

Ćwiczenie Nr 1N

MULTIMETRYCZNE POMIARY NAPIĘCIA I PRĄDU STAŁEGO

Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie budowy oraz podstawowych właściwości wielozakresowych podręcznych i laboratoryjnych multimetrów cyfrowych a także wyrobienie umiejętności prawidłowego ich wykorzystania do pomiarów napięcia i prądu stałego.

(Opracował: prof. Jan R. Jasik)

Lublin 2009 r.

1. WPROWADZENIE

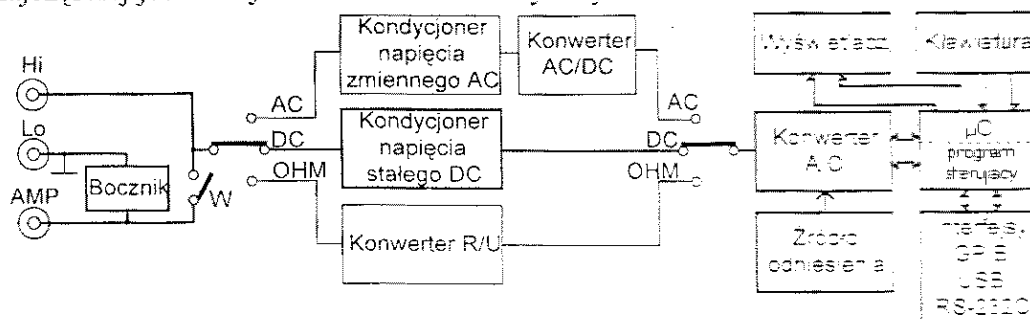
Multimetry należą do najszerzej wykorzystywanych przyrządów pomiarowych i znajdują zastosowanie zarówno w pomiarach laboratoryjnych jak również w pomiarach prowadzonych w warunkach przemysłowych. W modelach współczesnych multimetrów cyfrowych (ang. *digital multimeter DMM*) z reguły instalowany jest interfejs systemowy, pozwalający na stosowanie bogatych narzędzi programowych, umożliwiających wirtualizację pomiarów i tworzenie, wspomaganych komputerowo, systemów pomiarowych do pomiaru różnych wielkości elektrycznych i nieelektrycznych.

Podstawowe klasyfikacje multimetrów odwołują się do ich struktury wewnętrznej i cech ergonomicznych. I tak wyróżnia się **multimetry z przetwornikami analogowo-cyfrowymi (A/C) integracyjnymi** oraz **multimetry z przetwornikami A/C próbkującymi**. Pierwsze z nich mają dość rozbudowane układy kondycjonowania sygnałów po stronie analogowej oraz stosunkowo proste przetwarzanie po stronie cyfrowej. Drugie natomiast posiadają proste układy kondycjonowania, wymagające dość skomplikowanych algorytmów przetwarzania po stronie cyfrowej. Inny, bardzo widoczny, podział wyróżnia **multimetry podręczne** - z reguły o zasilaniu bateryjnym i **multimetry laboratoryjne** - z reguły wyposażone w bogate możliwości pracy systemowej. Równolegle obserwuje się proces wyodrębniania się, z grupy multimetrów ogólnego zastosowania, multimetrów do zadań ściśle określonych, np.: **multimetry samochodowe** - do zastosowań w technice motoryzacyjnej, **multimetry sygnaturowe** - do badań układów cyfrowych, **multimetry graficzne** - do obserwacji przebiegów czasowych sygnałów itp.

Zastosowanie mikroprocesorów w wewnętrznej strukturze multimetrów pozwoliło na realizację wielu funkcji tzw. sztucznej inteligencji. Miarą tej „inteligencji” jest przede wszystkim łatwość obsługi przyrządu i programowania jego pracy do realizacji adaptacyjnych algorytmów pomiarowych, ograniczenie wpływu zakłóceń, automatyczny wybór zakresu pomiarowego, autokalibracja, możliwość pracy systemowej w różnych standardach interfejsów itp. Pięta czołowa multimetru, dotychczas dość gęsto nasycona przełącznikami i pokrętkami, stała się układem peryferyjnym mikroprocesora. Wszystko to sprawia, że multimetry stanowią najlepszy przykład współczesnych osiągnięć i rozwoju techniki pomiarowej.

1.1. Struktura multimetru

Schemat blokowy współczesnego cyfrowego multimetru, jest pokazany na rys.1.1. Kontakt operatora z multimetrem odbywa się za pomocą **klawiatury** i urządzenia odczytowego - najczęściej jest to **wyświetlacz** alfanumeryczny.

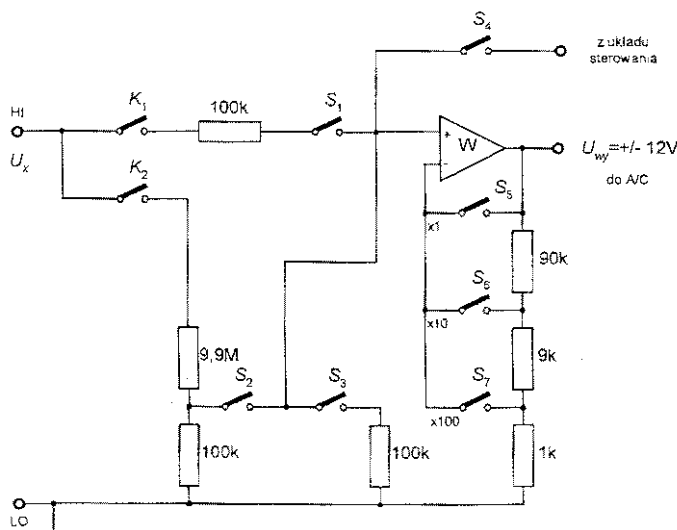


Rys 1.1. Uproszczony schemat blokowy multimetru cyfrowego

Większość współczesnych multimetrów jest przystosowanych do realizacji pomiarów: napięcia i prądu stałego (ang. *direct voltage and current*), napięcia i prądu zmiennego (ang. *alternating voltage and current*) oraz do pomiarów rezystancji (ang. *resistance*) przy prądzie stałym. Wszystkie funkcje pomiarowe w multimetrze cyfrowym są sprowadzone do pomiaru napięcia stałego. Dlatego każda wielkość mierzona musi zostać poddana **kondycjonowaniu**, tj. takiemu przetwarzaniu wstępnemu by przetwornik A/C otrzymał na swoim wejściu napięcie stałe o odpowiednim poziomie (np. 10 V lub 12 V), odpowiadającym pełnemu zakresowi przetwarzania. Precyzyjny **bocznik** (ang. *shunt*) służy do konwersji mierzonego prądu na napięcie.

1.1.1 Blok kondycjonowania -wejście napięciowe

Na rys. 1.2 pokazano typowy układ bloku kondycjonowania multimetru przy pomiarze napięcia stałego. Układ jest kombinacją dzielnika napięcia i wzmacniacza. Mierzone napięcie stałe (o wartości mniejszej niż 12V) jest podawane bezpośrednio na wejście nieodwracające wzmacniacza poprzez łączniki K_1 i S_1 . Napięcia o większych wartościach są dołączane, poprzez łącznik K_2 , na wejście precyzyjnego dzielnika napięcia o współczynniku podziału 100:1 i dalej, jako niskie napięcie dzielnika, poprzez łącznik S_2 , do wejścia wzmacniacza.



Rys 1.2 Schemat układów kondycjonowania przy pomiarze napięcia stałego multimetrem cyfrowym

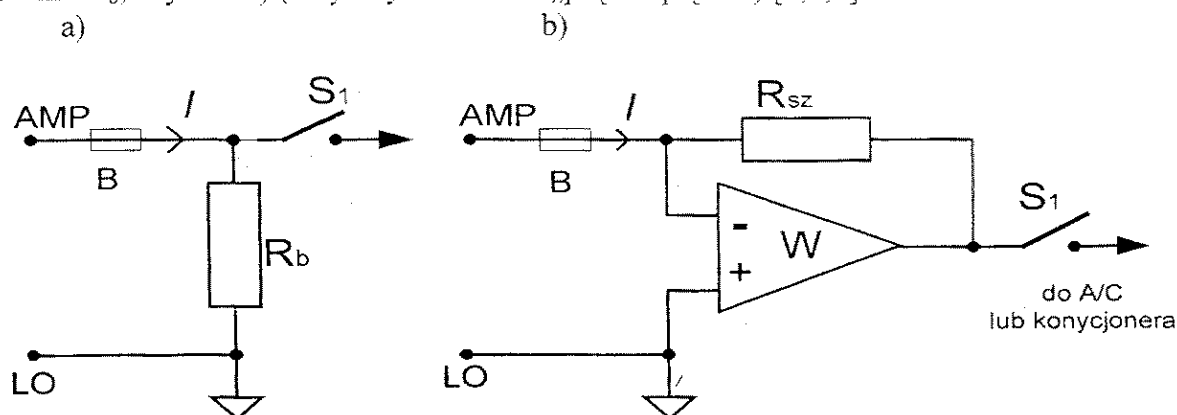
Wzmocnienie wzmacniacza jest ustawiane (łączniki S_5 , S_6 i S_7) tak, by wyjściowe napięcie kondycjonera było bliskie zakresowemu napięciu wejściowemu przetwornika A/C (np. 10 V).

