

Pomiary wielkości elektrycznych multimetrami cyfrowymi

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie podstawowych właściwości podręcznych i laboratoryjnych multimetrów cyfrowych ogólnego zastosowania.

2. Wprowadzenie

2.1. Charakterystyka multimetrów

Multimetry są to przyrządy pomiarowe służące do pomiaru kilku wielkości. Zestaw wielkości pozwala zwykle na zastosowanie multimetru w wydzielonym obszarze prac inżynierskich lub naukowych. Ze względu na dokładność pomiaru i wiele innych zalet wyraźną przewagę od początku lat 70-tych zdobyły multimetry cyfrowe, jakkolwiek multimetry analogowe w pewnych zastosowaniach nadal się utrzymują. Od czasu gdy w 1975 roku pojawiły się na rynku pierwsze modele multimetrów mikroprocesorowych obserwuje się intensywny rozwój tej grupy przyrządów. Dzisiejsza oferta producentów - to pełna gama modeli prześcigających się pomysłowością rozwiązań, obszarem pomiarowym, szybkością i dokładnością pomiarów, etc.

Podstawowe podziały klasyfikacyjne multimetrów wiążą się z ich strukturą wewnętrzną oraz z cechami ergonomicznymi. I tak można wyróżnić multimetry z przetwornikami analogowo-cyfrowymi integracyjnymi (dość rozbudowane układy kondycjonowania sygnałów po stronie analogowej, proste przetwarzanie po stronie cyfrowej) oraz multimetry z przetwornikami analogowo-cyfrowymi próbkującymi (proste układy kondycjonowania, dość złożone przetwarzanie po stronie cyfrowej). Drugi bardzo widoczny podział, to podział na multimetry podręczne (z reguły o wewnętrznym zasilaniu bateryjnym) i multimetry laboratoryjne (z reguły wyposażone w bogate możliwości współpracy systemowej).

Równolegle postępuje proces wyodrębniania się z grupy multimetrów ogólnego zastosowania multimetrów przeznaczonych do zadań ściślej określonych. I tak np. dla elektrotechniki motoryzacyjnej mamy multimetry samochodowe (ang. vehicle multimeters), do badania układów cyfrowych - multimetry sygnaturowe (ang. signature multimeters), do badania telefonicznych linii abonenckich - multimetry telekomunikacyjne (ang. subscriber's line multimeters), do obserwacji kształtu przebiegów czasowych sygnałów - multimetry graficzne - skopometry (ang. graphical multimeters - scopometers).

Zastosowanie mikroprocesorów w wewnętrznej strukturze multimetru pozwoliło na realizację wielu funkcji tzw. sztucznej inteligencji. Wiąże to się z takimi właściwościami jak np. automatyczne wykonywanie złożonych procedur pomiarowych wymagających podejmowania decyzji na podstawie kolejno otrzymywanych wyników pomiarów pośrednich i posługiwania się pamięcią. Miarą tej "inteligencji" jest przede wszystkim łatwość obsługi i programowania pracy przyrządu oraz obszar realizowanych procedur. Realizacja adaptacyjnych algorytmów pomiaru, poważne ograniczenie wpływu czynników pasożytniczych na wyniki pomiarów, zwiększenie niezawodności, możliwość pracy systemowej w różnych standardach interfejsów - wszystko to sprawia, że multimetry stanowią dziś najlepszy przykład współczesnych osiągnięć techniki pomiarowej.

Dalszy ich rozwój prowadzi, z jednej strony, do wytwarzania przyrządów na tyle wielofunkcyjnych, że słowo multimetr wydaje się za słabe by wyrazić podstawową cechę ich stosowania. Tu pojawiają się takie określenia i nazwy jak wymienione już wyżej skopometry, czy nawet ostatnio - kombajny pomiarowe. Z drugiej jednak strony duże możliwości zwielokrotniania funkcji poprzez sprzężenie multimetru z komputerem typu „notebook” za pomocą prostego interfejsu USB i rozrastające się środowiska programowe obsługujące wirtualizację pomiarów powodują, że ewolucja przebiega drugą, równoległą ścieżką. Zwolennicy tego drugiego nurtu stawiają na przerzucenie „ile się da” funkcji multimetru na komputer i sprzyjające użytkownikowi oprogramowanie. Pozwala to na duże oszczędności w sferze kosztów i jednocześnie wzrost elastyczności zastosowań. Ta druga ścieżka ma wszakże dość słabo rozwiązany problem okresowego wzorcowania takich przyrządów. Procedury auto-kalibracji i auto-testowania wprawdzie znacznie usprawniają ich funkcjonowanie, ale nie rozwiązują problemu spójności pomiarowej z wzorcami państwowymi. Laboratoria wzorcujące i producenci sprzętu do wzorcowania (chodzi tu głównie o kalibratory) starają się nadążnie dostosowywać swoje usługi i produkty do obu wymienionych nurtów ewolucji, ale ten drugi sprawia im dużo większe kłopoty. Użytkownicy przemysłowi przedkładają z reguły produkty pierwszego nurtu. Zwolennikami drugiego są głównie użytkownicy z instytutów zajmujących się badaniami naukowymi i indywidualni hobbysci.

2.2. Funkcje pomiarowe

W tabeli 1 zamieszczono zestaw podstawowych funkcji pomiarowych dostępnych w praktycznie każdym multimetrze ogólnego przeznaczenia. Uzupełnieniem funkcji podstawowych jest zestaw funkcji związanych z pracą systemową multimetru i przetwarzaniem wyników pomiarów (tabela 2). Funkcje te są dostępne przede wszystkim w multimetrach laboratoryjnych.

