

Andrzej MET

Instytut Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej  
Politechnika Śląska

## ALGORYTM AUTOKOMPENSACJI PRECYZYJNEGO KOMPARATORA INDUKCYJNOŚCI

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono algorytm autokompensacji precyzyjnego komparatora do pomiaru wzorców indukcyjności. Opiera się on na analizie statystycznej sygnału nierównowagi. Działanie algorytmu polega na takim dobraniu nastawy, aby mediana sygnału nierównowagi miała wartość zero. Metoda ta pozwala na kilkakrotne powiększenie rozdzielczości mostka.

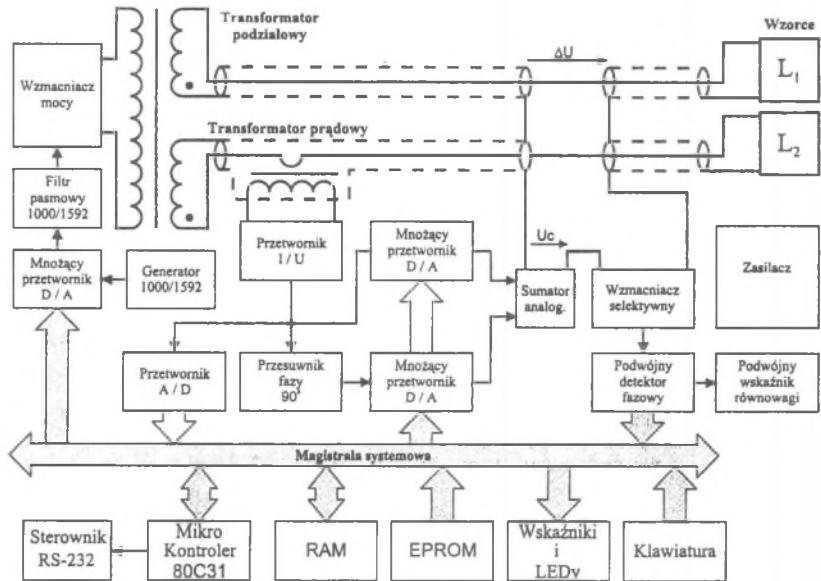
## ALGORITHM OF SELF-BALANCING PRECISE MEASURING BRIDGE

**Summary.** A algorithm of self-balancing precise measuring bridge for inductance standards has been presented in the paper. Principle of the algorithm is based on the statistical analysis of unbalanced signal. The algorithm tries to change the bridge balance to the state of the zero value of the noisy unbalanced signal median. The method improves the resolution several times.

### 1. WSTĘP

Nowoczesne przyrządy pomiarowe bardzo często wyposażone są w mikrokontroler, który służy do ich automatyzacji. Najczęściej jest on wykorzystywany do automatycznej zmiany zakresu, filtracji sygnału pomiarowego, wyświetlania rozbudowanej struktury poleceń na ekranie przyrządu pomiarowego. Mikrokontrolery są również stosowane w przyrządach pomiarowych o najwyższych dokładnościach. Przykładem może tu być precyzyjny

komparator wzorców indukcyjności [1], którego schemat blokowy przedstawiony jest na rys. 1. W przyrządzie tym mikrokontroler 80C31 steruje mnożącymi przetwornikami D/A (dwa wytwarzają składowe wektora kompensacji, a trzeci reguluje wartość prądu pomiarowego), komunikacją z komputerem poprzez łącze RS, wyświetlaniem wyników na wskaźnikach cyfrowych oraz odczytem klawiatury.