Wartości rezystancji dzielnika są tak dobrane, że rezystancja wejściowa multimetru wynosi 10 M Ω (na zakresie napięciowym $> 10\text{ V}$). Na niższych zakresach sygnał wejściowy jest podawany bezpośrednio na wejście wzmacniacza i rezystancja wejściowa jest większa niż 10 G Ω .

Przy tak dużych rezystancjach wejściowych woltomierz praktycznie nie wpływa na stan badanego obwodu. Niestety w prostych multimetrach podręcznych rezystancja wejściowa nie jest tak duża i woltomierz pobiera pewien prąd z obwodu kontrolowanego. Zagadnienie to jest analizowane w p. 2 niniejszego opracowania.

1.1.2. Blok kondycjonowania – wejście prądowe

Typowe układy wejściowe multimetru przy pomiarze prądu przedstawiają rys.1.3a) (bocznik R_b) i rys.1.3b) (aktywny konwerter „prąd-napięcie”) [1,4,5].



Rys.1.3. Schematy układów wejściowych multimetru cyfrowego przy pomiarze prądu

Rozwiązania z bocznikiem są wykorzystywane w starszych multimetrach, w których rezystancja R_b jest mała i dobierana tak aby uzyskać na wyjściu napięcie 1V, przy maksymalnym możliwym do pomiaru prądzie. Mała wartość rezystancji powoduje więc mały spadek napięcia co jest ważne dla amperomierza, który w idealnym przypadku powinien stanowić zwarcie. Mała wartość rezystancji bocznika zmniejsza wejściową stałą czasową układu, co w rezultacie daje krótszy czas odpowiedzi przyrządu.

W konfiguracji wejścia amperomierza z konwerterem aktywnym mierzony prąd I płynie przez rezystor R_{sz} umieszczony w pętli sprzężenia zwrotnego wzmacniacza W . Napięcie wyjściowe $U = -IR_{sz}$ konwertera jest miarą mierzonego prądu, a ogólna wrażliwość układu jest determinowana przez rezystor R_{sz} . Bardzo mały zakres prądowy oraz krótki czas odpowiedzi układu są uzyskane dzięki wykorzystaniu bardzo dużego wzmocnienia wzmacniacza W .

Wejścia prądowe multimetrów cyfrowych są zawsze chronione prze specjalny bezpiecznik aparatu B

1.2. Konwerter analogowo-cyfrowy

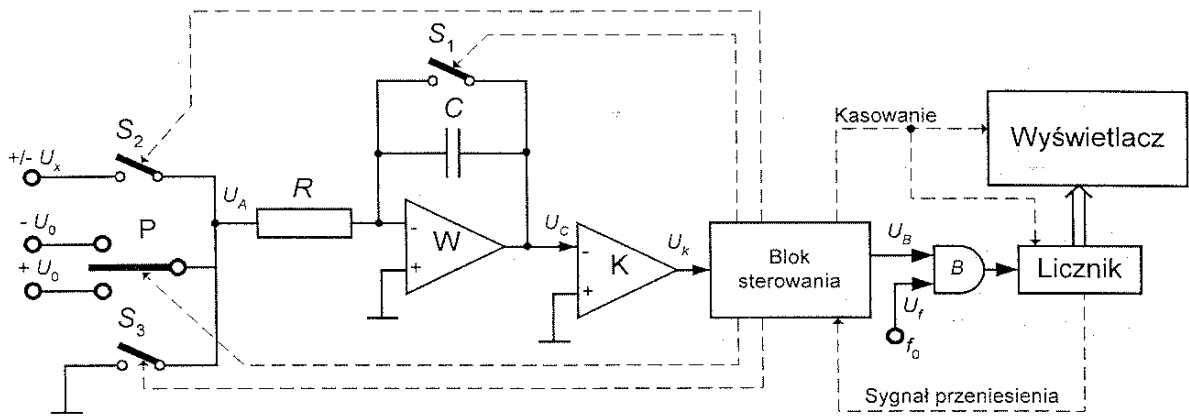
Najczęściej stosowanym w multimetrach cyfrowych małej i średniej dokładności konwerterem analogowo-cyfrowym jest konwerter A/C z dwukrotnym całkowaniem [1, 2, 5], w którym realizowane jest przetwarzanie typu „napięcie-czas-cyfra”. Atrakcyjność metrologiczna tego typu przetwarzania potwierdza się w bardziej złożonych rozwiązaniach konwerterów o wielokrotnym całkowaniu [1], spośród których do najdokładniejszych należą konwertery typu „delta-sigma” ($\Delta-\Sigma$) [2]. Przetwornik A/C budowany jest na napięcie zakresowe możliwie największe, stosowane w elektronice. Typowa wartość napięcia wynosi ± 10 V lub ± 12 V. Do wyjątków [2] należą monolityczne, tanie konwertery z dwukrotnym całkowaniem, realizowane na napięcie 2 V.

Proces przetwarzania analogowo-cyfrowego składa się z kilku etapów co ilustruje rys.1.4. W chwili t_0 , na krótko zamykany jest łącznik S_1 w celu rozładowania kondensatora C integratora, zbudowanego z wykorzystaniem wzmacniacza W . Następnie, w chwili t_1 , poprzez zamknięty łącznik S_2 , do wejścia integratora dołączane jest mierzone napięcie U_x ; jednocześnie **Blok**

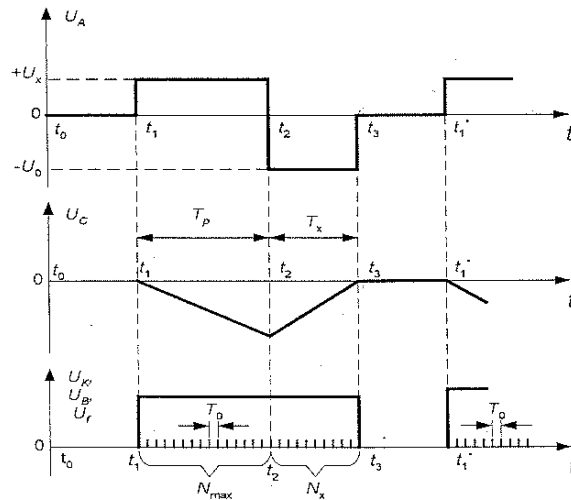
sterowania sygnałem U_B otwiera bramkę **B** dla impulsów generatora zegarowego o częstotliwości f_0 , które są zliczane przez **Licznik** w czasie T_p , przy czym:

$$T_p = t_2 - t_1 = \frac{N_{\max}}{f_0}, \quad (1.1)$$

gdzie N_{\max} - pojemność licznika.



Rys.1.3. Schemat przetwornika analogowo-cyfrowego z dwukrotnym (podwójnym) całkowaniem.



Rys.1.4. Przebiegi czasowe sygnałów w przetworniku analogowo-cyfrowym z dwukrotnym całkowaniem

W chwili t_2 licznik jest przepelniony a **Blok sterowania** zamyka łącznik S_2 i z pomocą przełącznika **P** do wejścia integratora dołącza napięcie referencyjne U_0 o przeciwnym znaku niż znak mierzonego napięcia U_x . Napięcie wyjściowe U_C integratora maleje liniowo i w chwili t_3 osiąga poziom zerowy, co sygnalizuje komparator **K** kończąc cykl przetwarzania.