Tabela 1 Funkcje pomiarowe podstawowe

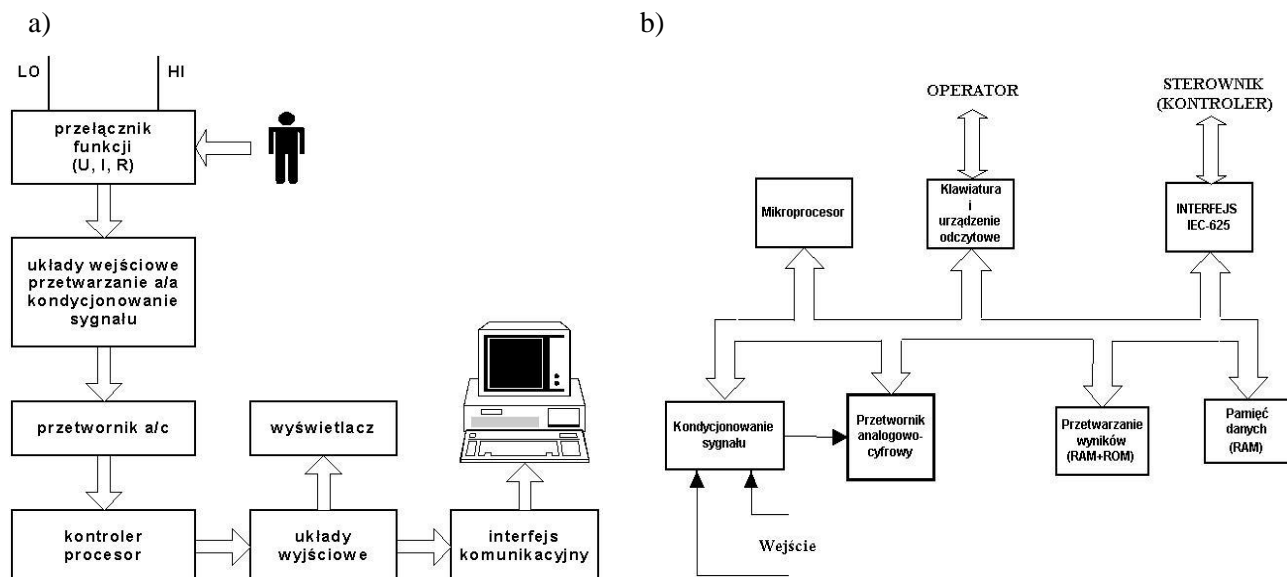
Wielkość mierzona	Uwagi
Napięcie stałe	pomiar wartości
Prąd stały	jw.
Napięcie zmienne	pomiar wartości skutecznej składowej zmiennej (AC) lub pomiar wartości skutecznej z uwzględnieniem składowej stałej (AC+DC)
Prąd zmienny	jw.
Rezystancja (konduktancja)	pomiar wartości przy prądzie stałym i przy ustalonym poziomie sygnału pobudzającego
Pojemność	pomiar wartości przy ustalonej częstotliwości i poziomie sygnału pobudzającego
Częstotliwość	pomiar wartości w określonym przedziale amplitudy sygnału badanego
Temperatura	pomiar wartości przy wykorzystaniu czujników typu termopara lub termorezystor
Wykrywanie połączeń galwanicznych	sygnalizacja sygnałem dźwiękowym
Testowanie diod i tranzystorów	

Tabela 2 Funkcje pomocnicze dostępne w niektórych multimetrach przenośnych i multimetrach laboratoryjnych

Funkcja	Uwagi
Współpraca systemowa	standardowe interfejsy np. IEC625/IEEE488, V24/RS232, HPIL
Automatyczny wybór zakresu	jest zwykle stosowany równolegle z ręcznym wyborem zakresu
Obliczenia: - skalowanie wyników pomiarów - obliczanie odchylenia procentowego od wartości wprowadzonej z klawiatury, - obliczanie ilorazu, - obliczanie różnicy, - kompresja logarytmiczna, - uśrednianie, filtracja, - obliczenia statystyczne.	np. $Y = aX + b$ wynik w decybelach – dB wartość średnia, wariancja, odchylenie standardowe
Zapamiętywanie wyników	często przy nastawianej szybkości pomiarów - np. od 1pom./godz. do 1000 pom./s
Wyświetlanie wartości błędu granicznego	
Sygnalizowanie przekroczeń	HI/LO/PASS
Wejście wielokanałowe	często z nazwą multilogger zamiast multimetr
Zegar, zadawanie odcinków czasu dla wyzwalania pomiarów	

2.3. Struktura multimetru

Na rys.1a jest pokazana struktura multimetru w postaci schematu funkcjonalnego z zaznaczeniem kierunku przetwarzania sygnałów i danych pomiarowych, a na rysunku 1b struktura w układzie magistralowym. Połączenia rysowane podwójną linią reprezentują zbiór przewodów służących cyfrowej organizacji pracy multimetru. Są to tzw. szyny adresowe, szyny rozkazów i szyny danych.



Rys. 1. Struktura multimetru – dwa popularne przedstawienia schematu blokowego

Kontakt operatora z multimetrem odbywa się za pośrednictwem klawiatury i urządzenia odczytowego (najczęściej wyświetlacz alfanumeryczny). W multimetrach mikroprocesorowych dokonała się zasadnicza zmiana w odniesieniu do rozwiązań „klasycznych”, związana z programową obsługą wyboru funkcji pomiarowej (funkcje pomiarowe są na rysunku reprezentowane przez U – pomiar napięcia, I – pomiar prądu, R – pomiar rezystancji). Płyta czołowa multimetru, zwykle dotąd dość gęsto upakowana przełącznikami i pokrętkami, znacznie się oczyściła, stając się jednocześnie układem peryferyjnym mikroprocesora.

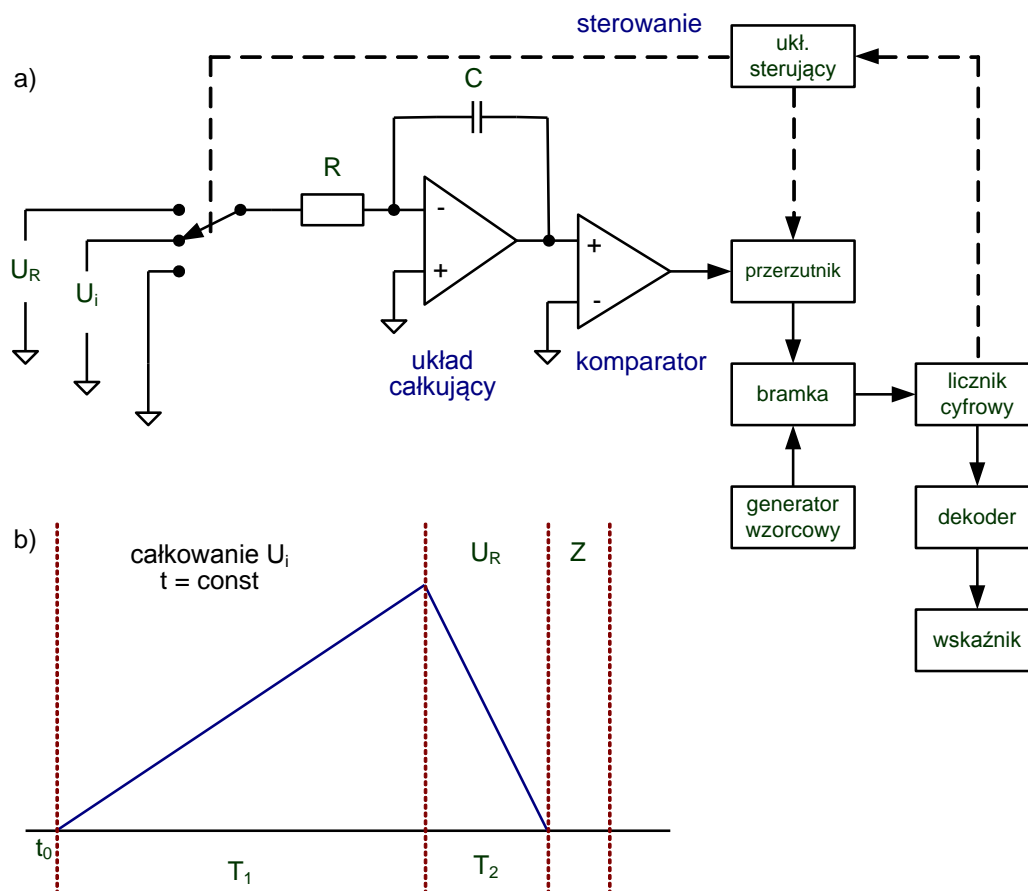
Elementarną funkcją realizowaną w multimetrze cyfrowym jest przetwarzanie analogowo-cyfrowe. Praktycznie w każdym multimetrze ogólnego przeznaczenia jest stosowane przetwarzanie integracyjne. O ile w prostych multimetrach jest to metoda podwójnego całkowania, o tyle w multimetrach laboratoryjnych do przetwarzania a/c wykorzystuje się przetworniki z całkowaniem wielokrotnym. Metody integracyjne charakteryzują się relatywnie długim czasem przetwarzania; należą zatem do przetworników wartości średniej napięcia wejściowego. Fakt naturalnego uśredniania sygnału jest podstawową zaletą tych przetworników, ponieważ przy odpowiednim doborze czasu całkowania można uzyskać dobre tłumienie sygnałów zakłócających nałożonych na sygnał mierzony. Podstawowym źródłem zakłóceń jest sieć zasilająca o częstotliwości 50Hz, zatem czas całkowania powinien być równy całkowitej wielokrotności okresu napięcia w sieci energetycznej. W profesjonalnych multimetrach laboratoryjnych po włączeniu zasilania przyrządu następuje pomiar okresu napięcia zasilającego, co pozwala precyzyjnie określić czas całkowania. Oczywiście taka procedura nie może być zrealizowana w multimetrach o zasilaniu baterijnym.