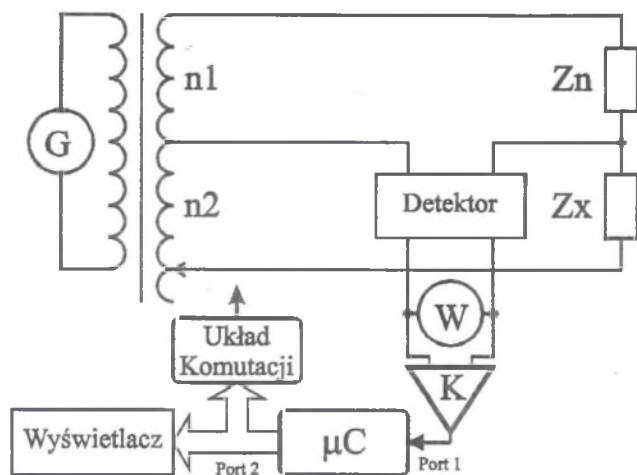


Rys.1. Schemat blokowy precyzyjnego komparatora wzorców indukcyjności  
Fig.1. Precise measuring bridge block diagram for inductance standard

Jednak główną zaletą zastosowania mikrokontrolera jest możliwość zastąpienia kłopotliwej i czasochłonnej ręcznej kompensacji znacznie szybciej wykonywaną autokompensacją. Umożliwia ją informacja pobrana z detektora stanu równowagi (podwójnego detektora fazowego) i przekazana przez magistralę systemową do portu mikrokontrolera, który koryguje współczynniki mnożących przetworników D/A.

## 2. UKŁAD AUTOKOMPENSACJI

Uproszczonego schemat blokowy mostka transformatorowego z układem autokompensacji realizowanym na bazie mikrokontrolera przedstawiono na rys. 2.



Rys.2. Schemat blokowy mostka transformatorowego z układem autokompensacji realizowanym na bazie mikrokontrolera

Fig.2. Block diagram of the transformer bridge with self-balance based on microcontroller

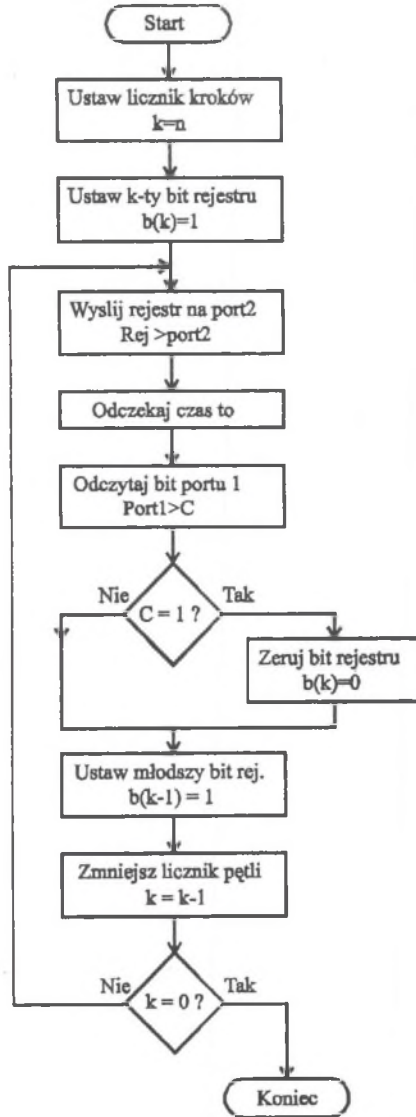
Równoległe do wskaźnika napięcia nierównowagi ( $W$ ) dołączone jest wejście komparatora napięcia ( $K$ ). Znak napięcia nierównowagi z wyjścia komparatora podawany jest na port 1 jako stan logiczny. Natomiast na port 2 wyprowadzana jest informacja, która umożliwia równoważenie poprzez komutację nastawy. Aktualna wartość nastawy wyprowadzana jest również na wyświetlacz.

### 3. AUTOKOMPENSACJA METODĄ WAGOWĄ

Autokompensacja jest wykonywana zgodnie z programem zawartym w pamięci ROM. Najszybszą metodą autokompensacji jest metoda wagowa analogiczna do metody stosowanej w kompensacyjnych przetwornikach A/D. Liczba kroków autokompensacji jest równa liczbie aktywnych bitów w porcie 2 i jest zdeterminowana rozdzielczością pomiaru.