Z bilansu ładunków zgromadzonych w kondensatorze C integratora wynika, że

$$\frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} U_x dt = \frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} U_0 dt, \quad (1.2)$$

a stąd, po przyjęciu $t_3 - t_2 = T_x$, otrzymujemy, że czas rozładowania integratora opisuje wzór (1.3)

$$T_x = T_p \frac{U_x}{U_0}, \quad (1.3)$$

świadczący o ilorazowym charakterze konwersji. W czasie rozładowania integratora T_x licznik zliczy $N_x = f_0 T_x$ impulsów, zaś w czasie T_p odpowiednio $N_{\max} = f_0 T_p$ impulsów. Dlatego rezultat przetwarzania a więc związek opisany wzorem (1.3), zapisujemy ostatecznie w postaci wzoru (1.4):

$$N_x = N_{\max} \frac{U_x}{U_0}. \quad (1.4)$$

W chwili t_3 **Licznik** jest kasowany a **Blok sterowania** inicjuje nowy cykl przetwarzania, który rozpoczyna się od dołączenia wejścia integratora, z pomocą łącznika S_3 , do masy układu.

Zalety zaprezentowanego algorytmu konwersji analogowo-cyfrowej to:

- duża dokładność wynikająca z nieobecności parametrów R i C integratora oraz częstotliwości f_0 generatora zegarowego we wzorach (1.3) i (1.4),
- duża czułość,
- możliwość pomiaru stosunku dwóch napięć,
- niewrażliwość na zakłócenia szeregowe,
- stosunkowo prosta budowa.

Podstawowe błędy przetwarzania wynikają [8] z nieidealności łączników S_2 i P , nieliniowości integratora, dryftów wzmacniacza i komparatora, ograniczonego pasma wzmacniacza oraz błędów kwantowania podczas pomiaru czasu T_x .

Omawiany algorytm okazał się perspektywiczny dla implementacji w postaci monolitycznych przetworników A/C (np. ICL 7106 lub ICL 7109) [1, 2], powszechnie wykorzystywanych w konstrukcjach multimetrów cyfrowych podręcznych i laboratoryjnych.

Warto podkreślić, że w przypadku gdy napięcie mierzone U_x zmienia się w czasie T_p kod N_x odpowiada wartości średniej tego napięcia.

1.2. Tłumienie zakłóceń szeregowych

Całkowanie napięcia wejściowego może służyć do wyeliminowania wpływu okresowych napięć zakłócających. W praktyce zakłócenia najczęściej pochodzą od sieci energetycznej o częstotliwości 50 Hz (okres $T = 20$ ms w Europie) lub 60 Hz (okres $T \approx 16,7$ ms w USA). Rozważmy proces tłumienia zakłóceń sinusoidalnych $u_z(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ nałożonych na napięcie stałe U_x . Napięcie wejściowe przetwornika (rys.1.3) wynosi:

$$u(t) = U_x + U_m \sin(\omega t + \varphi). \quad (1.5)$$

Przez całkowanie (1.5) w czasie T_p otrzymuje się wartość średnią \bar{u} :

$$\bar{u} = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} u(t) dt = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} [U_x + U_m \sin(\omega t + \varphi)] dt. \quad (1.6)$$

Obliczając całkę oznaczoną otrzymujemy, że

$$\bar{u} = U_x + \frac{U_m}{\omega T_p} [\cos \varphi - \cos(\omega T_p + \varphi)] = U_x + \frac{U_m T}{2\pi T_p} \left[\cos \varphi - \cos \left(2\pi \frac{T_p}{T} + \varphi \right) \right], \quad (1.8)$$

gdzie $\omega = 2\pi/T$.

Jeśli długość czasu całkowania T_p jest dokładnie równa okresowi T zakłócenia lub jego wielokrotności, t.j. $T_p = nT$ (gdzie $n = 1, 2, 3, \dots$), to ostatni składnik wzoru (1.8) przyjmuje wartość zero i $\bar{u} = U_x$. Jednak w realnych przyrządzie pomiarowym utrzymanie ścisłej synchronizacji czasu pomiaru z okresem zakłócenia nie jest możliwe. Błąd bezwzględny Δ_z wywołany tą przyczyną jest wyrażony wzorem:

$$\Delta_z = \bar{u} - U_x = \frac{U_m}{2\pi \cdot n} [\cos \varphi - \cos(2\pi \cdot n + \varphi)]. \quad (1.9)$$

Błąd ten wyrażany jest w skali logarytmicznej (decybelowej) w postaci współczynnika *NMRR* (ang. *normal mode rejection ratio*):

$$\text{NMRR} = 20 \log \frac{U_m}{\Delta_z} = 20 \log \frac{2\pi \cdot n}{\cos \varphi - \cos(2\pi \cdot n + \varphi)}. \quad (1.10)$$

Stosując wzór na różnicę kosinusów przekształcamy wzór (1.10) do postaci:

$$\text{NMRR} = 20 \log \pi \cdot n - 20 \log(\sin \pi \cdot n + \varphi) \sin \pi \cdot n. \quad (1.11)$$

Drugi składnik wyrażenia (1.11) zmienia się - w zależności od czasu pomiaru T_p , okresu T zakłócenia i jego fazy φ - w granicach: od 0 przy $T_p = \frac{1}{2}(2n+1)T$ i $\varphi = 0$ do ∞ przy $T_p = nT$. Istnieje taka wartość niezależnego argumentu φ , dla której $\sin(\pi n + \varphi) = 1$. NMRR przyjmuje wówczas wartość minimalną

$$\text{NMRR} = 20 \log \frac{\pi \cdot n}{|\sin \pi \cdot n|}. \quad (1.12)$$

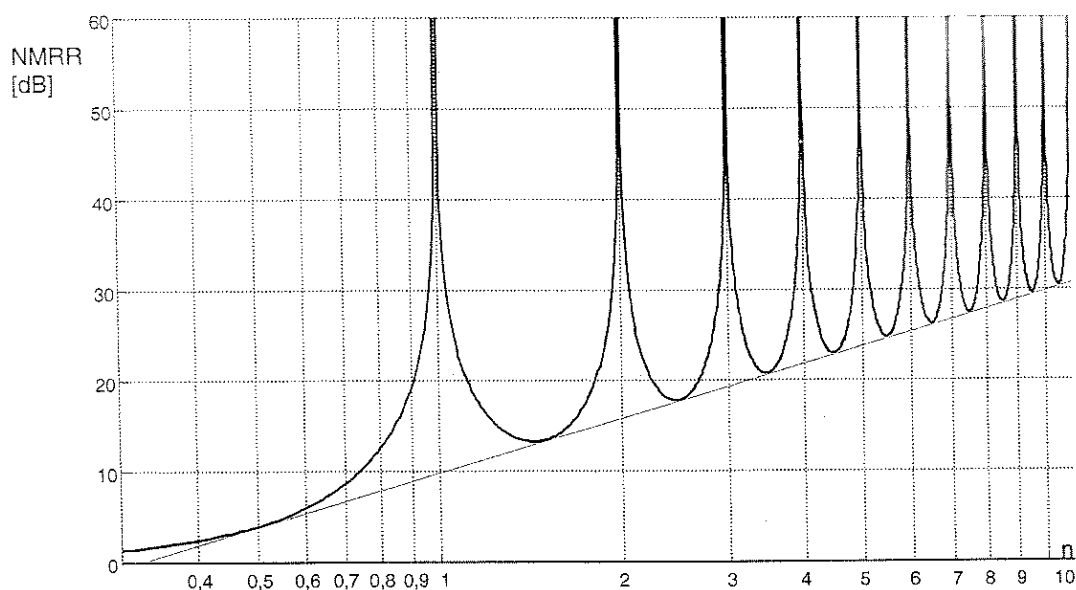
Krzywa ilustrująca wartości NMRR, w zależności od n , jest przedstawiona na rys.1.5. Pierwszy składnik wzoru (1.11), w skali logarytmicznej, przedstawia sobą prostą o nachyleniu 20 dB na dekadę. Na rys.1.5 ta prosta jest przedstawiona linią pogrubioną.