Na rysunku 2 w uproszczeniu przedstawiono metodę podwójnego całkowania. W pierwszym etapie jest całkowane napięcie mierzone w ściśle określonym czasie T_1 (wyznaczonym przez liczbę N_1 impulsów), następnie na wejście integratora jest podawane napięcie odniesienia o odwrotnej polaryzacji niż napięcie mierzone. Liczba impulsów N_2 zliczonych w układzie cyfrowym w czasie T_2 jest proporcjonalna do średniej wartości napięcia wejściowego w czasie T_1 .

$$N_2 = U_{av} \frac{N_1}{U_R} \quad (1)$$

Zaletą metody podwójnego całkowania (oprócz tłumienia zakłóceń) jest niezależność zliczonej liczby impulsów od wartości elementów układu całkującego. Dodatkowe okresy całkowania są wprowadzane przede wszystkim w fazie rozładowywania kondensatora. Zamiast pojedynczego napięcia odniesienia stosuje się źródła o malejących wartościach napięcia i zmiennej polaryzacji. W efekcie kondensator jest rozładowywany i łado-

wany prądem o coraz mniejszej wartości, a detekcja przejścia przez zero następuje przy powolnej zmianie napięcia. Taka technika poprawia znacznie rozdzielczość pomiaru. Na rys. 2b zaznaczono również fazę Z (zerowania) niezbędną do usunięcia resztkowego ładunku zgromadzonego na kondensatorze oraz wyzerowania licznika i wskaźnika. Dokładny opis metod integracyjnych i wyprowadzenie wzoru (1) można znaleźć w każdym podręczniku metrologii elektrycznej np. [1].

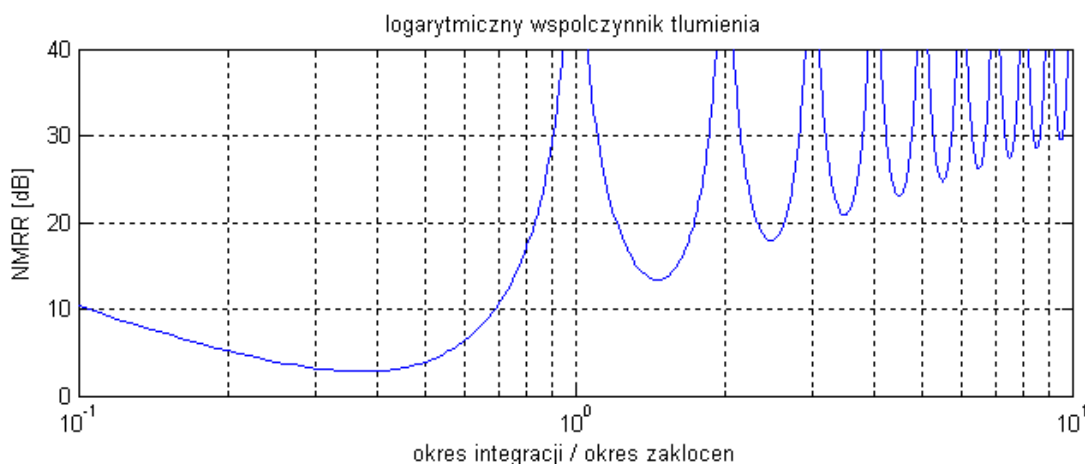


Rys. 2. Przetwarzanie a/c metodą podwójnego całkowania

Na rysunku 3 pokazano przebieg współczynnika tłumienia zakłóceń szeregowych w funkcji stosunku czasu całkowania do okresu napięcia sieci.

$$\text{NMRR [dB]} = 20 \log \frac{\pi \frac{T_i}{T_z}}{\sin^2 \pi \frac{T_i}{T_z}} \quad (2)$$

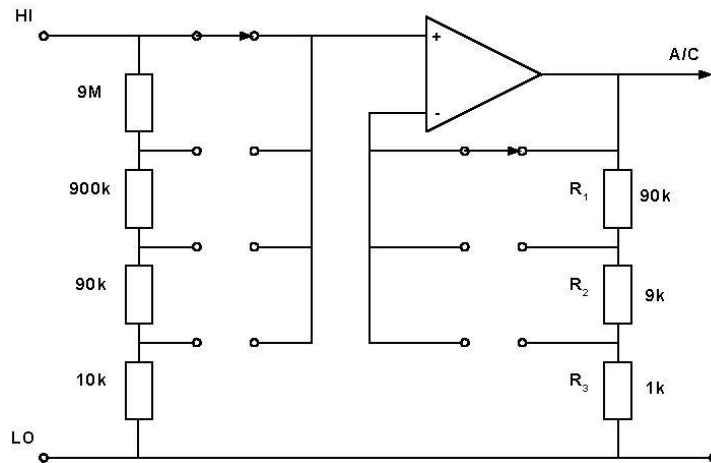
W specyfikacji multimetru laboratoryjnego współczynnik ten jest określany jako NMRR, a jego wartość spada do 0dB przy czasie całkowania krótszym od okresu napięcia zasilającego (PLC – Power Line Cycle).



Rys. 3. Współczynnik tłumienia w skali logarytmicznej

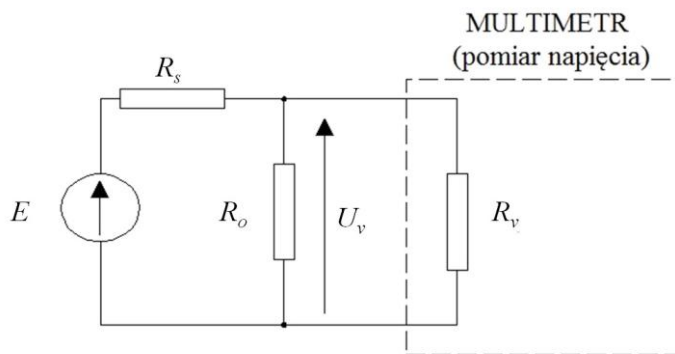
Ze względu na to, że przetwornik a/c przetwarza napięcie stałe (ściśle wartość średnią napięcia w czasie integracji), każda wielkość mierzona musi zostać poddana kondycjonowaniu, tj. takiemu przetwarzaniu wstępnemu, by przetwornik analogowo-cyfrowy otrzymał na wejściu odpowiedni rodzaj i poziom sygnału (np. napięcie stałe w zakresie od 0 do 10V). Wszystkie mierzone wielkości i funkcje pomiarowe są sprowadzone w efekcie do pomiaru napięcia stałego.

