AKADEMIA GÓRNICZO - HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA w KRAKOWIE

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI, INFORMATYKI i ELEKTRONIKI

KATEDRA METROLOGII



LABORATORIUM METROLOGII

Wprowadzenie do obsługi multimetrów analogowych i cyfrowych

dr inż. Piotr Burnos

Kraków, 2010

Spis treści

1. Wstęp ... 3

2. Przyrządy analogowe ... 3

2.1 Mierniki magnetoelektryczne ... 7

3. Przyrządy cyfrowe – pojęcia podstawowe ... 9

3.1 Struktura multimetru ... 11

3.2 Pomiar napięcia stałego – przetwornik A/C z podwójnym całkowaniem ... 12

3.3 Pomiar napięcia zmiennego ... 13

4. Przyczyny błędów i niepewności pomiarowych ... 15

4.1 Błąd graniczny pomiaru przyrządem analogowym ... 17

4.2 Błąd graniczny pomiaru przyrządem cyfrowym ... 18

Bibliografia ... 20

1. Wstęp

Ze względu na zasadę działania stosowane obecnie przyrządy można podzielić na analogowe i cyfrowe. Do grupy przyrządów analogowych zaliczamy wskazówkowe urządzenia elektromechaniczne. Mierniki tego typu wciąż znajdują się w powszechnym użyciu i pomimo, iż technika cyfrowa dynamicznie wypiera analogowe techniki pomiaru to należy zaznaczyć, że te ostatnie wciąż mają liczną grupę zwolenników. Argumentami przemawiającymi za używaniem przyrządów analogowych jest ich niezawodność, prosta budowa, niska cena, a przede wszystkim ciągła zmienność wskazania przyrządu. Z psychofizycznego punktu widzenia zjawiska ciągłe są dla ludzi bardziej intuicyjne niż dyskretne i prawdopodobnie z tego powodu próby zastąpienia tradycyjnych przyrządów wskazówkowych ich cyfrowymi odpowiednikami w przypadku samochodów skończyły się niepowodzeniem. Ponadto istotną zaletą większości przyrządów analogowych jest praca bez konieczności zewnętrznego zasilania. Do podstawowych wad przyrządów analogowych należy zaliczyć dużą niepewność pomiaru, oraz błąd odczytu wyniku pomiaru z podziałki miernika przez człowieka (błąd paralaksy). Ponadto mierniki takie nie mogą być podłączane do komputerowych systemów pomiarowych ze względu na brak cyfrowego sygnału wyjściowego. Rezystancja wewnętrzna woltomierzy analogowych jest dużo mniejsza niż cyfrowych. Powoduje to znaczący wpływ przyrządu analogowego na badany obiekt, a w konsekwencji zakłócenie pomiaru. W przypadku przyrządów cyfrowych problem ten w zasadzie nie występuje, gdyż rezystancja wewnętrzna woltomierzy cyfrowych zawiera się w zakresie od 10MΩ do 10GΩ. Mała niepewność wyniku pomiaru jest parametrem przemawiającym na korzyść przyrządów cyfrowych - w zależności od mierzonej wielkości, może być do kilku razy mniejsza niż w przypadku pomiaru przyrządem analogowym. Co więcej w przyrządach cyfrowych nie występuje dodatkowa niepewność związana ze zjawiskiem paralaksy, gdyż wynik jest odczytywany z wyświetlacza wielosegmentowego. Co ciekawe spotykane są również cyfrowe przyrządy tablicowe z wirtualną wskazówką, łączące w sobie zalety dokładnego pomiaru cyfrowego z analogowym odczytem wartości wielkości mierzonej.

2. Przyrządy analogowe

Przyrządami analogowymi nazywa się przyrządy, których wskazania są funkcją ciągłą wartości mierzonej (Chwaleba, Poniński i Siedlecki 2000). Do tej grupy należą wskazówkowe przyrządy elektromechaniczne. Podzespół miernika, w którym pod wpływem wielkości mierzonej następuje odchylenie wskazówki nazywa się **ustrojem pomiarowym**. Rozróżnia się między innymi ustroje: magnetoelektryczne, elektromagnetyczne, elektrodynamiczne, ferrodynamiczne i elektrostatyczne. Różnią się one między sobą nie tylko zasadą działania i budową, ale także właściwościami metrologicznymi.

W miernikach odczyt wartości wielkości mierzonej następuje ze **skali**, na której naniesiona jest **podziałka**, czyli uporządkowany ciąg kresek oznaczonych cyframi. Odcinek skali objęty dwiema sąsiednimi kreskami podziałki nazywa się **działką elementarną**. Długość podziałki jest związana z klasą miernika, a liczba działek może wynosić od kilkunastu do ponad stu. Odczyt wartości wskazań przyrządów wskazówkowych dokonuje się bezpośrednio w jednostkach wielkości mierzonej lub pośrednio przez odczyt liczby działek odchylenia wskazówki.



Rysunek 1 Analogowy woltomierz magnetoelektryczny.

Pierwszy sposób jest charakterystyczny dla mierników technicznych i uniwersalnych, drugi dla wielozakresowych mierników laboratoryjnych. W takim przypadku odczytuje się liczbę działek α wskazywanych przez wskazówkę, które następnie przelicza się na wartość wielkości mierzonej x za pomocą tak zwanej **stałej zakresowej przyrządu** c_x, według zależności:

$$x = \alpha \cdot \mathrm{c_x} \quad [j.] \tag{1}$$

Stałą zakresową c_x oblicza się na podstawie danych technicznych miernika, jako iloraz zakresu pomiarowego Z_x oraz całkowitej liczby działek na danej skali α_m .

$$c_x = \frac{Z_x}{\alpha_m} \quad [\mathrm{j.}/\mathrm{dz.}] \tag{2}$$

Pamiętaj!

Jeżeli podziałka miernika nie jest wyskalowana w jednostkach wielkości mierzonej to przed przystąpieniem do pomiarów należy policzyć i zanotować stałe dla wszystkich zakresów miernika. W takim przypadku wskazanie miernika odczytujemy i notujemy w działkach, jednocześnie zapisując stałą zakresową. Dopiero na tej podstawie obliczamy wartość wielkości mierzonej.