Analiza wzoru (1.12) pokazuje, że nawet przy nieznaczej odchyłce częstotliwości zakłócenia od wartości nominalnej NMRR gwałtownie maleje. Niedokładność utrzymania równości lub krotności T_p i T można zapisać w postaci:

$$n = \frac{T_p}{T} = n_0(1 \pm \gamma), \quad (1.13)$$

gdzie $n_0 = 1, 2, 3, \dots$ oraz $\gamma \ll 1$. Podstawiając (1.13) do (1.12) otrzymujemy:

$$\text{NMRR} = 20 \log \frac{\pi \cdot n_0(1 \pm \gamma)}{|\sin \pi \cdot n_0(1 \pm \gamma)|}. \quad (1.14)$$



Rys 1.5 Wykres współczynnika tłumienia zakłóceń szeregowych (NMRR) w integracyjnym przetworniku A/C

Po uwzględnieniu, że

$$|\sin \pi \cdot n_0 (1 \pm \gamma)| = |\pm (-1)^n \sin \pi \cdot n_0 \gamma| \approx |\pi \cdot n_0 \gamma| \quad (1.15)$$

ostatecznie otrzymujemy

$$\text{NMRR} = 20 \log \frac{\pi \cdot n_0 (1 \pm \gamma)}{|\pi \cdot n_0 \gamma|} = 20 \log \frac{1 \pm \gamma}{|\gamma|} = 20 \log \left(\frac{1}{|\gamma|} \pm 1 \right) \quad (1.16)$$

Z wzoru (1.16) wynika, że przy $\gamma = 0,01$, NMRR zmniejsza się do 40,1 dB, zaś przy $\gamma = -0,01$ NMRR zmniejsza się do 39,9 dB.

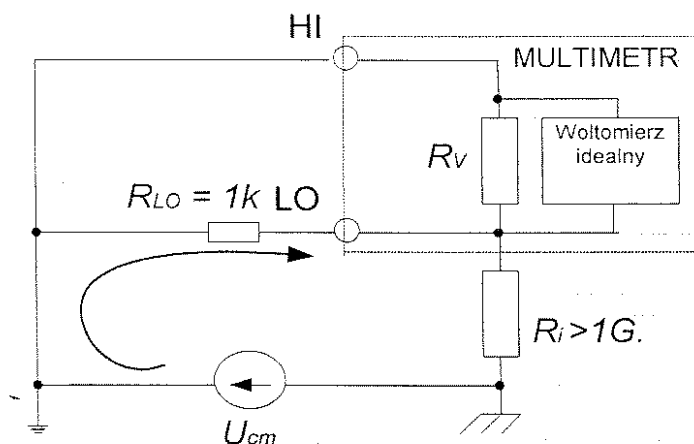
Warto podkreślić, że dla niewielkich odchyłeń n od wartości całkowitych (1.13), zwiększenie T_p nie daje zauważalnego wzrostu NMRR. Tak więc powszechnie głoszony pogląd, że wydłużenie czasu całkowania zwiększa NMRR nie dotyczy przypadków małych odchyłeń n od wartości całkowitych. Dlatego w woltomierzach laboratoryjnych wprowadza się specjalne uzależnienie [8] częstotliwości f_0 generatora zegarowego od częstotliwości f napięcia sieciowego, które jest najczęściej źródłem zakłóceń.

1.3 Tłumienie zakłóceń równoległych

Jeśli źródło napięcia mierzonego i multimetr mają różne potencjały odniesienia (masy, uziemienia) to na wejście multimetru oddziałuje tzw. napięcie wspólne U_{cm} zwane też równoległym lub synfazowym (ang. *common mode*).

Tłumienie zakłóceń równoległych CMRR (ang. *Common Mode Rejection Ratio*) zależy od rezystancji izolacji R_i między bierną końcówką wejściową „LO” woltomierza i jego masą. Jak wynika ze schematu z rys.1.6, napięcie zakłóceń równoległych, ze względu na dużą rezystancję wejściową R_V woltomierza, jest przetwarzane w napięcie zakłóceń szeregowych w postaci spadku napięcia na rezystancji R_{LO} , tworzącej dzielnik napięcia z rezystancją izolacji R_i . Tłumienie zakłóceń równoległych przez obwód wejściowy woltomierza zależy od stosunku rezystancji R_i do rezystancji R_{LO} , czyli

$$CMRR = \frac{R_i}{R_{LO}} \quad (1.17)$$



Rys.1.6 Schemat zastępczy obwodu wejściowego woltomierza wraz ze źródłem zakłóceń równoległych U_{cm}

Dla typowych wartości $R_i = 10^9 \Omega$ CMRR, przy prądzie stałym, jest równy 120 dB. Efektywny współczynnik tłumienia cyfrowego multimetru (najbardziej interesujący użytkownika) jest iloczynem współczynników CMRR i NMRR.

1.4. Podstawowe parametry multimetrów cyfrowych

Multimetry cyfrowe napięcia i prądu stałego budowane są jako przyrządy wysokiej dokładności, realizujące pomiary w szerokim zakresie dynamicznym. Posiadają one wielocyfrowe urządzenia odczytowe, w postaci ciekłokrystalicznych wyświetlaczy alfanumerycznych lub diodowych. Zrozumienie zapisów zawartych w dokumentacji multimetru jest niezbędne dla jego prawidłowego wykorzystania.

1.4.1. Liczba cyfr wyświetlacza, rozdzielczość i czułość multimetru

Rozdzielczość multimetru cyfrowego jest zdeterminowana przez liczbę m stanów (znaków) ze zbioru od 0 do 9 możliwych do wyświetlenia na każdej pozycji urządzenia odczytowego (wyświetlacza).

Woltomierz o trzech cyfrach może wyświetlić następujące maksymalne wskazania: 999V; 99,9V; 9,99V; 0,999V (1000 różnych stanów), w zależności od wybranego zakresu. Woltomierz wyświetlający dodatkowo jeszcze jedną cyfrę ale z niepełnego zbioru cyfr, np. cyfra na najbardziej znaczącej pozycji przyjmuje tylko wartości 0 i ± 1 nazywa się $m \frac{1}{2}$ cyfrowym, np. $3 \frac{1}{2}$ -cyfrowym, $4 \frac{1}{2}$ -cyfrowym, $6 \frac{1}{2}$ -cyfrowym itd. Wprowadzenie dodatkowej „niepełnej” cyfry rozszerza zakres pomiarowy woltomierza. Pozwala więc, bez zmniejszenia dokładności, mierzyć napięcia nieznacznie przekraczające wybrany zakres.

Przykład 1

W $4 \frac{1}{2}$ cyfrowym woltomierzu na zakresie 10 V graniczna wartość wskazań wynosi 11,999 V (20% poszerzenie zakresu i wyświetlanie 12000 różnych stanów). Jeżeli mierzone napięcie zmienia się w granicach od 9,93 V do 10,21 V to 4-cyfrowy woltomierz o zakresie 10 V daje maksymalne wskazanie 9,999 V. Tak więc wartość 9,93 V będzie wyświetlona prawidłowo, zaś wartość 10,21 V będzie eksponowana jako 9,999 V. Jeśli przełączyć

woltomierz na zakres 100 V to wskazanie 10,21 V będzie na początku zakresu, a więc o 0,021 V przesunie się - cyfrowym woltomierzu obydwie wartości (9,93 V i 10,21 V) będą wyświetlone, przy czym przesunięcie będzie w przybliżeniu taki sam.

W prostszych multimetrach jest spotykane oznaczenie $\frac{3}{4}$, (np. $3\frac{3}{4}$) - definiujące maksymalne wskazanie jako 3999 (4000 stanów). Właśnie liczba stanów, a nie liczba cyfr, jest podawana w katalogach multimetrów podręcznych jako tzw. wielkość skali.

Liczba cyfr lub wielkość skali jednoznacznie definiuje rozdzielczość multimetru. **Rozdzielczość** jest więc ilorazem najmniejszej wartości jaka może być wyświetlana 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*, w *ppm*-ach - częściach milionowych (ang. *parts per milion*), *bitach* lub *liczbie cyfr* (ang. *digits*) wyświetlacza.

Przykład 2

Multimetr $6\frac{1}{2}$ -cyfrowy może znajdować się w 1200000 stanach (od 0 do 1199999), zatem jego rozdzielczość wynosi: 0,0001%, 1 ppm, 21 bitów (2^{20} + bit znaku). Wszystkie te wyrażenia rozdzielczości są sobie równoważne.

Z rozdzielczością jest związana **czułość** multimetru, która wyraża zmianę poziomu sygnału wejściowego rejestrowaną przez przyrząd. Czuość jest zazwyczaj podawana w jednostkach wielkości mierzonej. Na przykład czułość przy pomiarze napięcia może mieć wartość 1 μ V, co oznacza, że zmiana napięcia wejściowego o mniej niż 1 μ V nie wpłynie na wskazanie.

Przykład 3

Multimetr $6\frac{1}{2}$ -cyfrowy na zakresie pomiarowym 1 V ma czułość 1 μ V, ale taką samą czułość ma również multimetr $4\frac{1}{2}$ -cyfrowy na zakresie 10 mV oraz $5\frac{1}{2}$ -cyfrowy na zakresie 200 mV.