Na rysunku 4 pokazano klasyczny układ dzielnika i wzmacniacza wejściowego stosowany w multimetrach przy pomiarze napięcia stałego. Układ wzmacniacza powinien zapewniać poziom napięcia na wejściu przetwornika a/c odpowiadający w przybliżeniu pełnemu zakresowi przetwarzania.



Rys. 4. Układy wejściowy przy pomiarze napięcia stałego

Wartości rezystancji dzielnika są tak dobrane, że rezystancja wejściowa multimetru wynosi $10\text{M}\Omega$ (na zakresach napięciowych $> 1\text{V}$). Na mniejszych zakresach sygnał wejściowy jest podawany bezpośrednio na wejście wzmacniacza i rezystancja wejściowa jest większa od $10\text{G}\Omega$. Przy tak dużych rezystancjach wejściowych multimetr praktycznie nie wpływa na stan badanego obwodu. W prostych multimetrach przenośnych rezystancja wejściowa nie jest tak duża i multimetr pobiera pewien prąd z obwodu kontrolowanego. Zagadnienie to można zilustrować obwodem pokazanym na rysunku 5, na którym R_s jest rezystancją źródła, R_v rezystancją wejściową multimetru przy pomiarze napięcia, a R_o rezystancją obciążenia.



Rys. 5 Obwód ilustrujący wpływ rezystancji R_v na wynik pomiaru napięcia

Napięcie wskazane przez multimetr wyraża się wzorem:

$$U_v = E \frac{R_o}{R_s + R_o + \frac{R_s R_o}{R_v}} \quad (3)$$

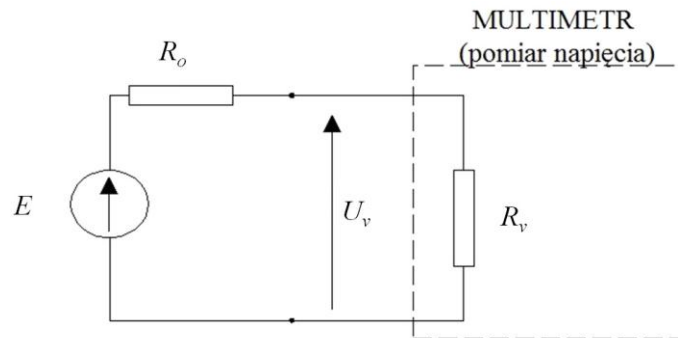
Wpływ rezystancji R_v na wynik pomiaru będzie pomijalnie mały tylko wtedy, gdy wartość R_v będzie dużo większa od wartości iloczynu $R_s R_o$ (tj, $R_v \gg R_s R_o$). Wtedy

$$U_v \cong E \frac{R_o}{R_s + R_o} \quad (4)$$

W celu doświadczalnego wyznaczenia rezystancji R_v można połączyć obwód jak na rys.6, składający się z zasilacza stabilizowanego o napięciu E (z założenia rezystancja wewnętrzna R_s zasilacza jest w przybliżeniu równa zero), rezystora R_o o dużej wartości (np. $1\text{M}\Omega$) i multimetru z wybraną funkcją „pomiar napięcia stałe-

go”. Na podstawie pomiaru napięcia E (obwód bez rezystora R_o) i napięcia U_v (obwód z włączonym rezystorem R_o) można napisać:

$$U_v = E \frac{R_v}{R_o + R_v} \quad (5)$$

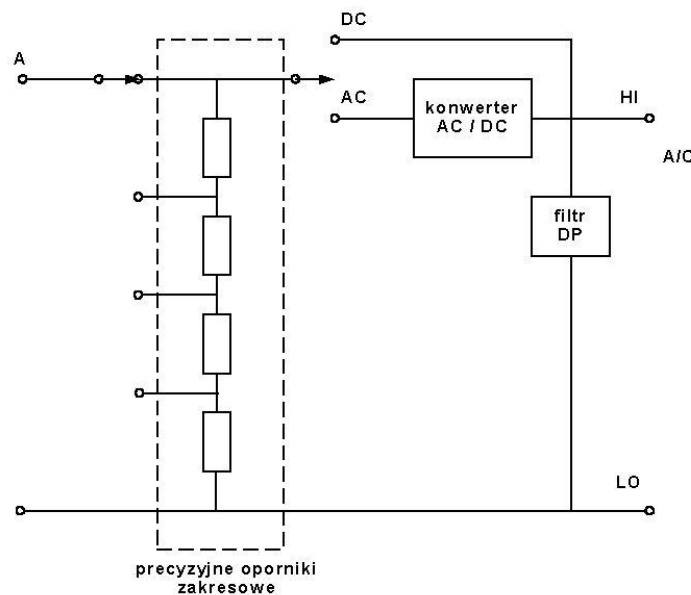


Rys. 6 Obwód ilustrujący metodę wyznaczania rezystancji R_v multimetru

Z równania (5) można wyznaczyć nieznaną rezystancję wewnętrzną R_v wejścia napięciowego multimetru:

$$R_v = R_o \frac{U_v}{E - U_v} \quad (6)$$

W multimetrach laboratoryjnych prąd jest mierzony poprzez spadek napięcia na boczniku, zaś rezystancja jest mierzona metodą woltomierza i amperomierza (zgodnie z prawem Ohma). Typowy układ wejściowy multimetru przy pomiarze prądu pokazano na rys. 7. Precyzyjne oporniki wzorcowe (boczniki) wyznaczają zakresy pomiarowe amperomierza.



Rys. 7 Układy wejściowe przy pomiarze prądu

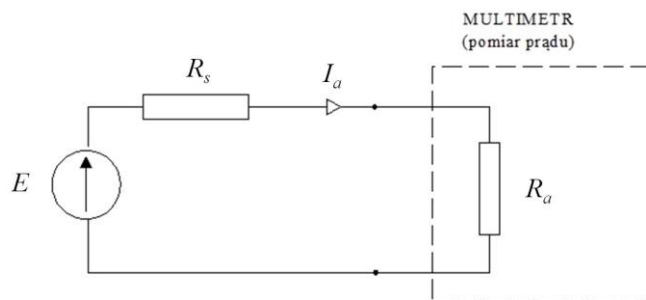
Podobnie jak przy pomiarze napięcia istotnym problemem bywa zbyt mała rezystancja R_v wejścia napięciowego, tak przy pomiarze prądu problemem może okazać się zbyt duża rezystancja R_a wejścia prądowego multimetru. Ilustruje to obwód pokazany na rys.8. Prąd płynący przez wejście prądowe multimetru wyniesie:

$$I_a = \frac{E}{R_s + R_a} \quad (7)$$

Przy spełnieniu warunku $R_a \ll R_s$ będzie:

$$I_a \cong \frac{E}{R_s} \quad (8)$$

Dość często producenci multimetrów zamiast rezystancji R_a podają w zestawieniu parametrów charakterystycznych wartość spadku napięcia na zaciskach multimetru przy przepływie prądu nominalnego. Rezystancja R_a występuje wtedy w postaci niejawnej.