Schemat blokowy programu autokompensacji metodą wagową przedstawiony jest na rys. 3. Bezpośrednio po starcie licznik kroków ustawiany jest na wartość  $n$ . W rejestrze  $b$  najstarszy bit (o indeksie  $n$ ) ustawiany jest na jeden, a pozostałe bity są zerowane. Zawartość rejestru  $b$  jest następnie wysyłana na port 2, powodując wprowadzenie odpowiedniej nastawy. Po czasie  $t_0$  zanika stan nieustalony układu spowodowany zmianą nastawy i można odczytać wartość bitu w porcie 1 (na wyjściu komparatora), który określa znak napięcia nierównowagi. Jeżeli bit portu 1 ma stan wysoki, oznacza to, że wprowadzona nastawa jest za duża i bit o indeksie  $n$  w rejestrze  $b$  jest zerowany, natomiast w przeciwnym przypadku wprowadzona

nastawa jest poprawna i bit o indeksie  $n$  w rejestrze  $b$  pozostaje równy jeden. Następnie zostaje ustawiony młodszy bit  $n-1$  ( $k=n$ ) rejestru  $b$ . Licznik kroków zostaje zmniejszony o jeden, po czym testowany jest jego stan. Jeżeli jest równy zero, to oznacza, że  $n$ - kroków zostało wykonanych i procedura autokompensacji jest zakończona, jeżeli nie, to wykonywany jest następny krok dla bitu  $n-1$  w rejestrze  $b$ .



Rys.3. Schemat blokowy programu równoważenia metodą wagową  
Fig.3. Algorithm of self-balancing by successive approximation method

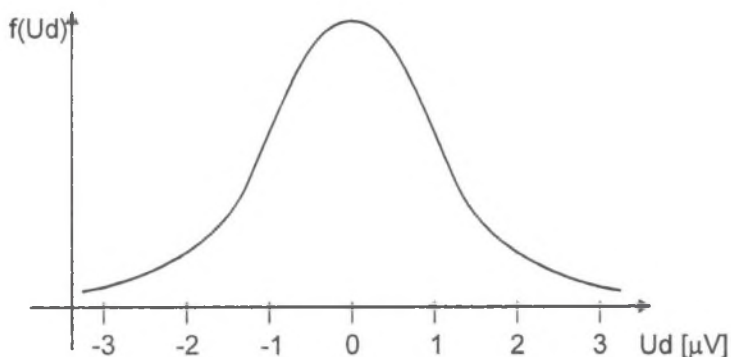
Czas wykonywania automatycznej kompensacji metodą wagową zależy głównie od liczby przetwarzanych bitów oraz długości stanu nieustalonego, spowodowanego zmianą nastawy. Przyjmując, że czas wykonywania poszczególnych rozkazów jest znikomo mały w porównaniu z czasem  $t_0$ , całkowity czas autokompensacji jest równy czasowi trwania stanu nieustalonego  $t_0$  pomnożonemu przez liczbę przetwarzanych bitów.

W zmiennoprądowych przyrządach pomiarowych autokompensację przeprowadza się najczęściej dla dwóch składowych ortogonalnych, określających wektor nierównowagi. Najbardziej korzystnym rozwiązaniem jest jednoczesne równoważenie obu składowych. W tym przypadku na porty wysyłane są dwie nastawy jednocześnie (dla obu składowych ortogonalnych), a po odczekaniu czasu  $t_0$  odczytywane są znaki obu składowych wektora nierównowagi za pomocą detektora fazoczułego. Rozwiązanie takie zapewnia optymalne wykorzystanie czułości detektora przy małych błędach fazowych. Czas wykonywania procedury nie powiększa się, bo długość stanu nieustalonego nie ulega zmianie.

W precyzyjnym komparatorze wzorców indukcyjności autokompensacja trwa około trzech sekund (15bitów przy czasie  $t_0=0,2s$ ).

#### 4. WŁAŚCIWOŚCI STATYSTYCZNE SYGNAŁU NIERÓWNOWAGI

Czynnikiem ograniczającym rozdzielczość pomiaru jest poziom szumu na wyjściu detektora. Generuje się on niezależnie w wielu miejscach komparatora i na podstawie twierdzenia centralnego można przyjąć, że ma rozkład normalny. Funkcję gęstości prawdopodobieństwa dla napięcia wyjściowego detektora w stanie równowagi przedstawiono na rys. 4.