Odczyt wyniku pomiaru w przyrządach analogowych może być obarczony **błędem paralaksy**, który występuje w przypadku, gdy obserwator patrzy na skalę miernika pod kątem przez co widzi niewłaściwe położenie wskazówki na tle podziałki. W celu ograniczenia tego błędu, na skalę miernika należy patrzeć prostopadle – w niektórych miernikach pomaga w tym lustro umieszczone wzdłuż podziałki. W takim przypadku obserwator powinien zwrócić uwagę na to, aby wskazówka pokryła się ze swoim odbiciem w lustrze.

Dokładny odczyt wartości wskazanej przez miernik jest możliwy tylko wtedy, gdy położenie wskazówki dokładnie pokrywa się z kreską podziałki. Jeżeli wskazówka znajduje się między kreskami, należy oszacować jej położenie z dokładnością 0.1 działki elementarnej dla przyrządów laboratoryjnych i 0.2 dla przyrządów klas technicznych. Najmniejsza cześć działki elementarnej jaką można odczytać nazywa się **zdolnością rozdzielczą podziałki.**

Pamiętaj!

Odczytu położenia wskazówki w laboratoryjnych przyrządach analogowych należy dokonywać starannie, bez błędu paralaksy i z dokładnością do dziesiątej części działki elementarnej.

Przykład 1: Woltomierzem o danych technicznych: Z_U=15V, α_m=150 dz., zmierzono napięcie uzyskując wychylenie wskazówki o α=87 działek. Oblicz wartość zmierzonego napięcia.

$$c_U = \frac{Z_x}{\alpha_m} = \frac{15}{150} = 0{,}1\ [\mathrm{V/dz.}]$$

$$U = \alpha \cdot c_U = 87 \cdot 0{,}1 = 8{,}7\ \ [\mathrm{V}]$$

W celu poinformowania użytkownika o rodzaju miernika i jego właściwościach metrologicznych, zgodnie z normą (PN-92/E-06501/01) na skali lub obudowie powinny być umieszczone następujące dane:

- symbol legalnej jednostki wielkości mierzonej (np. A – Amper, V – Wolt, W – Wat, Ω - Ohm),
- symbol rodzaju miernika (ustroju pomiarowego),
- symbol klasy dokładności,
- symbol rodzaju prądu i liczby ustrojów pomiarowych,
- symbol napięcia probierczego obwodów pomiarowych względem obudowy,
- nazwa lub znak wytwórcy i numer fabryczny.

W tabeli 1 zebrano najczęściej spotykane symbole umieszczane na przyrządach analogowych. Więcej informacji na ten temat można znaleźć w (Chwaleba, Poniński i Siedlecki 2000) lub w normie (PN-92/E-06501/01).

Tabela 1 Symbole umieszczane na miernikach analogowych

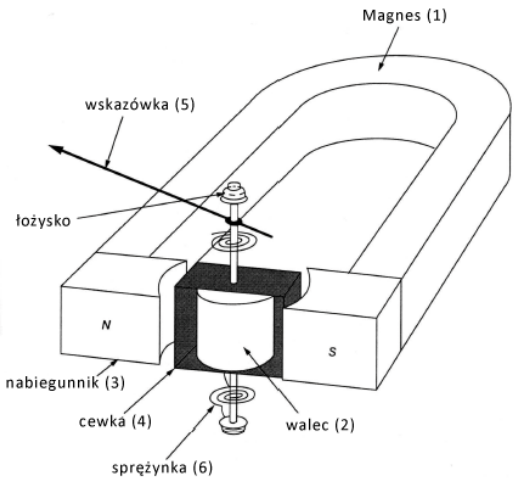
Symbol	Znaczenie
	Miernik magnetoelektryczny
	Miernik magnetoelektryczny z przetwornikiem prostownikowym
	Miernik elektromagnetyczny
	Miernik elektrodynamiczny
	Miernik ferrodynamiczny
	Miernik prądu stałego
	Miernik prądu przemiennego
	Miernik prądu stałego i przemiennego
	Pionowe położenie miernika
	Poziome położenie miernika
	Napięcie probiercze izolacji miernika, np. 2kV
0,5	Symbol klasy dokładności (np. 0,5) w przypadku gdy niepewność pomiaru wyraża się w procentach końcowej wartości zakresu pomiarowego
	Symbol klasy dokładności (np. 0,5) w przypadku gdy niepewność pomiaru wyraża się w procentach wartości wielkości mierzonej

Najważniejszą częścią każdego przyrządu analogowego jest **ustrój pomiarowy**, składający się z części nieruchomej oraz części ruchomej nazywanej **organem ruchomym**. Organ ruchomy, połączony ze wskazówką, wykonuje ruch obrotowy pod wpływem działających na niego sił magnetycznych, które powstają np. w skutek oddziaływania pola magnetycznego magnesu trwałego na prąd płynący w cewce organu ruchomego, lub w skutek oddziaływania pól wytworzonych przez prądy płynące w dwóch cewkach. Powstający w ten sposób moment działający na organ ruchomy nazywa się **momentem napędowym**. Aby kąt o jaki obróci się organ ruchomy był zależny od wielkości mierzonej, a wskazanie miernika było ustalone i proporcjonalne do wartości mierzonej wielkości, moment napędowy musi być zrównoważony przeciwnie skierowanym **momentem zwracającym**. Najczęściej moment ten jest wytwarzany przez sprężynki spiralne, które jednocześnie doprowadzają prąd do ustroju ruchomego. W stanie równowagi, organ ruchomy, a tym samym wskazówka miernika przyjmuje takie położenie, w którym suma momentów działających na organ ruchomy jest równa zero. Poniżej zostanie omówiona zasada działania miernika magnetoelektrycznego. Omówienie

mierników o innych ustrojach, np. elektromagnetycznym można znaleźć w (Tumański 2007), (Chwaleba, Poniński i Siedlecki 2000), (Kurdziel 1973).

2.1 Mierniki magnetoelektryczne

Zasada działania miernika magnetoelektrycznego polega na oddziaływaniu pola magnetycznego magnesu trwałego na cewkę organu ruchomego, przez którą płynie prąd. Na rysunku 2 przedstawiono budowę ustroju magnetoelektrycznego.



Rysunek 2 Budowa ustroju magnetoelektrycznego.