Rys. 8. Obwód ilustrujący wpływ rezystancji R_a przy pomiarze prądu

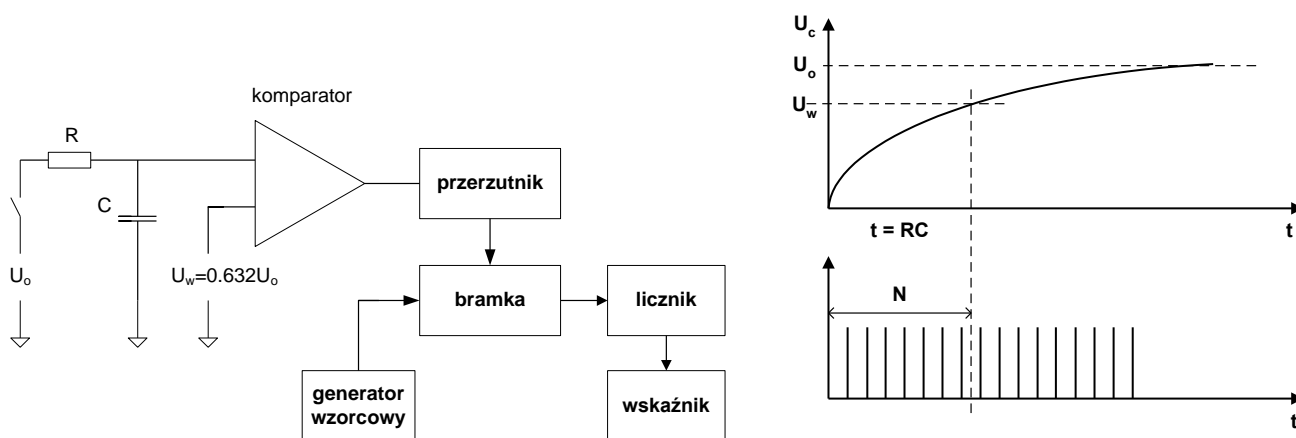
Wykorzystując multimetr do pomiaru prądu należy zawsze sprawdzić wejścia multimetru. W wielu multimetrach wejścia prądowe są zablokowane przy włączeniu funkcji innych niż pomiaru prądu. Typowym zabezpieczeniem obwodu prądowego multimetru przed przeciążeniem jest bezpiecznik topikowy.

Multimetry laboratoryjne umożliwiają wykonanie pomiaru rezystancji czteroprzewodowo. W podręcznych multimetrach ogólnego zastosowania pomiar rezystancji może być realizowany metodą przetwarzania na czas. Układ pomiarowy składa się wówczas z obwodu RC (rys. 9), a mierzona jest stała czasowa ładowania kondensatora. Napięcie na kondensatorze jest opisane zależnością:

$$U_c = U_o \left(1 - e^{-t/\tau}\right) \quad (9)$$

gdzie stała czasowa $\tau = RC$, zatem dla $t = \tau$

$$U_c = U_o (1 - e^{-1}) = 0.632 U_o \quad (10)$$



Rys. 9 Układ pomiarowy z przetwarzaniem R/t

Pomiar stałej czasowej (ściśle czasu po którym napięcie na kondensatorze osiągnie wartość równą 0.632 amplitudy U_o skoku napięcia na wejściu układu) jest realizowany metodą zliczania impulsów z generatora wzorcowego. Czas ten jest równy $N \cdot t_w$, gdzie t_w jest okresem przebiegu na wyjściu generatora impulsów wzorcowych.

W układzie przedstawionym na rys. 9 można wyznaczyć również pojemność C (przy znanej rezystancji R). Przy pomiarach pojemności za pomocą multimetrów podręcznych zakłada się z reguły bezstratność kondensatora. Takie założenie można uznawać jednak tylko wtedy, gdy sprawdzamy pojemności kondensatorów nowych, nie używanych. W innych przypadkach może to prowadzić do dużych błędów pomiaru.




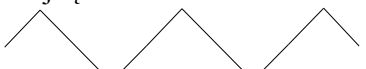
Istotnym elementem wpływającym na właściwości multimetru jest przetwornik napięcia zmiennego na napięcie stałe. Układy realizujące konwersję AC/DC, scharakteryzowane tu w kontekście właściwości multimetrów, wymagają przypomnienia, że przy pomiarach sygnałów zmiennych wynik pomiaru z reguły reprezentuje wartość skuteczną sygnału. W multimetrach starszego typu lub w bardzo prostych przyrządach, dla otrzymania takiej właśnie reprezentacji, były stosowane przetworniki wartości średniej (wyprostowanej) sygnału wejściowego, a wartość skuteczna była wyznaczana poprzez odpowiednie skalowanie, uwzględniające wartość współ-

czynnika kształtu (stosunek wartości skutecznej do średniej). Dla przebiegu sinusoidalnego wartość tego współczynnika wynika z zależności:

$$U_{sk} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{\dot{s}r} \cong 1,11 U_{\dot{s}r} \quad (11)$$

Przy pomiarach przebiegów o kształtach różnych od sinusoidy taki zabieg wprowadza błąd, który w przypadku przebiegu prostokątnego wyniesie 11% (dla takiego przebiegu wartość średnia wyprostowana jest równa wartości skutecznej). W tabeli 3 zamieszczono przykłady kilku przebiegów i wynik pomiaru wartości skutecznej dwoma różnymi multimetrami.

Tabela 3. Porównanie wskazań multimetru-woltomierza reagującego na wartość średnią (ale wyskalowanego w wartości skutecznej dla sygnału sinusoidalnego) i multimetru-woltomierza reagującego na wartość skuteczną dla kilku typowych kształtów sygnałów.

Kształt (amplituda 1V)	Wskazanie przyrządu z przetwornikiem wartości średniej	Wskazanie przyrządu z przetwornikiem wartości skutecznej
Sinusoida 	0,707 V	0,707 V
pół-sinusoida 	0,353 V	0,500 V
Prostokąt 	1,110 V	1,000 V
Trójkąt 	0,545 V	0,577 V

W najdokładniejszych przetwornikach wartości skutecznej są wykorzystywane zjawiska cieplne prądu elektrycznego, przy czym należy nadmienić, że otrzymanie dużej dokładności przetwarzania wiąże się ze znaczną komplikacją układu przetwornika. Multimetry z takimi przetwornikami są produkowane w niewielkich ilościach i są bardzo kosztowne. Ogniwem pośrednim pomiędzy dokładnymi przetwornikami termoelektrycznymi a przetwornikami wartości średniej są monolityczne układy wzmacniaczy operacyjnych realizujące definicyjne wyznaczanie wartości skutecznej drogą operacji matematycznych na przetwarzanym sygnale analogowym. Stałonapięciowy sygnał wyjściowy takich przetworników jest proporcjonalny do wartości skutecznej sygnału wejściowego w dość dużym przedziale odkształceń od sinusoidy, charakteryzowanym zwykle za pomocą współczynnika szczytu (ang. crest factor), tj. odniesienia wartości szczytowej do wartości skutecznej. Większość współczesnych multimetrów jest wyposażona w operacyjne przetworniki wartości skutecznej i wynik pomiaru reprezentuje prawdziwą wartość skuteczną badanego sygnału. Taka właściwość multimetrów jest oznaczana na płycie czołowej przyrządu (lub wyraźnie zaznaczana w dokumentacji) jako TrueRMS.