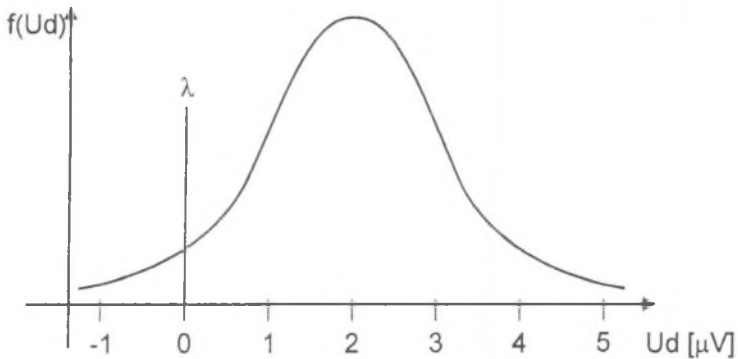


Rys.4. Gęstość prawdopodobieństwa dla napięcia wyjściowego detektora  $U_d$  w stanie równowagi

Fig.4. Probability density function of detector voltage  $U_d$  in balanced state

Wynika z niej, że prawdopodobieństwo wystąpienia zerowego napięcia na wyjściu detektora jest największe, ale również możliwe jest pojawienie się zarówno dodatnich, jak i ujemnych napięć. W praktyce objawia się to drganiem wskazówki detektora lub niepowtarzalnością wyniku po autokompensacji.

Na rysunku 5 przedstawiono funkcję gęstości prawdopodobieństwa napięcia  $U_d$  w stanie nierównowagi komparatora. Wynika z niej, że najbardziej prawdopodobne jest pojawienie się na wyjściu detektora napięcia  $2 \mu\text{V}$ , ale możliwe jest również pojawienie się napięcia zerowego. Istnieje więc możliwość ustalania przez układ autokompensacji fałszywych stanów równowagi i podawanie niepowtarzalnych wyników.



Rys.5. Gęstość prawdopodobieństwa dla napięcia wyjściowego detektora  $U_d$  w stanie nierównowagi komparatora

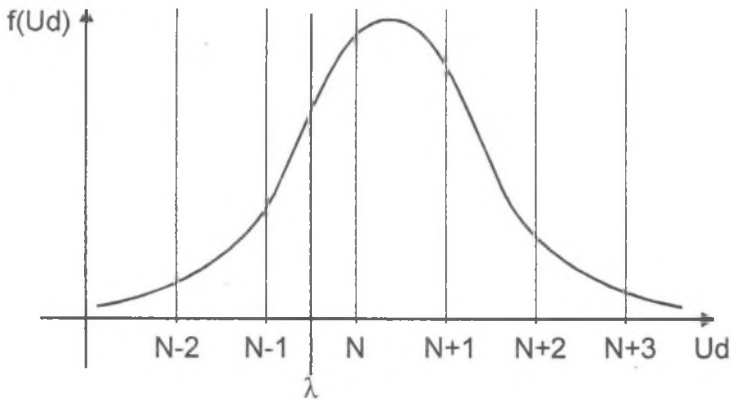
Fig.5. Probability density function of detector voltage  $U_d$  in unbalanced state

Określanie stanu równowagi na podstawie pojedynczej próbki napięcia detektora jest nieefektywne i znacznie korzystniej jest przeprowadzić analizę statystyczną ciągu próbek. W tym celu wykorzystano parametr pozycyjny kwantyl  $\lambda$ , który dzieli krzywą rozkładu prawdopodobieństwa na dwie części tak, że:

$$P \{ U_d < \lambda \} = p, \quad (1)$$

$$P \{ U_d > \lambda \} = 1 - p. \quad (2)$$

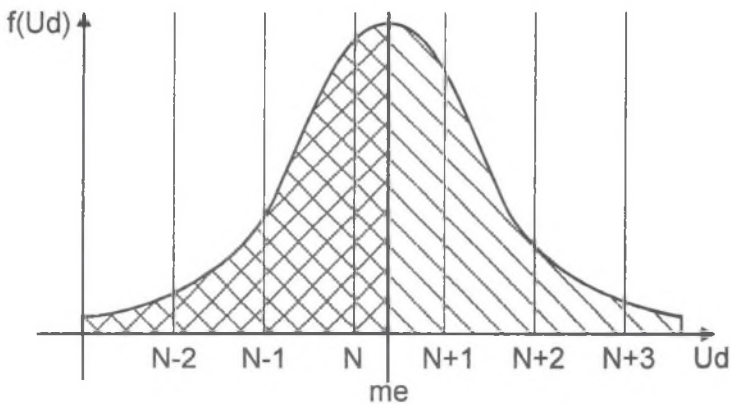
Ustawiając kwantyl  $\lambda$  dla  $U_d = 0$  i sprawdzając znak próbki można w łatwy sposób określić stan równowagi. Jeżeli prawdopodobieństwo wystąpienia próbki dodatniej i ujemnej jest jednakowe (rys.4), to układ jest w stanie równowagi, jeżeli różne (rys.5), to układ jest w stanie nierównowagi. Miejsce występowania zerowego napięcia na osi  $U_d$  zależy od nastawy komparatora. Można je wyznaczyć teoretycznie dla poszczególnych nastaw  $N$  (rys.6) na podstawie znajomości warunków równowagi i czułości komparatora.



Rys. 6. Zrealizowane gęstości prawdopodobieństwa napięcia zerowego  $U_d$  dla poszczególnych nastaw  $N$

Fig.6. Achieved voltage probability density of zero detector for different settings  $N$

Kwantyl  $\lambda$  nie może przyjmować dowolnych położeń, lecz tylko takie, które pokrywają się z nastawami  $N$  na osi  $U_d$ . Przy odpowiednio dużej rozdzielczości komparatora odległości między kolejnymi nastawami są niewielkie i istnieje możliwość umieszczenia kwantyla dokładnie w środku funkcji gęstości prawdopodobieństwa (rys.7). Kwantyl taki przyjmuje nazwę mediany, a komparator jest w stanie idealnej równowagi.



Rys.7. Krzywa rozkładu prawdopodobieństwa z zaznaczoną medianą

Fig.7. Probability density function of detector voltage with median marked

Dla mediany zachodzi:

$$P \{ U_d < me \} = \frac{1}{2}, \tag{3}$$

$$P \{ U_d > me \} = 1/2. \quad (4)$$

Powierzchnie pod funkcją rozkładu gęstości prawdopodobieństwa na prawo i lewo od mediany są sobie równe.

Przy odpowiednio dobranej nastawie  $N_x$  wartość mediany jest równa zero (rys.4.), a dla przypadkowo próbkowanego napięcia detektora zachodzi:

$$P \{ U_d < 0 \} = 1/2 \quad \text{oraz} \quad P \{ U_d > 0 \} = 1/2. \quad (5)$$

Wynika stąd, że dla dużej liczby próbek zakłócanych stochastycznie połowa ma wartość dodatnią, a druga połowa ujemną, czyli:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_+}{n} = \frac{1}{2} \quad \text{oraz} \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_-}{n} = \frac{1}{2}. \quad (6)$$

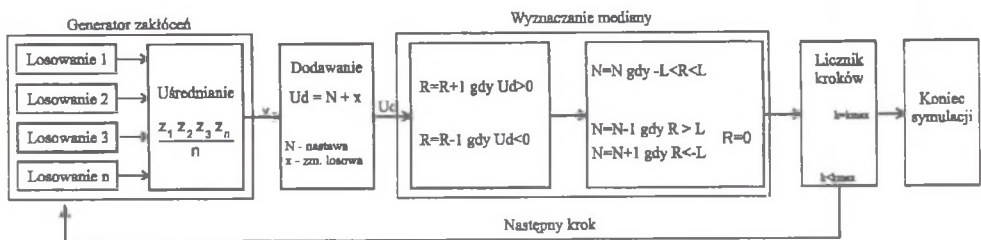
Przypisując próbkom wartości:

$$1 \text{ dla } U_d > 0 \quad \text{oraz} \quad -1 \text{ dla } U_d < 0 \quad (7)$$

ich suma dla dużej liczby próbek będzie w przybliżeniu równa zero, czyli:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{1 \cdot n_+}{n} + \frac{-1 \cdot n_-}{n} \right) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0. \quad (8)$$