Określenie czułości nie jest równoznaczne z określeniem najmniejszej mierzonej wartości. Z faktu, że multimetr reaguje na zmianę napięcia 1 μ V nie wynika że może mierzyć napięcia na poziomie mikrowoltów. Tak się dzieje dlatego, że rzeczywisty zakres pomiarowy może nie pokrywać się z zakresem nominalnym, a to oznacza, że dolna granica zakresu pomiarowego jest równa np. 1% granicy górnej.

1.4.2. Dokładność multimetru

Warto na wstępie podkreślić, że **dokładność** (ang. *accuracy*) multimetru i liczba cyfr są wzajemnie powiązane. Generalnie im większa rozdzielczość tym większa dokładność. Dokładność multimetru cyfrowego jest specyfikowana na wiele sposobów:

- jako procent ($\pm a\%$) wartości wskazanej (ang. *of reading*) plus procent ($\pm b\%$) wartości zakresowej (ang. *of range*), np. $\pm(0,05\%U_x + 0,02\%U_z)$,
- jako procent ($\pm a\%$) wartości wskazanej plus liczba (z) najmniej znaczących cyfr (ang. *digits*) widocznych na wyświetlaczu na danym zakresie, np. $\pm(0,02\%U_x + z)$.

Procent z wartości wskazanej ma największe znaczenie, gdy wskazanie jest zbliżone do pełnego zakresu miernika, natomiast w sytuacji odwrotnej na błąd najbardziej wpływa procent z wartości zakresowej. Dokładność bywa też podawana w *ppm*-ach, np. $\pm(25ppm U_x + 5ppm U_z)$.

Przykład 4

Woltomierz $6\frac{1}{2}$ -cyfrowy o zakresie 10 V wskazał napięcie 11,65435 V (możliwość 20% przekroczenia zakresu). Dokładność woltomierza jest podana w postaci: $\pm(0,0015\% \text{ of reading} + 0,0004\% \text{ of range})$. Obliczyć bezwzględny i względny błąd pomiaru oraz zapisać jego wynik z uwzględnieniem zasad zaokrąglania błędów i wyniku.

Obliczamy bezwzględny i względny błąd pomiaru z liczbą cyfr znaczących na jaką pozwala kalkulator:

$$\Delta = \frac{0,0015\%}{100} 11,65435 \text{ V} + \frac{0,0004\%}{100} 10 \text{ V} = 0,000174815 \text{ V} + 0,00004 \text{ V} = 0,00021815 \text{ V}$$

$$\gamma = \frac{0,00021815 \text{ V}}{11,65435 \text{ V}} 100\% = 0,001843217\%$$

Ponieważ pierwsza znacząca cyfra błędu bezwzględnego jest mniejsza od 3 to w wartości błędu zachowujemy dwie cyfry znaczące, a więc przy stosowaniu zasad zaokrąglania stosowanych w matematyce otrzymujemy:

$$\Delta \approx 0,00022 \text{ V} = 0,22 \text{ mV}.$$

Również z tego samego powodu w wyrażeniu błędu względnego powinny być zachowane dwie znaczące cyfry, czyli $\gamma = 0,0018\%$.

Uzyskany wynik pomiaru (11,65435 V) zaokrąglamy do tej wartości dziesiętnej, którą kończy się zaokrąglenie błędu bezwzględnego. W rozważanym przypadku wskazanie woltomierza pozostawiamy bez zmian.

Tak więc odpowiedź eksperymentatora powinna brzmieć: pomiar napięcia wykonano z błędem względnym $\gamma = 0,0018\%$; napięcie mierzone ma wartość $U_x = (11,65435 \pm 0,00022) \text{ V}$ lub $U_x = 11,65435 \text{ V} \pm 0,22 \text{ mV}$.

Przykład 5

Podręczny multimetr $4\frac{1}{3}$ -cyfrowy (50000 jednostek), którego znormalizowana dokładność ma postać: $\pm(0,2\% \text{ of reading} + 2 \text{ digits})$ na zakresie 5,0000 V wskazał napięcie $U_x = 2,5642 \text{ V}$. Obliczyć bezwzględny i względny błąd pomiaru oraz zapisać jego wynik z uwzględnieniem zasad zaokrąglania błędów i wyniku.

Najpierw ustalamy wagę najmniej znaczącej cyfry multimetru; w tym wypadku wynosi ono 0,1 mV. Następnie obliczamy bezwzględny i względny błąd pomiaru z liczbą cyfr znaczących na jaką pozwala kalkulator

$$\Delta = \frac{0,2\%}{100} 2,5642 \text{ V} + 2 \times 0,1 \text{ mV} = 0,0051284 \text{ V} + 0,0002 \text{ V} = 0,0053284 \text{ V}$$

$$\gamma = \frac{0,0053284 \text{ V}}{2,5642 \text{ V}} 100\% = 0,20779904\%$$

Ponieważ pierwsza znacząca cyfra błędu bezwzględnego jest większa od 3 to w wartości błędu zachowujemy jedną cyfrę znaczącą, a więc przy uwzględnieniu zasad zaokrąglania stosowanych w matematyce otrzymujemy:

$$\Delta \approx 0,005 \text{ V}$$

W wartości błędu względnego pierwsza znacząca cyfra wynosi 2, a więc jest mniejsza od 3 i dlatego tu powinny być zachowane dwie cyfry znaczące. Stosując reguły zaokrąglania otrzymujemy, że błąd względny:

$$\gamma = 0,21\%.$$

Uzyskany wynik pomiaru (2,5642V) zaokrąglamy do tej wartości dziesiętnej, którą kończy się zaokrąglenie błędu bezwzględnego. W rozważanym przypadku $U_x = 2,564 \text{ V}$

Tak więc odpowiedź eksperymentatora powinna brzmieć: pomiar napięcia wykonano z błędem względnym $\gamma = 0,21\%$; napięcie mierzone ma wartość $U_x = (2,564 \text{ V} \pm 0,005) \text{ V}$ lub $U_x = 2,564 \text{ V} \pm 5 \text{ mV}$.

1.4.3 Szybkość wykonywania pomiarów

O szybkości pomiaru multimetrem cyfrowym decyduje przede wszystkim czas przetwarzania t_p integracyjnego przetwornika A/C. Jak wynika z rys.1.4 czas ten ma trzy składowe: czas całkowania T_p napięcia mierzonego, czas $T_x \leq 2T_p$ całkowania napięcia referencyjnego i czas $t_r = (t_1 - t_0) \leq T_p$ rozładowania kondensatora C integratora. Tak więc całkowity czas przetwarzania przetwornika wynosi:

$$t_p = 4T_p. \quad (1.17)$$

Wybierając czas T_p pod kątem tłumienia zakłóceń szeregowych (patrz p.1.3) otrzymujemy, dla napięcia zakłócającego o częstotliwości 50 Hz ($T = 20$ ms), czas przetwarzania $t_p = 80$ ms, a więc szybkość równa 12,5 pomiarów na sekundę.

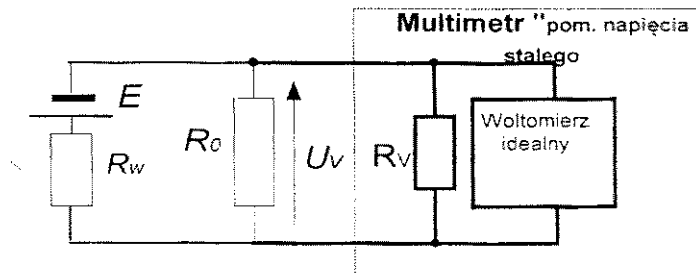
Większość dostępnych na rynku multimetrów posiada zdolność jednoczesnego tłumienia zakłóceń szeregowych o częstotliwościach 50 Hz i 60 Hz. Zdolność tę osiąga się przez wydłużenie czasu T_p do 100 ms (5 okresów zakłócenia 50 Hz i 6 okresów zakłócenia 60 Hz). W tych multimetrach $t_p = 400$ ms, zaś ich szybkość jest równa 2,5 pomiarów na sekundę.

Warto zauważyć, że multimetr z czasem integracji $T_p = 100$ ms będzie skutecznie tłumił zakłócenia szeregowo o częstotliwościach krotnych 10 Hz, t.j. 10, 20, 30, 40, 50, 60..... itd. herców.