Blok sterowania i przetwarzania wyników (kontroler – procesor na rys. 1) pozwala na realizację typowych operacji na wynikach pomiarów. Można wymienić tu obliczanie parametrów statystycznych (wartość średnia, wariancja, odchylenie standardowe), obliczanie wartości wyników pomiarów pośrednich, obliczanie wartości wyniku związane z wewnętrznymi procedurami auto-zerowania i auto-kalibracji. Blok ten współpracuje z pamięciami typu ROM zawierającymi oprogramowanie sterujące multimetru i pamięciami typu RAM służącymi do bieżącego gromadzenia kolejnych wyników pomiarów w celu dalszego ich opracowywania bądź rejestracji. Poważną zaletą tej pamięci jest możliwość przeglądania kolejnych odczytów pomiarów przy nastawianej szybkości ich repetycji (np. od 200 odczytów na sekundę do 1 odczytu na godzinę). W wielu najnowszych modelach bloki mikroprocesora, przetwarzania wyników i pamięci danych wykonywane są w postaci specjalizowanego mikrokontrolera, przeznaczonego wyłącznie do danego typu multimetru. Bardziej zaawansowana wersja takiego układu dużej skali integracji zawiera w sobie również blok przetwornika analogowo-cyfrowego.

Interfejs komunikacyjny w standardzie IEC-625 lub V-24 (RS-232) służy współpracy multimetru z komputerem. Coraz częściej pojawia się informacja producentów o możliwości współpracy multimetru z komputerem również poprzez złącze-interfejs USB.

2.4. Właściwości i specyfikacja multimetrów

W tabeli 4 zestawiono podstawowe charakterystyczne parametry multimetrów.

Tabela 4 Multimetry ogólnego zastosowania - parametry charakterystyczne

Parametr	Uwagi
Zakres górny, Zakres dolny	} obszar pomiarowy
Liczba cyfr wyniku	np. $5^{1/2}$
Rozdzielczość	np. 1 LSD (najmniej znacząca cyfra)
Dokładność (błąd podstawowy)	Składowa od wskazania + składowa od końca zakresu
Liniowość, Powtarzalność wskazań	} na ogół parametry te są wliczane do błędu podstawowego
Szybkość pomiaru (czas pomiaru)	np. 20 pom./s lub 50 ms
Poziom szumu wewnętrznego	np. $5 \mu\text{V}$
Współczynniki tłumienia szumów	NMRR, CMRR
Pasma częstotliwości (błąd dodatkowy)	Pomiary zmiennoprądowe
Współczynnik szczytu (błąd dodatkowy)	Pomiary zmiennoprądowe
Rezystancja wejściowa (pojemność wejściowa)	Pomiary napięć - przy pomiarach zmiennoprądowych
Spadek napięcia na zaciskach lub rezystancja wejściowa	Pomiary prądów
Prąd obciążenia obiektu pomiaru	Pomiary rezystancji
Minimalna dopuszczalna wartość napięcia wej.	Pomiary częstotliwości
Przedział temperatur pracy	np. $0 \div 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Moc pobierana ze źródła zasilania lub średni czas pracy z podanym typem źródła	
Wymiary gabarytowe	także cechy ergonomiczne
Masa (ciężar)	także odporność na wstrząsy i udary

W tabeli 4 nie zamieszczono dość istotnego dla każdego użytkownika parametru, jakim jest cena przyrządu. Koszty eksploatacji multimetru wynikają nie tylko z ceny przyrządu w dniu zakupu, ale także z konieczności jego okresowego wzorcowania. Istotny przełom w poprawie dokładności i niezawodności multimetrów wniosła możliwość wprowadzania stałych kalibracji toru „układy kondycjonowania → przetwornik a/c” do nie-ulotnej pamięci CMOS. W rezultacie każde kolejne wzorcowanie pozwala na istotną korektę usuwającą zmiany powodowane pełnieniem charakterystyk przetwarzania w funkcji czasu. Cena przyrządu odzwierciedla (zazwyczaj!) jego jakość. Najbardziej rozsądnym kryterium wyboru multimetru jest jego przeznaczenie, stąd konieczność prawidłowej interpretacji parametrów zawartych w specyfikacji przyrządu.

Wymienione w tabeli 4 parametry wymagają pewnego komentarza. Z punktu widzenia użytkownika najbardziej istotne są następujące pojęcia:

- liczba cyfr znaczących
- zakresy, obszar pomiarowy
- dokładność

Liczba cyfr znaczących oznacza ile pełnych cyfr może być pokazanych na wyświetlaczu. Dodatkowe oznaczenie ułamkowe w postaci $\frac{1}{2}$ lub $\frac{3}{4}$ oznacza, że na najbardziej znaczącej pozycji wyniku może pojawić się odpowiednio 1 lub 3. Oznaczenia ułamkowe mogą mieć niestety nieco odmienną interpretację dla multimetrów laboratoryjnych i multimetrów ogólnego zastosowania. Oznaczenie $\frac{1}{2}$ dla multimetrów laboratoryjnych (np. multimetr $4\frac{1}{2}$ cyfry, $6\frac{1}{2}$ cyfry) definiuje możliwość przekroczenia zakresu pomiarowego o pewną standardową wartość stanowiącą 20% danego zakresu. Nie ma przy tym znaczenia, co jest mierzone i jaki to jest zakres. Największa liczba zapisana za pomocą 4 cyfr to 9999, co oznacza 10000 różnych stanów (od 0 do 9999), 20% z 10000 to 2000. Zatem maksymalne wskazanie multimetru $4\frac{1}{2}$ cyfry to 11999 (9999+2000), analogicznie maksymalne wskazanie multimetru $6\frac{1}{2}$ to 1199999. W prostszych multimetrach jest spotykane oznaczenie $\frac{3}{4}$ (np. $3\frac{3}{4}$) i praktycznie definiuje ono maksymalne wskazanie multimetru jako 3999 (4000 stanów od 0 do 3999). Analogicznie oznaczenie $\frac{1}{2}$ (np. $3\frac{1}{2}$) należy interpretować jako maksymalne wskazanie 1999. W katalogach