Część nieruchomą tego ustroju stanowi magnes trwały (1) oraz walec (2) umieszczony między biegunami magnesu. Walec i nabiegunniki (3) magnesu trwałego wykonane są ze stali magnetycznie miękkiej i są tak położone względem siebie aby powstała równomierna szczelina powietrzna między nabiegunnikami. Organem ruchomym jest nawinięta na aluminiowej ramce cewka (4), która umieszczona jest w szczelinie (cewka może być również wykonana bez ramki, a jej sztywność zapewnia pokrycie lakierem). Cewka osadzona jest na osi do której dołączona jest wskazówka (5). Prąd do cewki doprowadzony jest za pośrednictwem dwóch sprężyn spiralnych (6), które jednocześnie służą do wytwarzania momentu zwracającego.

Gdy przez cewkę płynie prąd I, to pole magnetyczne wytworzone przez magnes trwały działa na każdy bok cewki siłą F, która zależy od indukcji magnetycznej B, liczby zwojów cewki z, oraz długości boku cewki l, który znajduje się w polu magnetycznym:

$$F = z \cdot B \cdot I \cdot l \tag{3}$$

Siły działające na przeciwległe boki cewki mają przeciwne zwroty i usiłują obrócić cewkę wokół jej osi co na ramieniu $d/2$ prowadzi do powstania momentu napędowego:

$$M = 2 \cdot F \cdot \frac{d}{2} = z \cdot B \cdot I \cdot l \cdot d \tag{4}$$

Moment napędowy równoważony jest przez moment zwracający wytworzony przez sprężyny spiralne, który jest proporcjonalny do kąta obrotu φ ustroju ruchomego, oraz stałej sprężyny k:

$$M_z = \varphi \cdot k \tag{5}$$

Cewka, a tym samym wskazówka miernika ustawia się w położeniu, w którym oba momenty równoważą się:

$$M = M_z \tag{6}$$

skąd po podstawieniu można wykazać, że:

$$\varphi = \frac{z \cdot B \cdot I \cdot l \cdot d}{k} = c \cdot I \tag{7}$$

Ze wzoru (7) wynika więc, że kąt wychylenia organu ruchomego jest proporcjonalny do prądu płynącego przez cewkę. Przy zmianie zwrotu prądu zmienia się również zwrot momentu napędowego i wskazówka wychyla się w stronę przeciwną.

Pamiętaj!

Miernik magnetoelektryczny jest typowym miernikiem prądu stałego reagującym na zwrot przepływu prądu, czyli na biegunowość włączenia. Z tego powodu zaciski mierników magnetoelektrycznych są oznaczone symbolami biegunów dodatniego i ujemnego.

W przypadku włączenia miernika magnetoelektrycznego w obwód prądu okresowo zmiennego, kierunek sił działających na cewkę, a tym samym kierunek momentu napędowego zmienia się proporcjonalnie do wartości chwilowej natężenia prądu. Ze względu na dużą bezwładność mechaniczną organu ruchomego miernika (okres drgań własnych 0,2 – 2 s), przyjmuje on położenie odpowiadające wartości średniej momentu. Na przykład, przy przepływie przez miernik sieciowego prądu przemiennego o częstotliwości 50Hz, wartość średnia momentu napędowego jest równa zero i wskazówka nie wychyla się. Jeżeli jednak prąd przemienny ma składową stałą, to wskazanie miernika będzie równe wartości tej składowej.

Pamiętaj!

Miernik magnetoelektryczny włączony w obwód prądu okresowo zmiennego mierzy wartość średnią natężenia prądu.

Mierniki o ustroju magnetoelektrycznym są budowane jako amperomierze, woltomierze i omomierze. Ze względu na małe wymiary i masę organu ruchomego dopuszczalny prąd płynący przez cewkę nie przekracza kilkunastu miliamperów. Do pomiaru większych natężeń prądu należy stosować boczniki (Chwaleba, Poniński i Siedlecki 2000).

Przedstawiony opis dotyczy miernika magnetoelektrycznego o **ruchomej cewce**, gdyż takie mierniki występują najczęściej. Należy jednak pamiętać, że budowane są również mierniki o **ruchomym magnesie**.

3. Przyrządy cyfrowe – pojęcia podstawowe

Pierwsze przyrządy cyfrowe były budowane z przeznaczeniem do pomiaru konkretnej wielkości fizycznej; np. napięcia lub rezystancji. Jednak już w latach 70-ch XX wieku, intensywny rozwój elektroniki półprzewodnikowej, a w szczególności układów cyfrowych pozwolił na integrację rożnych funkcji w jednym urządzeniu. **Multimetrami** nazywa się uniwersalne, wielofunkcyjne przyrządy pomiarowe umożliwiające pomiar kilku wielkości fizycznych. Od momentu pojawienia się multimetrów na rynku ich ekspansja w różnych dziedzinach techniki jest bardzo duża i trwa do dziś. Obecnie producenci prześcigają się pomysłowością, szybkością działania i dokładnością pomiarów oferując pełną gamę multimetrów cyfrowych. Ich popularność sprawia, że w potocznym rozumieniu terminem multimetr określa się również przyrząd cyfrowy przeznaczony do pomiaru tylko jednej wielkości. Przyrządy cyfrowe możemy podzielić na:

- tablicowe,
- przenośne przyrządy uniwersalne,
- dokładne przyrządy laboratoryjne,
- wirtualne przyrządy pomiarowe.



Rysunek 3 Multimetr cyfrowy.