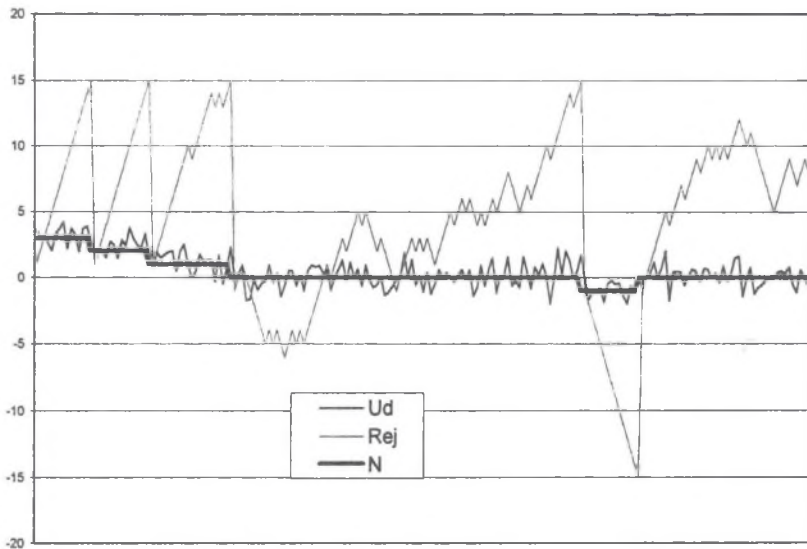
Jeżeli aktualna nastawa  $N_x$  jest równa medianie, to próbując napięcie detektora liczba próbek dodatnich i ujemnych powinna być jednakowa, a ich suma oscylować wokół zera. Gdy suma próbek gwałtownie rośnie lub maleje, oznacza to, że nastawa  $N_x$  nie jest medianą i należy ją skorygować. Aby sprawdzić powyższą tezę opracowano program symulacyjny, którego schemat blokowy przedstawiono na rys. 8.



Rys.8. Schemat blokowy programu symulacyjnego do wyznaczania mediany  
Fig.8. Simulation program of self-balancing bridge checking zero value median



Program rozpoczyna działanie od losowania  $n$  liczb przypadkowych o rozkładzie jednostajnym. Liczby te są uśredniane, aby zgodnie z twierdzeniem centralnym otrzymać przybliżony rozkład normalny. W ten sposób otrzymuje się na wyjściu generatora zakłóceń zmienną losową  $x$  o rozkładzie normalnym, która symuluje zakłócenie. Zmienną  $x$  sumuje się z nastawą  $N$  otrzymując symulowane napięcie detektora  $U_d$ . Następny blok wyznacza medianę. Rejestr  $R$  jest powiększany o jeden, gdy  $U_d > 0$  oraz zmniejszany o jeden, gdy  $U_d < 0$ . Dla rejestru wyznaczona jest górna i dolna wartość graniczna ( $L$  i  $-L$ ), po przekroczeniu której korygowana jest wartość nastawy  $N$  oraz zerowany jest rejestr. Następnym blokiem jest licznik kroków symulacji, który umożliwia zatrzymanie programu po wykonaniu zadanej liczby kroków. Wyniki symulacji przedstawione są na rys. 9.