przy opisie multimetrów przenośnych jest podawana zazwyczaj nie liczba cyfr znaczących tylko wielkość skali (typowa wartość to właśnie 4000). Liczba cyfr znaczących (lub wielkość skali) jednoznacznie definiuje rozdzielczość multimetru. Rozdzielczość jest ilorazem najmniejszej wartości jaka może być wyświetlona na danym zakresie pomiarowym do wielkości tego zakresu. Najmniejsza wartość odpowiada najmniej znaczącej cyfrze wyświetlacza. Stąd praktycznie rozdzielczość jest odwrotnością maksymalnego wskazania i może być wyrażona w procentach, ppm (częściach milionowych), bitach lub liczbie cyfr znaczących. Multimetr $6\frac{1}{2}$ może znajdować się w 1200000 stanach (od 0 do 1199999), zatem jego rozdzielczość wynosi 0.0001%, 1ppm lub 21 bitów (2^{20} + bit znaku). Z rozdzielczością jest związana czułość multimetru, która wyraża najmniejszą zmianę poziomu sygnału wejściowego rejestrowaną przez przyrząd. Czułość jest zazwyczaj podawana w jednostkach wielkości mierzonej. Multimetr $6\frac{1}{2}$ na zakresie pomiarowym 1V ma czułość $1\mu\text{V}$, ale taką czułość ma również multimetr $4\frac{1}{2}$ na zakresie 10mV. Określenie czułości nie jest równoznaczne z określeniem najmniejszej mierzonej wartości. Z faktu, że multimetr reaguje na zmianę napięcia $1\mu\text{V}$ nie wynika, że może mierzyć napięcia na poziomie μV . Tak się dzieje dlatego, że rzeczywisty zakres pomiarowy (szczególnie dla sygnałów przemiennych) może nie pokrywać się z zakresem nominalnym, to znaczy dolna wartość zakresu pomiarowego wynosi np. 1% wartości górnego zakresu.

Na dokładność pomiaru ma wpływ wiele czynników, w tym: czas jaki upłynął od ostatniej kalibracji, dokładność wzorców stosowanych przy legalizacji miernika, warunki pomiaru (temperatura), kształt i zakłócenia sygnału mierzonego. Nie analizując szczegółowo wszystkich aspektów określania dokładności, każdy wynik pomiaru należy podawać wraz z obliczonym błędem pomiaru opisanym w specyfikacji multimetru. Błąd dla multimetrów laboratoryjnych jest opisany jako $\pm(a\% \text{ wartości mierzonej} + b\% \text{ wartości zakresu})$ i ten błąd jest prosty do obliczenia. W przypadku multimetrów przenośnych błąd jest opisany jako $\pm(a\% \text{ wartości mierzonej} + c \text{ cyfr znaczących})$. Tak przedstawiony błąd można przeliczyć na postać $b\% \text{ wartości zakresu}$ odnosząc c cyfr znaczących do maksymalnego wskazania lub wyznaczyć wprost określając, w jednostkach wielkości mierzonej, wartość jakiej odpowiadają cyfry znaczące na danym zakresie.

Odnosząc się do zdefiniowanego w poprzednim podrozdziale określenia TrueRMS należy podkreślić, że dotyczy ono zastosowania w strukturze multimetru przetwornika prawdziwej wartości skutecznej. To określenie nie ma związku z rodzajem sprzężenia na wejściu, tzn. eliminacją składowej stałej. Większość współczesnych multimetrów laboratoryjnych mierzy prawidłowo wartość skuteczną tylko składowej przemienną sygnału wejściowego. Wyznaczenie wartości skutecznej przebiegu zmiennego ze składową stałą wymaga, przy stosowaniu takiego multimetru, wykonania niezależnie dwóch pomiarów i obliczenia wyniku z zależności:

$$U_{AC+DC} = \sqrt{U_{AC}^2 + U_{DC}^2} \quad (12)$$

Jeżeli multimetr może zmierzyć wartość opisaną zależnością (12) to jest to wyraźnie zaznaczone w dokumentacji przyrządu jako pomiar AC+DC.

Powyższe uwagi są bardzo ważne ze względu na niestety pojawiającą się w literaturze (i Internecie) błędną interpretację określeń RMS i TrueRMS. Określenie RMS dotyczy sygnału – to jest po prostu definicyjne wyrażenie wartości skutecznej – Root Mean Square Value, natomiast określenie TrueRMS dotyczy właściwości przyrządu pomiarowego.

Funkcje pomiarowe i funkcje dodatkowe (tabela 1 i 2) uzupełnia typowy zestaw parametrów charakterystycznych (tabela 4). Zestaw ten może stanowić podstawę do porównań multimetrów między sobą oraz podstawę do oceny jakości przyrządu. Takie porównanie przeprowadzono (tabela 5) dla dwóch wybranych modeli multimetrów laboratoryjnych produkowanych przez firmy należące dziś do światowej czołówki producentów narzędzi pomiarowych. Porównanie wskazuje na niemal identyczne wartości podstawowych parametrów, co oddaje dość dobrze stan możliwości i ograniczeń dzisiejszej techniki pomiarowej. Firma Keithley rozmiarami produkcji i potencjałem finansowym niewątpliwie ustępuje firmie Agilent, jednak stara się - w odniesieniu do jednego z poważnych konkurentów – w porównywanym modelu rozszerzyć zestaw funkcji pomiarowych poprzez dodanie pomiaru temperatury i opcjonalnego modułu zawierającego wejście dziesięciokanałowe.

Tabela 5 Porównanie parametrów charakterystycznych dwóch multimetrów laboratoryjnych

	Agilent 34401A	Keithley 2000
Liczba cyfr wyniku	$4^{1/2}...6^{1/2}$	$4^{1/2}...6^{1/2}$
Napięcie stałe	100mV...1000V	100mV...1000V
Błąd podstawowy	35 ppm R + 5 ppm FS	30 ppm R + 5 ppm FS
Rozdzielczość	100 nV	100 nV
Maks. Szybkość pomiaru	1000 pom./s	1850 pom./s
Rezystancja wej.	10MΩ lub do 10V>10GΩ	10MΩ, do 10V>10GΩ
Napięcie zmienne TRMS	100mV...750V	100mV...750V
Błąd podstawowy	0,06% R + 0,03% FS	0,06% R + 0,03% FS
Pasma	3 Hz...300 kHz	3 Hz...300 kHz
Współczynnik szczytu	maks. 5 : 1	maks. 5 : 1
Maks. Szybkość pomiaru	50 pom./s	30 pom./s
Impedancja wej.	1MΩ/100pF	1MΩ/100pF
Inne funkcje	prąd stały i zmienny rezystancja (2 i 4 przew.) test diodowy częstotliwość i okres sprawdz. ciągłości obw. podtrzymanie wyniku przeliczanie wyniku pamięć 512 odczytów interfejs IEC-625 i V-24	prąd stały i zmienny rezystancja (2 i 4 przew.) test diodowy częstotliwość i okres temperatura sprawdz. ciągłości obw. podtrzymanie wyniku przeliczanie wyniku pamięć 1024 odczytów interfejs IEC-625 i V-24 wejście 10-cio kanałowe

W przeszłości, w praktyce projektowania aparatury pomiarowej, posługiwano się tzw. współczynnikami dobroci, pozwalającymi na ujawnienie ukrytych współzależności między parametrami charakterystycznymi oraz na ujawnienie konstrukcji lepszej. Dziś nie tylko nie dysponujemy współczynnikami dobroci, ale pojawiły się tak trudne elementy oceny jak np. łatwość programowania i obsługi oraz zdolność przyrządu do pracy adaptacyjnej, tj. zdolność do auto-optimalizacji swych parametrów przy zmianach warunków pomiaru.