Cyfrowe przyrządy tablicowe wykorzystuje się głównie do kontroli wartości danej wielkości fizycznej. Są budowane jako woltomierze, amperomierze, lub umożliwiają pomiar obydwu tych wielkości. Wynik pomiaru przyrządem tablicowym obarczony jest dużą niepewnością, jednak jest ona mniejsza niż w przypadku tablicowych przyrządów analogowych. Wynik pomiaru wyświetlany jest w postaci numerycznej. Coraz częściej można również spotkać tablicowe przyrządy cyfrowe symulujące ruch wskazówki analogowej. **Przenośne przyrządy uniwersalne** o wewnętrznym zasilaniu, są przeznaczone do pomiarów wykonywanych w terenie. Zazwyczaj budowane są jako multimetry co

znacznie zwiększa ich uniwersalność. Niepewność pomiaru multimetrem przenośnym plasuje się pośrodku stawki przyrządów cyfrowych. Odrębną klasę stanowią **mierniki laboratoryjne**. Cechuje je bardzo mała niepewność pomiaru nawet poniżej 0,0001%. Wymagają stacjonarnego trybu pracy w ustalonych warunkach otoczenia i są zasilane z sieci elektrycznej. Przyrządy laboratoryjne są budowane jako multimetry, oraz mierniki o konkretnym przeznaczeniu, np.: częstościomierze, mostki RLC, kalibratory napięć, itp. Inną grupę nowoczesnych przyrządów pomiarowych stanowią tak zwane **wirtualne przyrządy pomiarowe**, które są kombinacją komputera wyposażonego w odpowiednie oprogramowanie z przyrządami pomiarowymi nowej generacji (np. karty pomiarowe). Przyrząd wirtualny może być budowany przez użytkownika, który definiuje jego funkcje i interfejs konstruując odpowiedni program.

Podana klasyfikacja jest bardzo ogólna i nie obejmuje przyrządów przeznaczonych do ściśle określonych zadań. Na przykład dla przemysłu motoryzacyjnego budowane są multimetry samochodowe, do pomiarów linii telefonicznych multimetry telekomunikacyjne, do pracy w trudnych warunkach, np. pod ziemią multimetry górnicze, a do obserwacji kształtu sygnałów multimetry graficzne.

Ze względu na zdolność do programowania multimetry dzielimy na nieprogramowalne i programowalne. Multimetry **nieprogramowalne** charakteryzują się ograniczonym, ustalonym przez producenta zbiorem funkcji pomiarowych, tak jak np.: większość przenośnych mierników uniwersalnych. Multimetry **programowalne** zawierają w strukturze systemy mikroprocesorowe i dzięki temu mogą wypełniać wiele funkcji pomiarowych, które programowane są przez użytkownika za pomocą zewnętrznej klawiatury. Dzięki temu multimetr programowalny może realizować np. wykonywanie złożonych procedur pomiarowych, agregację i analizę danych, filtrację cyfrową mierzonych sygnałów i wiele innych. Cyfrowe multimetry programowalne są zazwyczaj przewidziane do podłączenia do systemu pomiarowego za pośrednictwem odpowiedniego interfejsu, np. GPIB, RS-232C, USB. Interfejs służy nie tylko do przesyłania danych pomiarowych do urządzenia nadrzędnego, ale również do sterowania pracą multimetru.

Do podstawowych parametrów multimetrów należy zaliczyć liczbę cyfr znaczących, rozdzielczość (czułość) oraz niepewność pomiaru, która będzie omówiona w dalszej części instrukcji.

Liczba cyfr znaczących oznacza ile pełnych cyfr (z zakresu od 0 do 9) może być pokazanych na wyświetlaczu miernika. Dodatkowe oznaczenie ułamkowe w postaci ½ lub ¾ oznacza, że na najbardziej znaczącej pozycji wyświetlacza może pojawić się cyfra z zakresu 0 do 1 lub 0 do 3.

Przykład 2: W mierniku cyfrowym o liczbie cyfr znaczących 4½, najbardziej znacząca pozycja wyświetlacza może przyjmować wartości 0 lub 1, a pozostałe 0, 1, … , 9. Innymi słowy maksymalne wskazanie multimetru o 4½ cyfry wynosi 19999.

W przypadku miernika 4¾, najbardziej znacząca pozycja wyświetlacza może przyjmować wartości 0, 1, 2, 3, a pozostałe 0, 1, … , 9, tym samy maksymalne wskazanie wynosi 39999.

Oznaczenia ułamkowe nie mają niestety jednoznacznej interpretacji. W nowych przyrządach laboratoryjnych dodatkowe „pół cyfry" wynika z możliwości przekroczenia zakresu pomiarowego o 20%. Na przykład, największa liczba zapisana za pomocą 4 cyfr to 9999, co daje 10000 kombinacji liczb (od 0 do 9999). Zakres 10000 można przekroczyć o 20% czyli o 2000. Zatem maksymalne wskazanie multimetru 4½ cyfry wynosi 9999+2000 czyli 11999. Analogicznie maksymalne wskazanie multimetru 6½ to 1199999.

Rozdzielczość miernika cyfrowego to najmniejsza wartość jaka może być wyświetlona na danym zakresie pomiarowym i odpowiada najmniej znaczącej cyfrze wyświetlacza. Często definicja ta jest rozumiana jako iloraz najmniejszej wartości jaka może być wyświetlona na danym zakresie do wartości tego zakresu. Stąd rozdzielczość może być również rozumiana jako odwrotność maksymalnego wskazania i może być wyrażona w procentach, bitach lub ppm (częściach milionowych).

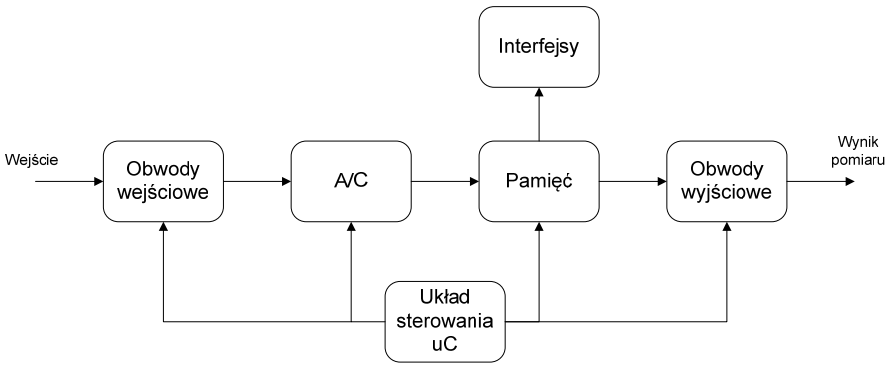
Przykład 3: multimetr 4½ może znajdować się w 12000 stanach (0 do 11999) zatem jego rozdzielczość wynosi 0.01%, 100ppm lub 14 bitów (2^13 + bit znaku).

Z rozdzielczością związana jest **czułość** przyrządu, która wyraża jego zdolność do reagowania na najmniejszą zmianę wielkości mierzonej. Czułość jest podawana w jednostkach wielkości mierzonej.