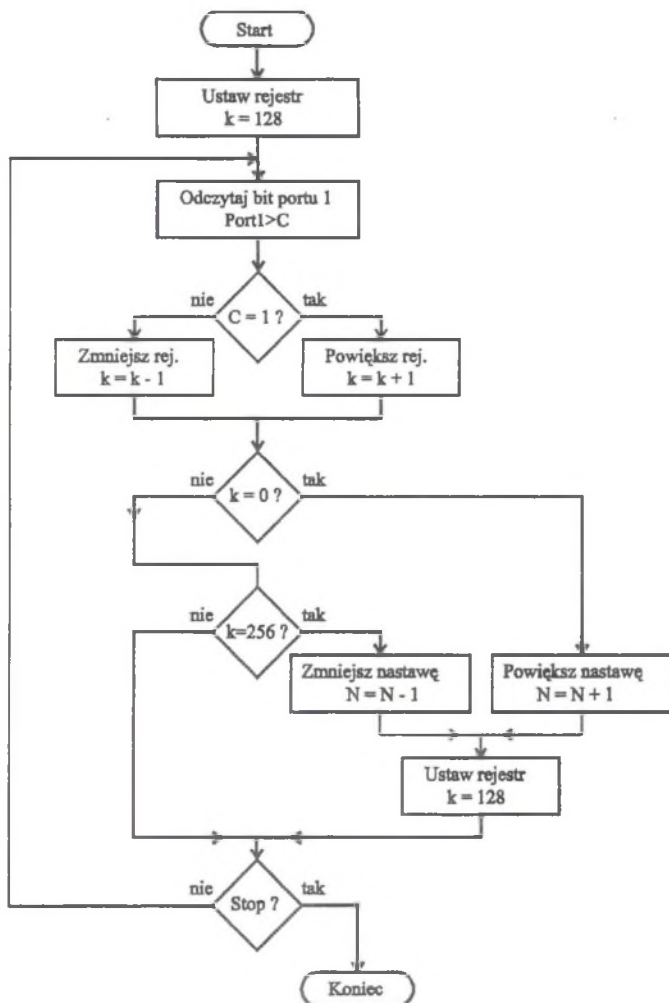


Rys. 9. Wyniki symulacji wyznaczania mediany  
Fig. 9. Result of simulation program

Początkowo wartość napięcia detektora jest dodatnia, co powoduje szybki wzrost zawartości rejestru. Gdy rejestr osiąga wartość graniczną ( $L = 15$ ), następuje zmniejszenie nastawy o jeden i wyzerowanie rejestru. Jednak napięcie detektora dalej pozostaje dodatnie, co powoduje dalsze korygowanie nastawy. Po trzykrotnej korekcyi nastawa przyjmuje taką wartość, że mediana jest w przybliżeniu równa zero, a zawartość rejestru zmienia się wewnątrz przedziału  $L, -L$  nie powodując (poza jednym wyjątkiem) dalszych korekcyi nastawy.

## 5. AUTOKOMPENSACJA Z WYKORZYSTANIEM OBRÓBK STATYSTYCZNEJ SYGNAŁU NIERÓWNOWAGI

Pozytywne wyniki przeprowadzonej symulacji przyczyniły się do opracowania programu autokompensacji z wykorzystaniem obróbki statystycznej napięcia detektora. Schemat blokowy opracowanego programu przedstawiono na rys. 10.

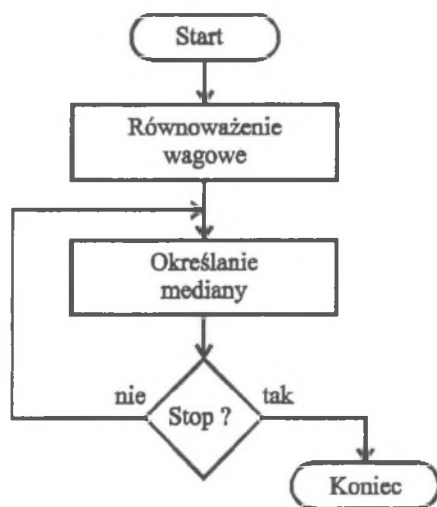


Rys. 10. Schemat blokowy programu autokompensacji wykorzystującego obróbkę statystyczną napięcia detektora równowagi

Fig.10. Algorithm of self-balancing method by the statistical processing of unbalanced voltage

Po starcie programu następuje ustawienie 8-bitowego rejestru na wartość 128 (połowa pojemności). Następnie zostaje odczytany bit portu 1, który określa znak napięcia detektora. W zależności od wartości odczytanego bitu następuje powiększenie lub zmniejszenie o jeden stanu rejestru. Wartość rejestru jest następnie testowana. Jeżeli został on wyzerowany lub przepełniony, to następuje odpowiednio powiększenie lub zmniejszenie nastawy komparatora oraz ponowne ustawienie rejestru na wartość 128. Program powtarza powyższą pętlę tak długo, aż nie zostanie naciśnięty przycisk „stop”.