W związku z dość dużą liczbą funkcji realizowanych w jednym przyrządzie oraz złożonością jego struktury wzrasta waga kryterium niezawodności pracy. Prócz zachowywania najdalej posuniętej staranności w selekcji elementów i podzespołów w procesie montażu u producenta - jeszcze na etapie projektowania wstawia się w strukturę i algorytmy pracy bloki i operacje auto-testowania, pozwalające na szybkie wykrywanie i wymianę uszkodzonych części przyrządu. Dziś katalog środków konstrukcyjnych poprawiających jakość metrologiczną multimetrów jest dość obszerny – najważniejsze zestawiono w tabeli 6. Informacja o ich zastosowaniu jest z reguły dołączana do opisu funkcji i parametrów każdego multimetru.

Tabela 6 Zestawienie środków konstrukcyjnych poprawiających jakość metrologiczną multimetrów

1.	Kalibracja cyfrowa – wprowadzanie do pamięci stałych kalibracji
2.	Auto-kalibracja, auto-zerowanie – cykliczne wprowadzanie poprawek do wskazań określane wspólnie jako auto-korekcja
3.	Auto-testowanie (łącznie z sygnalizacją charakteru uszkodzeń)
4.	Zabezpieczenie wejść przed przeciążeniem oraz wskaźniki przeciążenia (w tym np. wskaźnik przekroczenia dopuszczalnej wartości współczynnika szczytu przy pomiarze wartości skutecznej)
5.	Uzupełnienie odczytu cyfrowego wskazaniem analogowym
6.	Zastosowanie wskaźników alfanumerycznych
7.	Rozdzielenie galwaniczne części analogowej i cyfrowej
8.	Ekran ochronny (guard)
9.	Wejście cztero-zaciskowe (pomiar małych rezystancji)
10.	Zastosowanie układów i podzespołów elektronicznych o minimalizowanym poborze mocy (b. ważne przy zasilaniu baterijnym)

Jednym z podstawowych dylematów konstruktorów i producentów jest wybór funkcji realizowanych bezpośrednio przez multimetr. Jest zawsze pewna granica między funkcjami, które niewątpliwie należy włączyć do

struktury wewnętrznej multimetru, a funkcjami, które mogą być realizowane za pomocą sprzętu wspomagającego, interfejsu i komputera. Zmiany w tym sprzęcie – a już szczególnie dotyczy to komputerów i interfejsów – wywierają duży, a będą wywierać jeszcze większy wpływ na strukturę multimetrów. Pytanie - które funkcje należy powierzyć multimetrowi, a które komputerowi? - pozostaje dość często bez wyraźnej odpowiedzi.

3. Program ćwiczenia

1. Korzystając z dostępnych multimetrów zmierz napięcie stałe na wyjściu zasilacza stabilizowanego. Wyznacz błąd graniczny pomiaru i niepewność rozszerzoną.
2. Wyznacz wartość rezystancji wewnętrznej multimetru przy wybranej funkcji pomiaru napięcia stałego za pomocą metody opisanej w instrukcji. Przeprowadź analizę błędu granicznego i niepewności rozszerzonej wyznaczenia rezystancji R_v wraz z dyskusją ograniczeń i stosowności proponowanej metody. Uwaga! Zakresy pomiaru napięcia należy wybierać ręcznie (poprzez odejście od trybu automatycznego wyboru zakresu).
3. Połącz obwód do pomiaru prądu stałego wykorzystując jako obciążenie dekadę rezystancji. Zmierz prąd i wyznacz błąd pomiaru.
4. Zmierz wartość rezystancji wejścia prądowego multimetru korzystając z drugiego multimetru z wybraną funkcją pomiaru rezystancji, a następnie porównaj otrzymane wartości z danymi producenta.
5. Wykorzystując multimetry (jeden jako amperomierz a drugi jako woltomierz) wyznacz wartość rezystancji dla dwu różnych możliwych sposobów włączenia multimetrów do obwodu pomiarowego. Przeprowadź analizę błędów tak zrealizowanego pomiaru. Wskaż na czynniki ograniczające tu zakres pomiaru rezystancji.
6. Podłącz multimetr i oscyloskop do wyjścia generatora i zmierz wartość średnią i skuteczną dla przebiegów o kształcie sinusoidalnym, prostokątnym i trójkątnym (bez składowej stałej). Skorzystaj z różnych multimetrów, interpretuj wyniki pomiarów i wyznacz błędy. Wprowadź składową stałą do przebiegów i sprawdź co mierzą multimetry.
7. Wykonaj pomiar wartości rezystancji opornika dekadowego. Wyznacz błąd i niepewność pomiaru. Zwróć uwagę na wartość błędu przy pomiarze rezystancji rzędu pojedynczych omów.
8. Zmierz wartość pojemności kondensatora dekadowego, połącz układ RC (szeregowo z kondensatorem np. 2 μF opornik rzędu 200 Ω) i ponownie wykonaj pomiary. Przeprowadź analizę uzyskanych wyników; określ zakres stosowania metody pomiaru zakładającej bezstratność kondensatora.
9. Wykonaj pomiary częstotliwości; sprawdź jaki jest minimalny poziom napięcia wejściowego przy pomiarze częstotliwości.

4. Zagadnienia do samodzielnego opracowania

1. Za pomocą multimetru o ręcznie wybranym zakresie pomiaru 20 V mierzone jest napięcie o wartości 1 V. Z jakim błędem granicznym można zmierzyć to napięcie, jeśli składowa błędu wyrażona w procentach od wartości mierzonej równa jest $\pm 0,05\%$, zaś składowa błędu wyrażona w procentach od końca zakresu równa jest $\pm 0,01\%$?
2. W obwodzie jak na rys. 5 wartości rezystancji wynoszą odpowiednio $R_s = 1 \Omega$, $R_o = 100 \text{ k}\Omega$ i $R_v = 10 \text{ M}\Omega$. Należy określić (w %) wartość składową błędu pomiaru napięcia powodowaną wpływem rezystancji R_v .
3. Multimetrem reagującym na wartość średnią sygnału wejściowego, ale wyskalowanym w wartościach skutecznych sygnału sinusoidalnego, zmierzono napięcie o amplitudzie 10 V: (a) sinusoidalne, (b) prostokątne, (c) trójkątne. Jakie będą wskazania multimetru w tych przypadkach, jeśli pominąć błąd systematyczny?
4. Narysować schemat zastępczy szeregowy dla kondensatora ze stratami. Podać wykres wskazowy dla tego schematu i wskazać na nim kąt strat. Określić wartość błędu powodowanego założeniem bezstratności kondensatora (tzn. przyjęciem, że impedancja kondensatora jest równa jego reaktancji), jeżeli tg δ badanego kondensatora wynosi w rzeczywistości 0,5.

Literatura

- [1] Czajewski J., Podstawy Metrologii Elektrycznej, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa, 2004
- [2] Mazur G. A., Digital Multimeter Principles. Homewood, IL, ATP 2001
- [3] Kularatna N., Digital and Analogue Instrumentation: Testing and Measurement. IEE, London, 2002