Przykład 4: multimetr 6½ cyfry na zakresie pomiarowym 1V ma czułość 1μV. Taką samą czułość ma również multimetr 4½ cyfry na zakresie 10 mV.

3.1 Struktura multimetru

Na rysunku 4 przedstawiono schemat blokowy przyrządu cyfrowego (Tumański 2007). Funkcja **obwodów wejściowych** zmienia się w zależności od funkcji realizowanej przez multimetr. W przypadku woltomierza, obwody wejściowe to **dzielniki napięcia**, a w amperomierzu to **boczniki prądu**. Obwody te umożliwiają zmianę zakresu pomiarowego. Jeżeli multimetr pracuje jako omomierz, zadaniem obwodów wejściowych jest zapewnienie odpowiedniego zasilania badanej rezystancji.

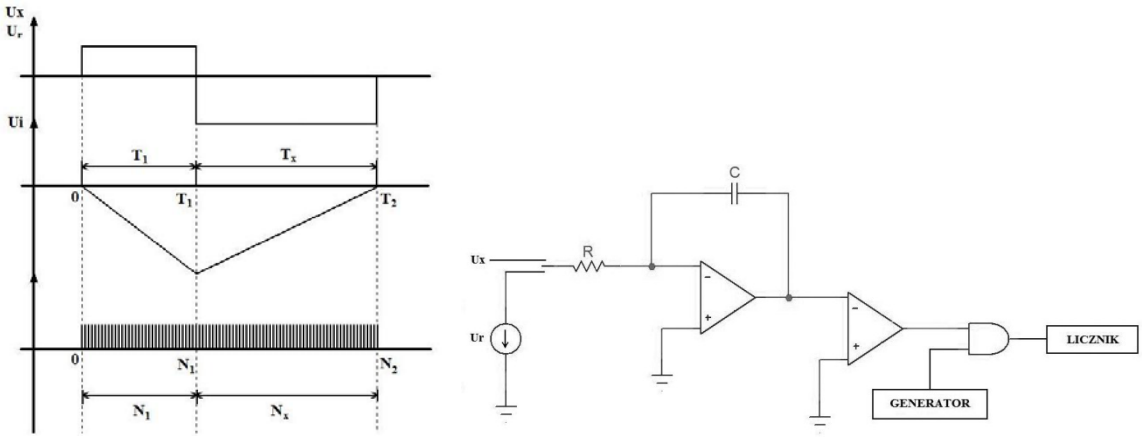


Rysunek 4 Struktura multimetru cyfrowego.

Rolą **układu sterowania** jest nadrzędne zarządzanie procesem pomiaru, a więc między innymi: automatyczny dobór zakresu, wyzwalanie cyklu pomiarowego, zapisywanie wyniku do pamięci. Niekiedy droższe przyrządy są wyposażone w **interfejsy** umożliwiające włączenie multimetru w strukturę większego systemu pomiarowego, np.: GPIB, RS-232C, USB. Sercem każdego przyrządu cyfrowego jest **przetwornik analogowo – cyfrowy**.

3.2 Pomiar napięcia stałego – przetwornik A/C z podwójnym całkowaniem

Praktycznie w każdym multimetrze ogólnego przeznaczenia do pomiaru napięcia stałego stosuje się **przetworniki integracyjne**. O ile w prostych multimetrach uniwersalnych są to przetworniki o podwójnym całkowaniu, o tyle w dokładnych przyrządach laboratoryjnych stosuje się metody całkowania wielokrotnego. Na rysunku 5, przedstawiono schemat blokowy przetwornika z podwójnym całkowaniem, oraz przebiegi czasowe.



Rysunek 5 Zasada działania przetwornika z podwójnym całkowaniem.

Przetwornik taki działa w **dwóch cyklach**. W pierwszym cyklu na wejście układu całkującego podawane jest napięcie mierzone U_x przez ściśle określony czas T_1, który wyznaczony jest przez liczbę impulsów N_1 generowanych z częstotliwością f_g. Napięcie po scałkowaniu wynosi:

$$U_i = \frac{1}{R \cdot C} \cdot \int_0^{T_1} U_x \cdot dt = \frac{T_1}{R \cdot C} \cdot U_x = \frac{N_1}{R \cdot C \cdot f_g} \cdot U_x \qquad (8)$$

W drugim cyklu pomiarowym na wejście integratora doprowadza się napięcie odniesienia o określonej wartości U_r lecz przeciwnej polaryzacji niż U_x. Licznik zlicza impulsy po raz drugi do chwili, kiedy komparator wykryje, że wartość napięcia U_i wynosi zero:

$$U_i = \frac{1}{R \cdot C} \cdot \int_{T_1}^{T_2} (-U_r) \cdot dt = -\frac{T_2 - T_1}{R \cdot C} \cdot U_r = -\frac{N_2 - N_1}{R \cdot C \cdot f_g} \cdot U_r \quad (9)$$

Przyjmując, że $T_x = T_2 - T_1$ oraz $N_x = N_2 - N_1$ otrzymujemy:

$$U_i = -\frac{N_x}{R \cdot C \cdot f_g} \cdot U_r \quad (10)$$

Skąd po porównaniu powyższych wyrażeń mamy:

$$N_x = -\frac{N_1}{U_r} \cdot U_x \quad (11)$$

Liczba zmierzonych impulsów N_x w drugim cyklu pomiarowym, jest proporcjonalna do wartości (średniej) napięcia mierzonego U_x w czasie T_1, liczby impulsów N_1 (którą możemy ustalić precyzyjnie) oraz do wartości napięcia wzorcowego U_r, które znamy. Zaletą metody jest to, że N_x **nie zależy** od wartości elementów R i C ani od częstotliwości generatora. Ponadto ważną cechą przetwarzania integracyjnego jest **duża odporność na zakłócenia przemienne** o okresie równym czasowi całkowania T_1 (lub jego podwielokrotności), które mogą wystąpić w mierzonym napięciu U_x. Ponieważ podstawowym źródłem zakłóceń jest sieć zasilająca, czas T_1 dobiera tak, aby był równy okresowi napięcia sieci zasilającej (w Europie 20 ms, a w USA 16 ms) lub całkowitej wielokrotności tego okresu. W ten sposób zyskujemy eliminację trudnych do usunięcia zakłóceń o częstotliwości sieci, gdyż wartość średnia takiego napięcia za okres wynosi zero. Jednocześnie jednak taki dobór czasu całkowania wydłuża proces przetwarzania A/C co należy uznać za wadę metody. Skrócenie czasu całkowania jest możliwe poprzez zastosowanie metody wielokrotnego całkowania. Dokładny opis takich przetworników można znaleźć w każdym podręczniku do metrologii, np. w (Chwaleba, Poniński i Siedlecki 2000), (Tumański 2007), (Piotrowski 1997).