2 POMIARY MULTIMETREM

2.1 Pomiar napięcia

Skończona rezystancja wejściowa R_V jest przyczyną tego, że multimetr pobiera pewien prąd z obwodu kontrolowanego. Zagadnienie to można zilustrować obwodem pokazanym na rys.2.1, na którym R_w jest rezystancją źródła napięcia o sile elektromotorycznej E , R_0 jest rezystancją wejściową multimetru skonfigurowanego do pomiarów napięcia, zaś R_l rezystancją obciążenia źródła.



Rys.2.1 Schemat ilustrujący wpływ rezystancji wewnętrznej R_V multimetru na pomiar napięcia

Łatwo wykazać, że napięcie U_V wskazywane przez idealny woltomierz wyraża się wzorem (2.1).

$$U_V = E \frac{R_0}{R_w + R_0 + \frac{R_w R_l}{R_V}} \quad (2.1)$$

Wpływ rezystancji R_V na wynik pomiaru (błąd metody) będzie pomijalnie mały tylko wtedy, gdy wartość rezystancji R_V będzie spełniała warunek: $R_V \gg R_w R_l$. Wtedy

$$U_V \approx E \frac{R_0}{R_w + R_0} \quad (2.2)$$

Uwzględniając (2.1) i (2.2) otrzymujemy zależność (2.3) na względny błąd metody γ wywołany skończoną wartością rezystancji R_V woltomierza:

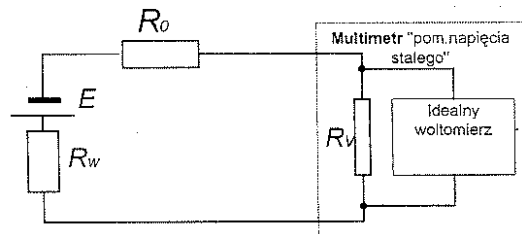
$$\gamma_U = -\frac{R/R_V}{1 + R/R_V}, \quad (2.3)$$

gdzie $R = \frac{R_w R_0}{R_w + R_0}$ jest rezystancją zastępczą obwodu widzianą z zacisków woltomierza. Gdy $R_V \gg R$ to ułamek w mianowniku może być pominięty, wówczas

$$\gamma_U = -R/R_V. \quad (2.3)$$

2.2 Wyznaczenie rezystancji wejściowej R_V woltomierza

Rezystancję wejściową R_V woltomierza można wyznaczyć korzystając z układu jak na rys.2.2 składającego się ze źródła napięcia E o pomijalnie małej rezystancji $R_w \cong 0$, rezystora R_0 o dużej wartości (np. 1 M Ω) i multimetru z wybraną funkcją „pomiar napięcia stałego”.



Rys.2.3 Schemat ilustrujący metodę wyznaczania rezystancji R_V wejścia napięciowego multimetru

Mierząc napięcie E (bez rezystora R_0) i napięcia U_V (z włączonym rezystorem R_0) możemy napisać:

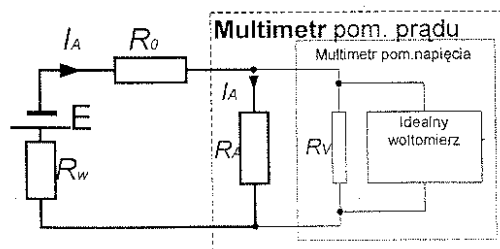
$$U_V = E \frac{R_V}{R_0 + R_V}. \quad (2.4)$$

Po przekształceniach ostatniego wzoru otrzymujemy:

$$R_V = R_0 \frac{U_V}{E - U_V}. \quad (2.5)$$

2.3 Pomiar prądu

Przy pomiarze prądu problemem może okazać się zbyt duża rezystancja R_A wejścia prądowego multimetru (patrz rys.1.3). Ilustruje to schemat pokazany na rys.2.3.



Rys.2.3 Schemat ilustrujący wpływ rezystancji R_A amperomierza na dokładność pomiaru prądu

Prąd płynący przez wejście prądowe multimetru wynosi:

$$I_A = \frac{E}{R_w + R_0 + R_A} \quad (2.4)$$

Przy spełnieniu warunku, że $R_A \ll R_w + R_0 = R$ otrzymujemy:

$$I_A \approx \frac{E}{R}. \quad (2.5)$$

Łatwo wykazać, że w tym przypadku względny błąd metody γ_A szacujemy z wzoru:

$$\gamma_A = -\frac{R_A/R}{1 + R_A/R} \approx -\frac{R_A}{R}. \quad (2.6)$$

Warto zaznaczyć, że producenci multimetrów dość często, 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.

2.4 Wyznaczenie rezystancji wewnętrznej źródła

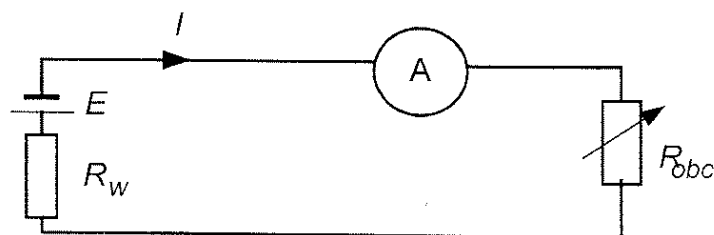
Mierząc prądy I_1 oraz I_2 w obwodzie z rys.2.4, przy zaniedbaniu rezystancji amperomierza, dla dwóch różnych obciążeń R_{obc1} i R_{obc2} otrzymujemy układ dwóch równań:

$$I_1 = \frac{E}{R_w + R_{obc2}}, \quad (2.7a)$$

$$I_2 = \frac{E}{R_w + R_{obc1}}, \quad (2.7b)$$

którego rozwiązaniem jest wzór (2.8) na rezystancję wewnętrzną źródła:

$$R_w = \frac{I_2 R_{obc2} - I_1 R_{obc1}}{I_1 - I_2}. \quad (2.8)$$



Rys.2.4 schemat obwodu ilustrujący sposób wyznaczenia rezystancji wewnętrznej źródła

Jeżeli dysponujemy woltmierzem o bardzo dużej rezystancji wejściowej R_{in} ($R_{in} \gg R_w$) możemy użyć go do pomiarów napięcia bezpośrednio na zaciskach źródła i przyjąć, że jego wskazanie U_V jest równe sem. E , tzn. $U_V \cong E$. Wówczas, po zmierzeniu prądu I przy obciążeniu R_{obc} , rezystancję wewnętrzną R_w źródła obliczamy z wzoru (2.9):

$$R_w = \frac{E}{I} - R_{obc} \quad (2.9)$$

Warto zaznaczyć, że np. w radiotechnice lub telekomunikacji impedancję wyjściową Z_{out} generatorów napięcia zmiennego wyznacza się poprzez pomiar napięcia na ich zaciskach

dwukrotnie: w stanie jałowym i pod takim obciążeniem, przy którym to napięcie zmniejsza się dwukrotnie. Wówczas przyjmuje się, że $Z_w = R_{obc}$.

2. OPIS STANOWISKA LABORATORYJNEGO

Podstawowym przyrządem na stanowisku laboratoryjnym jest 5 1/2 cyfrowy multimetr firmy Agilent Technologies typu 34405A, wyposażony w funkcje pomiaru: napięcia stałego i zmiennego, prądu stałego i zmiennego, rezystancji przy prądzie stałym, częstotliwości, pojemności i temperatury. Multimetr może pracować w trybie ręcznego lub automatycznego wyboru zakresu pomiarowego. Tryb wyboru zakresu i funkcje pomiarowe mogą być programowane za pomocą przycisków (klawiszy), znajdujących się na płycie czołowej lub zdalnie (ang. *remote*) z komputera, poprzez wbudowany interfejs USB.

Parametry metrologiczne multimetru zawarte są w jego dokumentacji firmowej, przestudiowanie której - w zakresie wykorzystywanych funkcji pomiarowych (str.131) - zaleca się ćwiczącym w czasie trwania ćwiczenia lub wcześniej.

Na stanowisku znajduje się również zasilacz laboratoryjny, typu QUAD POWER SUPPLY KB- 6118 produkcji Zakładu Doświadczalnego „Cobrabit”, składający się z 4-ch niezależnych sekcji, które można łączyć szeregowo lub równolegle. Każda z sekcji wytwarza napięcie stałe z zakresu $(0 \div 20)$ V oraz umożliwia ograniczenie oddawanego prądu do 30 mA, 100 mA, 300 mA, 1 A. Napięcie wyjściowe jest regulowane płynnie w dwóch podzakresach $(0,05 \div 10)$ V oraz $(10 \div 20)$ V. Zasilacz posiada wbudowany cyfrowy woltomierz/ampieromierz pozwalający - w przybliżeniu - określić wartość nastawionego napięcia poszczególnych sekcji lub pobieranego z nich prądu.

