Wykonania iskrobezpieczne „i”*.
4. Norma Zakładowa PGNiG ZN – G – 4007 *Pomiary paliw gazowych. Urządzenia elektroniczne. Wymagania i badania*.

Literatura

1. Pierwszy wstępny projekt zaleceń międzynarodowych na temat: *Przyrządy elektroniczne do gazomierzy objętościowych*. OIML SP 6 Sr 9.
2. Polska Norma PN – EN 60751 + A2: 1997 *Czujniki platynowe przemysłowych termometrów rezystancyjnych*.
3. Polska Norma PN – EN 50020:2000 *Urządzenia elektryczne w przestrzeniach zagrożonych wybuchem – Wykonania iskrobezpieczne „i”*.
4. Norma Zakładowa PGNiG ZN – G – 4007 *Pomiary paliw gazowych. Urządzenia elektroniczne. Wymagania i badania*.
5. Majocha A.: *Linearyzacja i korekcja temperaturowa charakterystyk torów pomiarowych w przeliczniku objętości gazu*. Materiały konferencyjne MWK 2003, Waplewo, maj 2003.

Recenzent: Dr hab. inż. Waldemar Minkina, prof. Politechniki Częstochowskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 7 grudnia 2004

Abstract

Gas volume measurement devices are among the most important devices for the measuring technique concerning the measurement of different kinds of media. The devices which measure them are the gas-meters, volume correctors and flow computers. A battery supplying corrector is a kind of gas volume corrector. Since the device is used to settle accounts between the supplier and the customer, the volume corrector must meet different requirements. To satisfy these requirements, which refer to pressure measurement, it is necessary to make a non-linearity and temperature error correction. The specific operation of the battery supplying device requires the method of errors correction to execute in a very short time. In this paper, the method that uses the table of correction is presented. This table is generated, individually for each device, in the presented measuring system, and then located in the program memory. The results of measured errors of the 448 devices group are presented on figures 6, 7 and 8. These figures clearly show, that the application of the proposed method of errors correction ensures, that the requirements specified by the metrological rules are met.