3.3 Pomiar napięcia zmiennego

W przypadku pomiarów sygnałów przemiennych w czasie podstawowym parametrem mierzonym jest **wartość skuteczna**. Stąd w torze pomiaru napięć lub prądów przemiennych występuje przetwornik **AC/DC**, na wyjściu którego występuje sygnał o wartości proporcjonalnej do wartości skutecznej sygnału mierzonego.

W multimetrach starszego typu stosowano przetworniki, które mierzyły **wartość średnią wyprostowaną sygnału, ale wyskalowane były w wartościach skutecznych**. W takim przypadku poprawny pomiar był możliwy jedynie dla sygnału sinusoidalnie zmiennego, dla którego znana jest wartość współczynnika kształtu łączącego ze sobą wartość skuteczną z wartością średnią sygnału:

$$U_{sk} = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot U_{sr} \cong 1{,}11 \cdot U_{sr} \quad (12)$$

Przy pomiarach sygnałów o kształtach różnych od sinusoidy metoda ta wprowadza błąd, który jest proporcjonalny do różnicy między współczynnikiem kształtu danego sygnału, a sygnału sinusoidalnego. Na przykład, jeżeli sygnał ma kształt trójkątny to pomiar wartości skutecznej miernikiem z przetwornikiem wartości średniej wyprostowanej jest obarczony błędem równym 5.5%, a dla sygnału prostokątnego błędem 11%.

Rzadziej można spotkać multimetry, które realizują pomiar wartości skutecznej w oparciu o jej **interpretację fizyczną, która mówi, że** (Bolkowski 1998): *wartością skuteczną prądu okresowego nazywamy taką wartość prądu stałego, który przepływając przez niezmienną rezystancję R w czasie okresu T, spowoduje wydzielenie na tej rezystancji takiej samej ilości ciepła, co prąd okresowo zmienny w tym samym czasie.* Przetworniki wykorzystujące zjawiska cieplne prądu elektrycznego należą do najdokładniejszych przetworników wartości skutecznej, jednak ich zastosowanie jest ograniczone ze względu na wysoką cenę.

W nowoczesnych multimetrach pomiar wartości skutecznej jest realizowany w oparciu o **definicję**:

$$U_{sk} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T u^2(t) \cdot dt} \tag{13}$$

Jest to możliwe dzięki monolitycznym wzmacniaczom operacyjnym, które na drodze operacji matematycznych na sygnale analogowym realizują definicyjne wyznaczanie wartości skutecznej według wzoru (13). Sygnał wyjściowy takich przetworników jest proporcjonalny do wartości skutecznej sygnału wejściowego, w szerokim zakresie odkształceń tego sygnału od sinusoidy. Przyrządy z przetwornikami działającymi w oparciu o definicję wartości skutecznej (a nie wartość średnią wyprostowaną!) oznacza się symbolem **„TrueRMS" (True Root Mean Square)** dla podkreślenia, że mierzą prawdziwą wartość skuteczną sygnałów o różnych kształtach.

Należy jednak pamiętać, że termin TrueRMS odnosi się wyłącznie do rodzaju zastosowanego przetwornika i nie ma związku z **rodzajem sprzężenia na wejściu przyrządu**, tzn. eliminacją składowej stałej. Ponieważ w multimetrach laboratoryjnych obwody wejściowe torów prądu przemiennego AC, są zwykle oddzielone od wejścia kondensatorem, to przyrządy te umożliwiają pomiar wartości skutecznej sygnałów bez składowej stałej. Wyznaczenie wartości skutecznej sygnału zmiennego ze składową stałą wymaga, wykonania **dwóch** niezależnych pomiarów, **dla prądu stałego DC i przemiennego AC**. W takim przypadku wartość skuteczną oblicza się według zależności:

$$U_{AC+DC} = \sqrt{U_{AC}^2 + U_{DC}^2} \tag{14}$$

Jeżeli przyrząd posiada oznaczenie **TrueRMS AC+DC**, to mierzy poprawnie wartość skuteczną sygnału ze składową stałą. Funkcję taką realizuje coraz więcej nowoczesnych multimetrów laboratoryjnych.

Pamiętaj!

W starszych multimetrach lub takich, które nie posiadają oznaczenia TrueRMS może być zastosowany przetwornik wartości średniej wyprostowanej. W takim przypadku należy zachować szczególną ostrożność przy pomiarze wartości skutecznej sygnałów innych niż sinusoidalne.

Jeżeli multimetr posiada oznaczenie TrueRMS, to mierzy on poprawnie wartość skuteczną sygnałów o dowolnym kształcie bez składowej stałej. Uwzględnienie tej składowej w pomiarze wymaga zastosowania procedury opisanej powyżej i wzoru (14).

Jeżeli multimetr posiada oznaczenie TrueRMS AC+DC oznacza to, że mierzy on poprawnie wartość skuteczną sygnałów o dowolnym kształcie i składowej stałej.

Szczegółowych informacji na temat pomiaru wartości skutecznej sygnału należy szukać w instrukcji obsługi przyrządu. Nie można sugerować się jedynie oznaczeniami na obudowie!

Obecnie mierniki cyfrowe poprawnie wskazują wartość skuteczną sygnałów o współczynniku szczytu do 5 (współczynnik szczytu to stosunek wartości szczytowej do skutecznej sygnału i charakteryzuje stopień odkształcenia sygnału od sinusoidy).