W skład stanowiska wchodzi wysokoomowy, precyzyjny, nastawny rezystor: „MAGAZIN SOPROTIWLENIIA IZMIERITIEJNYJ” P002 oraz 6 – ścio dekadowy rezystor klasy 0,02 ze stopniem najniższej dekady 0,1 Ω oraz przewody montażowe.

4. ZADANIA POMIAROWE

4.1 Przygotowanie zasilacza

Przed włączeniem zasilacza (przycisk „MAINS” wciśnięty) należy:

- wybrać sekcję zasilacza wciskając jeden z klawiszy; A, B, C, lub D,
- połączyć ze sobą zaciski oznaczone jako „+” i „-” wybranej sekcji,
- ustawić przełącznik VOLTS w pozycji „wyciśnięty” -zakres napięcia wyjściowego $(0 \div 10)$ V, zaś pokrętkę płynnej regulacji napięcia wyjściowego w lewe skrajne położenie,
- wcisnąć jeden z klawiszy przełącznika AMPERS umożliwiającego ustawienie ograniczenia prądowego (najlepiej 0,3 lub 0,1),
- ustawić klawisz „ $\frac{A}{V}$ ” w pozycji „wyciśnięty” umożliwiającej orientacyjny pomiar napięcia wybranej sekcji przez wewnętrzny woltomierz cyfrowy z wyświetlaczem ciekłokrystalicznym,
- obserwując wskazanie woltomierza ustawić napięcie wyjściowe sekcji na wartość około 1 V.

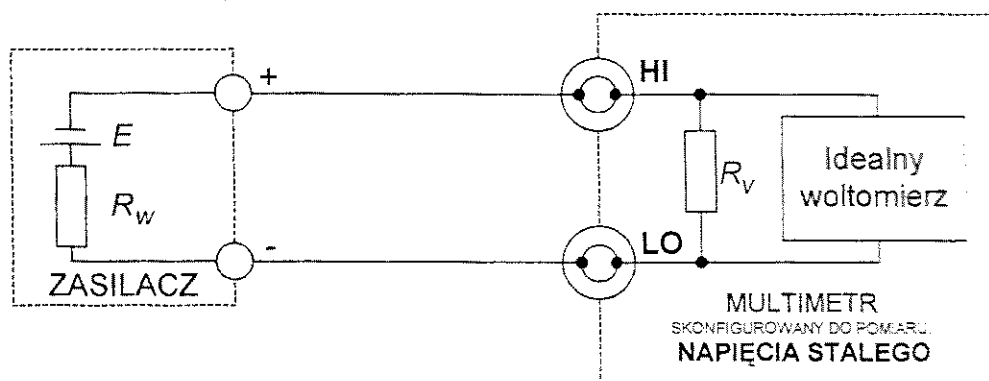
4.2 Przygotowanie multimetru

- włączyć multimetr wciskając przycisk „Power” i wprowadzić go w tryb ręcznego wyboru zakresu wciskając przycisk „Shift” oraz „Range”,

- klawiszami „Range” wybrać zakres 1 V DC, co sygnalizowane jest na dodatkowym polu wyświetlacza multimetru,
- wciskając kolejno klawisze „Shift” i 4 „Digits” wybrać $4\frac{1}{2}$ cyfrową rozdzielczość multimetru,

4.3 Pomiar napięcia wyjściowego zasilacza stabilizowanego

a) Połączyć układ pomiarowy zgodnie z rys. 4.1.



4.1 Schemat połączeń układu do pomiaru napięcia wyjściowego zasilacza stabilizowanego

b) Sprawdzić rozdzielczości multimetru:

- regulując (delikatnie) napięcie wyjściowe zasilacza uzyskać i zanotować maksymalne wskazanie $U_{x\max} = \dots\dots\dots$ multimetru na wybranym zakresie; obliczyć procentową i bitową rozdzielczość przyrządu,
- wciskając kolejno klawisze „Shift” i 5 „Digits” wybrać $5\frac{1}{2}$ cyfrową rozdzielczość multimetru oraz postępując analogicznie jak wyżej określić dla tego przypadku procentową i bitową rozdzielczość przyrządu,
- dla obydwu powyższych przypadków podać wartość napięcia odpowiadającą zmianie wskazania o jedną cyfrę na najniższej pozycji wyświetlacza.

c) Określić histerezę automatycznego przełączania zakresu multimetru:

- wciskając kolejno przyciski „Shift” oraz „Auto” przełączyć multimetr w tryb automatycznego wyboru zakresu pomiarowego,
- regulując delikatnie napięcie wyjściowe zasilacza zaobserwować i zanotować wskazania multimetru (górne i dolne), przy których następuje automatyczna zmiana zakresu z 1 V na 10 V oraz z 10 V na 1 V,
- postępując analogicznie jak powyżej wyznaczyć histerezę napięć przy przełączaniu zakresu z 1 V na 100 mV oraz ze 100 mV na 1 V.

c) Dokonać wielokrotnych pomiarów napięcia wyjściowego zasilacza:

- liczbę pomiarów i przybliżoną wartość mierzonego napięcia zasilacza uzgodnić z prowadzącym ćwiczenia;
- multimetr ustawić w tryb ręcznego wyboru zakresu,
- sprawdzić w dokumentacji multimetru i zanotować jaka jest rezystancja wejściowa multimetru i w jaki sposób określona jest jego dokładność,

- wyniki pomiarów i cząstkowych obliczeń zamieścić w tabeli 1.

Tabela 1

Lp.	U_{xi}	$U_{xi} - U_{xi\bar{x}}$	$(U_{xi} - U_{xi\bar{x}})^2$
	V	V	V ²
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

d) Obliczyć niepewność pomiaru napięcia wyjściowego zasilacza korzystając z następujących wzorów:

Wartość średnia napięcia z n pomiarów

$$U_{xi\bar{x}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{xi}$$

Niepewność standardowa typu A

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (U_{xi} - U_{xi\bar{x}})^2}$$

Niepewność standardowa typu B

$$u_B = \frac{\gamma_g U_{xi\bar{x}}}{100\sqrt{3}}$$

gdzie γ_g - względny błąd graniczny pomiaru napięcia multimetrem.

Niepewność standardowa łączna

$$u_r = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

Niepewność całkowita

$$u_w = k_\alpha u_r$$

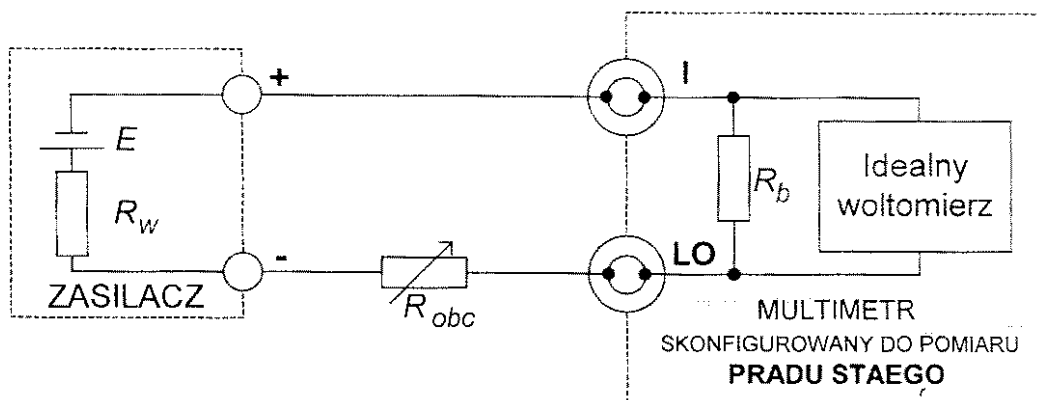
gdzie k_α - współczynnik rozszerzenia zależny od poziomu ufności.