W trakcie działania programu autokompensacja przebiega na bieżąco, umożliwiając śledzenie wolnych zmian wielkości mierzonej. W celu umożliwienia szybkiej i dokładnej autokompensacji najlepiej użyć dwóch programów działających szeregowo, przedstawionych blokowo na rys. 11.



Rys.11. Schemat blokowy autokompensacji wykorzystujący dwa programy

Fig.11. Block diagram of self-balancing process with using both methods (successive approximation, and statistical processing)

Pierwszy program dokonuje równoważenia metodą wagową według schematu przedstawionego na rys. 3. Zaletą tego programu jest jego szybkość (stan równowagi następuje po około 3 sekundach), natomiast wadą brak odporności na zakłócenia i szumy. Jeżeli w trakcie równoważenia wystąpi zakłócenie, stan równowagi będzie niepoprawny bez możliwości korekcji, ponieważ program dokonuje równoważenia tylko jeden raz. Po zakończeniu działania programu równoważenia metodą wagową rozpoczyna działanie program wyznaczania mediany (według schematu przedstawionego na rys. 8), który działa w sposób ciągły, korygując błędy wynikające z zakłóceń oraz umożliwiając bieżące śledzenie wielkości mierzonej.

## 6. PODSUMOWANIE

Zastosowanie analizy parametrów statystycznych sygnału nierównowagi umożliwiło około dziesięciokrotne powiększenie rozdzielczości komparatora indukcyjności. Obecnie możliwy jest pomiar różnicy indukcyjności dwóch wzorców 10mH z rozdzielczością 1nH (0,1ppm). Przedstawiona procedura pozwala na ciągły pomiar i rejestrację różnicy indukcyjności, umożliwiając badanie stabilności wzorców oraz wpływ temperatury bez konieczności wielokrotnej ręcznej kompensacji. Implementacja opracowanego programu autokompensacji nie wymagała żadnych nakładów finansowych a jedynie zmiany programu w pamięci ROM. Opracowany algorytm autokompensacji oparty na analizie statystycznej sygnału nierównowagi może mieć zastosowanie w wielu innych przyrządach pomiarowych, a zwłaszcza precyzyjnych.

## LITERATURA

1. Met A., Skubis T.: Komparator wzorca grupowego indukcyjności własnej. Podstawowe Problemy Metrologii, Prace Komisji Metrologii PAN, Seria: Konferencje Nr1. Gliwice – Ustroń 1998.
2. Met A., Rzepakowska J., Skubis T., Tarłowski A.: Badania wzorca grupowego indukcyjności własnej z zastosowaniem komparatora z multiplekserem. Mat. konf. PPM'98, s. 202 - 206, Gliwice – Ustroń, 1998
3. Met A.: Komparator wzorców indukcyjności. ZN Pol. Śl.; s. Elektryka; z.165; Gliwice 1999.
4. Met A.: Rozwój układów do precyzyjnych pomiarów małych różnic impedancji. Komisja Metrologii PAN Oddział w Katowicach; Prace Komisji Naukowych, Zeszyt nr 23 Katowice 1999.
5. Skubis T., Met A., Kampik M.: A Bridge for Maintenance of Inductance Standard. IEEE Trans. on Instr. and Meas. Nr 6, vol. 48 December 1999.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Marian Miłek

Wpłynęło do Redakcji dnia 1 grudnia 2001

## Abstract

Many modern measurement devices include micro-controller for control of measurement process. In a measurement bridge the micro-controller is sometimes used for self-balancing process. The algorithm of self-balancing process is usually based on successive approximation method. If the noise in unbalance signal is too high then precision of results is limited. To improve the repeatability of results the author proposes the algorithm based on the statistical analysis of unbalanced signal. The algorithm tries to change balance of the bridge to the state of the zero value of the noisy unbalanced signal median. The criterion is the equal values of samples with plus and minus signs. The method was checked in practice and makes it possible to improve the bridge resolution several times. Application of the method does not require costs but only changing the micro-controllers program.