4. Przyczyny błędów i niepewności pomiarowych

Otrzymany na drodze doświadczalnej wynik pomiaru dowolnej wielkości fizycznej zawsze różni się od wartości rzeczywistej tej wielkości. Wartość rzeczywista jest pojęciem abstrakcyjnym i nie jest znana eksperymentatorowi (gdyby była znana to pomiar byłby niepotrzebny). Pomiar pozwala zatem na znalezienie przybliżonych wartości wielkości mierzonej, a więc każdy wynik pomiaru obarczony jest niepewnością, która wynika z:

- ograniczonej dokładności przyrządów pomiarowych,
- ograniczeń wynikających z zastosowanej metody pomiarowej,
- niedoskonałości zmysłów obserwatora,
- wpływu innych czynników, które zakłócają pomiar.

Ograniczona dokładność przyrządów pomiarowych wynika z właściwości materiałów użytych do ich budowy, niedoskonałości wykonania elementów składowych i niedokładności wzorcowania. Nie istnieją więc idealne przyrządy pomiarowe, a jedynie takie które posiadają ograniczoną dokładność charakteryzowaną przez błąd graniczny Δ_{gr}. **Błąd graniczny** wyznacza największą wartość błędu wskazania, jaka może wystąpić w dowolnym punkcie zakresu pomiarowego przyrządu w przypadku jego poprawnego użytkowania w warunkach odniesienia. Do najważniejszych parametrów

charakteryzujących **warunki odniesienia** należy zaliczyć: temperaturę, ciśnienie, wilgotność, brak wstrząsów, wibracji i innych zakłóceń (np. elektromagnetycznych).

Ograniczenia wynikające z zastosowanej metody pomiarowej wynikają przede wszystkim z oddziaływania przyrządów pomiarowych na wielkość mierzoną lub zjawisko będące źródłem tej wielkości i są nazywane **błędem metody**. Przykładem może być włączenie amperomierza co zmienia rozkład prądów i napięć w badanym obwodzie lub zainstalowanie termometru, który zmienia rozkład pola temperaturowego.

Niedoskonałość zmysłów obserwatora powoduje wprowadzenie dodatkowych błędów tam gdzie wynik pomiaru jest oceniany za pomocą zmysłów, np.: położenie wskazówki między dwiema działkami podziałki, natężenie dźwięku oceniane za pomocą słuchu, barwa lub temperatura światła oceniana na podstawie obserwacji wzrokowej.

Do **innych czynników zakłócających pomiar** zazwyczaj zaliczamy zakłócenia o charakterze losowym, a więc takie których wpływu na wynik pomiaru nie da się przewidzieć.

O końcowej niepewności pomiaru decydują błędy graniczne, błędy metody oraz błędy dodatkowe, które zostały scharakteryzowane powyżej. Jeżeli jednak pomiar zostanie wykonany starannie w warunkach odniesienia, a błędy metody zostaną wyeliminowane poprzez wprowadzenie odpowiednich poprawek lub odpowiedni dobór przyrządów, to na końcową niepewność pomiaru główny wpływ ma błąd graniczny miernika.

Obliczanie niepewności pomiaru jest oparte o teorię niepewności, która zakłada, że błąd pomiaru ma cechy zdarzenia losowego, a więc podlega prawom statystyki. Inaczej mówiąc każdemu pomiarowi można przyporządkować prawdopodobieństwo wystąpienia błędu o określonej wartości i przypisać funkcję gęstości prawdopodobieństwa. W przeważającej liczbie przypadków uzasadnione jest założenie, że rozkład błędów dla przyrządów pomiarowych ma kształt prostokątny.

Zapamiętaj!

Obliczanie końcowej niepewności pojedynczego pomiaru bezpośredniego składa się z dwóch etapów:

Obliczenie błędu granicznego Δ_{gr} wynikającego z danych technicznych przyrządu pomiarowego,

Obliczenie niepewności standardowej u_b (nazywanej również niepewnością typu B) na podstawie obliczonego wcześniej błędu granicznego, przyjętego rozkładu tego błędu i dla założonego poziomu ufności p.

Obliczona niepewność wyznacza przedział, w którym z danym prawdopodobieństwem mieści się rzeczywista wartość wielkości mierzonej.

Wynik pomiaru wraz z oszacowaną niepewnością zapisujemy w następujący sposób:

$X=x\pm u_b$ *dla poziomu ufności p=…..*

Wynik pomiaru bez podanej niepewności jest bezwartościowy!

4.1 Błąd graniczny pomiaru przyrządem analogowym

Wyznaczanie błędów i/lub niepewności pomiarowych jest zagadnieniem złożonym i zostanie szczegółowo omówione w ćwiczeniu numer 2. W tym miejscu zostaną przedstawione jedynie te informacje, które są niezbędne do wyznaczenia błędów granicznych pomiarów bezpośrednich z wykorzystaniem przyrządów analogowych. W punkcie 4.2 zostanie omówione wyznaczanie błędów granicznych dla przyrządów cyfrowych.

Wartość błędu pomiaru przyrządem analogowym zależy od jego klasy dokładności *K* oraz zakresu pomiarowego *Z*. Przez **wskaźnik klasy dokładności** miernika analogowego należy rozumieć liczbę, która wyraża procentowy stosunek wartości bezwzględnego błędu granicznego Δ_{gr} do wartości zakresu pomiarowego:

$$K = \frac{\Delta_{gr}}{Z} \cdot 100 \tag{16}$$

Z powyższego wzoru wynika, że bezwzględny błąd pomiaru miernika w warunkach odniesienia, wyrażony w procentach wartości zakresu, dla żadnej wartości wielkości mierzonej w zakresie pomiarowym nie powinien przekraczać wskaźnika klasy dokładności. Dla przyrządów wskazówkowych rozróżnia się kilka klas dokładności, a najczęściej spotykane to: 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; przy czym im większy wskaźnik klasy dokładności tym większy błąd pomiaru. Przekształcając powyższy wzór, uzyskujemy zależność na obliczenie **bezwzględnego błędu granicznego**:

$$\Delta_{gr} = \frac{K \cdot Z}{100} \tag{17}$$

Warto zauważyć, że bezwzględny błąd graniczny przyjmuje stałą wartość, niezależnie od wartości mierzonej. **Względny błąd graniczny** obliczamy natomiast z zależności:

$$\delta_{gr} = \frac{\Delta_{gr}}{x} \cdot 100 \tag{18}$$

gdzie *x* jest wartością zmierzoną. Z powyższej zależności wynika, że względny błąd graniczny pomiaru maleje wraz ze zwiększaniem wychylenia wskazówki. Z tego powodu zaleca się taki dobór zakresu pomiarowego, aby wychylenie wskazówki zawsze zawierało się w części podziałki powyżej ½ zakresu.