Wartość mierzonego napięcia

$$U_x = U_{xi\bar{x}} \pm u_w$$

4.4 Wyznaczanie rezystancji wewnętrznej R_w zasilacza

Połączyć układ pomiarowy zgodnie z rys.4.2



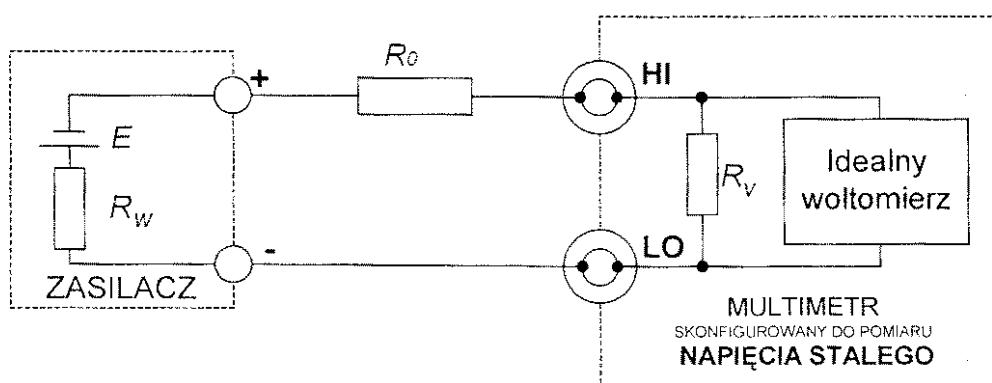
Rys.4.2 Schemat połączeń układu do pomiaru napięcia wyjściowego zasilacza stabilizowanego

Wartość rezystancji wewnętrznej zasilacza wyznaczyć metodą opisaną w p.2.4

- zabezpieczenie przeciążeniowe zasilacza ustawić na wartość 100 mA,
- w charakterze rezystora R_{obc} zastosować 6 –ścio dekadowy rezystor klasy 0,02 ze stopniem najniższej dekady 0,1 Ω ,
- multimetr wprowadzić w tryb automatycznego wyboru zakresu naciskając kolejno przyciski „Shift” oraz „Auto”,
- dla 2 –ch, dobrze przemyślanych nastaw R_{obc1} i R_{obc2} notować odpowiednie wskazania I_1 i I_2 multimetru
- obliczenia R_w wykonać z wykorzystaniem wzoru (2.8),
- zaproponować postępowanie odpowiednie dla wyznaczaniu R_w przy wykorzystaniu wzoru (2.9), i po jego zaakceptowaniu przez prowadzącego wykonać odpowiednie pomiary i obliczenia.

4.5 Wyznaczanie rezystancji R_V wejścia napięciowego multimetru

Połączyć układ pomiarowy zgodnie z rys.4.3.



Rys.4.3 Schemat połączeń układu do wyznaczania rezystancji wejściowej multimetru skonfigurowanego do pomiaru napięcia stałego.

Wartość rezystancji wejściowej multimetru przy pomiarze napięcia stałego wyznaczyć metodą opisaną w p.2.2:

- multimetr wprowadzić w tryb ręcznego wyboru zakresu naciskając kolejno przyciski „Shift” oraz „Range”.
- pomiary R_V wykonać dla trzech podzakresów multimetru: 100 mV, 1 V i 10 V,
- w charakterze rezystora R_0 zastosować wysokoomowy rezystor P002 nastawiony na wartość ok.1 M Ω ,
- dla każdego podzakresu notować zmierzone wartości E (przy zwartym rezystorze R_0) i U_V (przy włączonym rezystorze R_0),
- obliczenia R_V wykonać z wykorzystaniem wzoru (2.5),
- wyniki obliczeń porównać z danymi zawartymi w dokumentacji multimetru.

4.6 Badanie wpływu rezystancji wewnętrznej źródła na błąd metody przy pomiarze sem. E źródła

- pomiary wykonać stosując układ połączeń z rys.4.3,
- jako rezystancję źródła przyjąć rezystancję widzianą z zacisków multimetru, tzn. $(R_w + R_0)$, gdzie R_w jest rezystancją wewnętrzną zasilacza wyznaczoną w p.4.4,
- pomiary wykonać dwukrotnie: przy włączeniu R_0 między zaciski „+” i „HI” oraz „-” i „LO”,
- wykonać wykres błędu metody jako funkcji rezystancji wewnętrznej źródła (zasilacza).

Uwaga: Dla tego punktu ćwiczenia studenci samodzielnie opracowują i zamieszczają w protokole szczegółowe postępowanie, którego treść będzie oceniana przez prowadzącego przed dopuszczeniem do odrabiania ćwiczenia.

5. WYKONANIE SPRAWOZDANIA

W sprawozdaniu należy zamieścić:

- dokładne schematy połączeń układów pomiarowych z zaznaczeniem zacisków „HI”, „I” i „LO” multimetru oraz zacisków „+”, „-” i „L” zasilacza,
- charakterystykę metrologiczną użytej w ćwiczeniu aparatury uwzględniającą: zakresy pomiarowe, znormalizowaną dokładność, rezystancję wejściową amperomierza i impedancję woltomierza na używanych podzakresach,
- wzory niezbędne do przeprowadzenia obliczeń,
- krótki opis postępowania przy wykonywaniu poszczególnych pomiarów,
- tabele z częściowymi wynikami pomiarów oraz wynikami obliczeń z przykładami ilustrującymi sposób dokonywania tych obliczeń,
- wyniki pomiarów wraz z oszacowaniem ich błędów lub niepewności z uwzględnieniem przyjętych zasad zaokrąglania,
- uzyskane w wyniku pomiarów wykresy i charakterystyki wraz ze zwięzłą ich interpretacją,
- uwagi i wnioski dotyczące wykonanych pomiarów.

Literatura

- [1] Kulka Z., Libura A., Nadachowski M., Przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe, WKŁ, Warszawa 1987 r.
- [2] Van de Plassche R., Scalone przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe, WKŁ, Warszawa 1997 r.
- [3] Stabrowski M.M., Cyfrowe przyrządy pomiarowe, PWN, Warszawa 2002 r.
- [4] Sahner G., Wstęp do miernictwa cyfrowego, WKŁ, Warszawa 1982 r.
- [5] Tumański S., Technika pomiarowa, WNT, Warszawa 2007 r.
- [6] Low Level Measurements, Precision DC Current, Voltage and Resistance Measurements, Keithley, 5-th Edition.
- [7] Mirskij G.Ja., Elektronnyje imierenija, „Radio i swiaź”, Moskwa 1986
- [8] Ornatskij P.P., Awtomatyczeskije imierenija i pribory, „Wiszcza Szkoła”, Kijew 1980.

Pytania i inne problemy

1. Przeanalizować schemat blokowy multimetru z rys.1.1. i objaśnić jakie jest położenie łączników przy pomiarach: napięcia stałego i zmiennego, prądu stałego i zmiennego, rezystancji.
2. Przeanalizować i podać jakie jest ustawienie łączników w układzie kondycjonera napięcia z rys-1.2 dla zakresów pomiarowych multimetru: 100mV, 1V, 10V, 100V i 1000V, zapewniające wykorzystanie pełnego zakresu (10V) przetwornika A/C.
3. Objasnić działanie konwertera „prąd-napiecie z rys.1.3b),
4. Narysować przebiegi czasowe sygnałów w przetworniku A/C z dwukrotnym całkowaniem dla dwóch różniących się wartością napięć wejściowych U_{x1} i U_{x2} .
5. Przeprowadzić obliczenia mające na celu oszacowanie zmiany $NMRR$ wywołanej 10-krotnym wydłużeniem czasu uśredniania T_{ps} z 20 ms do 200 ms, przy odchyleniu częstotliwości napięcia zakłócającego o $\pm 2\%$ od wartości znamionowej równej 50 Hz.
6. Obliczyć szybkość pomiarów multimetru cyfrowego posiadającego zdolność tłumienia zakłóceń normalnych (szeregowych) o częstotliwości 60 Hz.
7. Korzystając z zależności (2.1) i (2.2) wyprowadzić i przeanalizować wzór na względny błąd metody, spowodowany skończeniem dużą wartością rezystancji wejściowej R_V woltomierza, występujący podczas pomiarów napięcia multimetrem cyfrowym.
8. Korzystając z zależności (2.4) i (2.5) wyprowadzić i przeanalizować wzór na względny błąd metody, spowodowany skończeniem małą wartością rezystancji wejściowej R_A amperomierza, występujący podczas pomiarów prądu multimetrem cyfrowym.
9. Stosując metodę różniczki zupełnej pokazać jak przenoszą się (propagują) błędy pomiarów prądów I_1 i I_2 oraz błędy rezystorów R_{obc1} i R_{obc2} na błąd rezystancji wewnętrznej źródła R_w wyznaczonej według wzoru (2.8).
10. Stosując metodę różniczki zupełnej pokazać jak przenoszą się (propagują) błędy pomiarów sem. E i prądu I oraz błąd rezystora R_{obc} na błąd rezystancji wewnętrznej źródła R_w wyznaczonej według wzoru (2.9).