Pamiętaj!

Bezwzględny błąd graniczny pomiaru miernikiem analogowym jest stały w całym zakresie pomiarowym i zależy od klasy przyrządu i zakresu pomiarowego. Względny błąd graniczny, który jest stosunkiem błędu granicznego do wartości mierzonej, maleje wraz ze wzrostem tej wartości. Z tego powodu zakres przyrządu należy dobrać w taki sposób, aby wychylenie wskazówki znajdowało się w części podziałki powyżej ½ zakresu.

Przykład:
Woltomierzem o zakresie pomiarowym *Zu*=150 V i wskaźniku klasy 0,5 zmierzono napięcia 15V, 75V, 150V. Oblicz błędy graniczne pomiarów.

Bezwzględny błąd graniczny nie zależy od wartości zmierzonej i dla zakresu pomiarowego 150V wynosi:

$$\Delta_{gr}U = \frac{K \cdot Z_u}{100} = \frac{0{,}5 \cdot 150}{100} = 0.75\,\mathrm{V} = const$$

Względne błędy graniczne dla poszczególnych pomiarów wynoszą:

Dla U=150 V (pełny zakres pomiarowy) $\delta_{gr}U = \frac{\Delta_{gr}U}{U} \cdot 100 = \frac{0{,}75}{150} \cdot 100 = 0{,}5\%$

Dla U=75 V (połowa zakresu pomiarowego) $\delta_{gr}U = \frac{0{,}75}{75} \cdot 100 = 1{,}0\%$

Dla U=15 V (jedna dziesiąta zakresu pomiarowego) $\delta_{gr}U = \frac{0{,}75}{15} \cdot 100 = 5{,}0\%$

Zwróćmy uwagę: Dla wskazania 150V względny błąd graniczny jest równy wskaźnikowi klasy dokładności, jednak dla wskazania 75V błąd ten jest dwa razy większy, a dla 15V dziesięć razy większy niż wskaźnik klasy.

4.2 Błąd graniczny pomiaru przyrządem cyfrowym

Nieco odmiennie oblicza się błąd graniczny pomiaru przyrządem cyfrowym. W zależności od producenta przyrządu dokładność pomiaru może być wyrażana na dwa sposoby. **Pierwszy sposób** zapisu błędu przyrządu cyfrowego przedstawia wyrażenie:

$$(a\%\,wskazania + b\%\,zakresu) \tag{19}$$

Błąd jest zatem wyrażany za pomocą sumy dwóch składowych: procentu wartości wskazanej x oraz procentu zakresu pomiarowego Z_x. Współczynniki procentowe a i b są podawane przez producenta w dokumentacji technicznej przyrządu. Wzory obliczeniowe na błędy graniczne (bezwzględny i względny) mają postać:

$$\Delta_{gr} = \frac{a \cdot x + b \cdot Z_x}{100} \tag{20}$$

$$\delta_{gr} = a + b \cdot \frac{Z_x}{x} \tag{21}$$

Przykład:

Multimetrem Rigol DM3051 zmierzono napięcie stałe na zakresie 40V. Wskazanie wyniosło U=12,451V. Dokładność przyrządu podano w formacie (a% odczytu + b% zakresu). Odczytane z dokumentacji technicznej przyrządu współczynniki procentowe dla zakresu 40V wynoszą: a=0,025; b=0,006, a obliczone błędy graniczne odpowiednio:

$$\Delta_{gr}U = \frac{a \cdot U + b \cdot Z}{100} = \frac{0{,}025 \cdot 12{,}451 + 0{,}006 \cdot 40}{100} \cong 0{,}005V$$

$$\delta_{gr}U = a + b \cdot \frac{Z}{U} = 0{,}025 + 0{,}006 \cdot \frac{40}{12{,}451} \cong 0{,}04\%$$

Drugi sposób zapisu błędu z jakim można się spotkać w praktyce ma postać:

$$(a\%\, wskazania + n\, LSB) \tag{22}$$

Składnik n LSB (least significant bit) jest to wartość wynikająca z n-krotnego zwielokrotnienia rozdzielczości przyrządu cyfrowego. Przypomnijmy, że przez rozdzielczość przyrządu cyfrowego rozumiemy najmniejszą wartość jaka może być wyświetlona na danym zakresie pomiarowym. W takim przypadku wzory obliczeniowe na błędy graniczne przyjmują postać:

$$\Delta_{gr} = \frac{a \cdot x}{100} + n \cdot LSB \tag{23}$$

$$\delta_{gr} = a + n \cdot \frac{LSB}{x} \cdot 100 \tag{24}$$

Przykład:

Wykonano podobny pomiar jak w poprzednim przykładzie, jednak zastosowano Multimetr GwInstek GDM-8251A. Zakres pomiarowy wyniósł 100V, a wskazanie U=12,453V. Producent podał dokładność przyrządu w formacie (a% odczytu + n LSB), gdzie a=0,012%, n=5. Dla wykonanego pomiaru rozdzielczość wyniosła: 1mV. Błędy graniczne wynoszą odpowiednio:

$$\Delta_{gr}U = \frac{a \cdot U}{100} + n \cdot LSB = \frac{0{,}012 \cdot 12{,}453}{100} + 5 \cdot 0{,}001 \cong 0{,}006V$$

$$\delta_{gr}U = a + n \cdot \frac{LSB}{U} \cdot 100 = 0{,}012 + 5 \cdot \frac{0{,}001}{12{,}453} \cdot 100 \cong 0{,}05\%$$

Bibliografia

Bolkowski, Stanisław. *Teoria obwodów elektrycznych.* Warszawa: Wydawnictwa Naukowo - Techniczne, 1998.

Chwaleba, Augustyn, Maciej Poniński, i Andrzej Siedlecki. *Metrologia elektryczna.* Warszawa: WNT, 2000.

Kurdziel, Roman. *Elektrotechnika.* Warszawa: PWN, 1973.

Piotrowski, Janusz. *Podstawy miernictwa.* Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 1997.

Polska Norma „PN-92/E-06501/01."

Tumański, Sławomir. *Technika Pomiarowa.* Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne , 2007.