



Katedra Nanometriologii

LABORATORIUM:
METROLOGIA ELEKTRONICZNA

1. PODSTAWOWE NARZĘDZIA POMIAROWE W ELEKTRONICE

W12IEA-SI0009L

[wzn.pwr.edu.pl/materialy-dydaktyczne/
metrologia-elektroniczna](http://wzn.pwr.edu.pl/materialy-dydaktyczne/metrologia-elektroniczna)

I. Zagadnienia do przygotowania na kartkówke:

1. Woltomierz, amperomierz, omomierz – do czego służą te przyrządy, w jaki sposób ich używamy?
2. Sposób podawania niepewności przyrządu analogowego.
3. Sposób podawania niepewności przyrządu cyfrowego.
4. Ustrój magnetoelektryczny – zasada działania, sposób budowy woltomierza oraz amperomierza. Zdefiniować pojęcia posobnik i bocznik.
5. Multimetr – typowy schemat kondycjonera sygnału wejściowego.
6. Rozdzielczość i liczba cyfr – definicje. Jaka jest najwyższa możliwa do wyświetlenia liczba na przyrządzie z wyświetlaczem $6\frac{1}{2}$ cyfry?

II. Literatura:

1. A. Chwaleba, M. Poniński, A. Siedlecki, Metrologia elektryczna, WNT, Warszawa 1998.

1. Wstęp

Wydana przez Międzynarodową Organizację Normalizacyjną (ISO) pozycja Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (polski tytuł: Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik.) definiuje pomiar jako **zbiór operacji mających na celu wyznaczenie wartości wielkości**. Dokładniejszą definicję możemy znaleźć w Polskiej Normie PN-71/N-02050 („Metrologia – nazwy i określenia”). Według tej normy **pomiarem nazywa się czynności doświadczalne, mające na celu wyznaczenie wartości wielkości mierzonej, wyrażającej się iloczynem liczby i jednostki miary**.

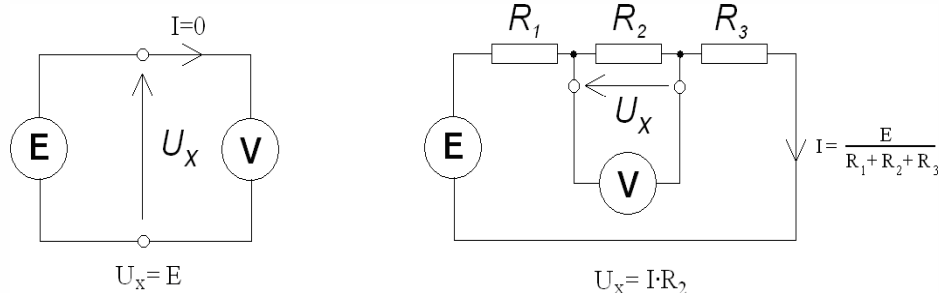
Pomiar jest jedynym sposobem otrzymania ilościowej informacji o rzeczywistości i na tym polega jego znaczenie dla nauki i techniki. Bez pomiaru żadna hipoteza naukowa nie może stać się uznaną teorią. Dzisiejszy poziom cywilizacji zawdzięczamy przede wszystkim opanowaniu przez człowieka metoda masowej produkcji, która byłaby z oczywistych względów niemożliwa bez odpowiednio zorganizowanego systemu jej kontroli, a więc operacji pomiarowych. Automatyzacja, jedna z głównych tendencji rozwojowych współczesności, nie może również odbyć się bez pomiaru. Aby jakąkolwiek wielkość można było regulować w sposób automatyczny, należy przede wszystkim określić jej stan aktualny, czyli jej wartość – a zatem dokonać pomiaru.

Metrologia elektryczna zajmuje się pomiarami wielkości elektrycznych oraz nieelektrycznych metodami elektrycznymi. Na przestrzeni lat rozwój elektroniki w tak znaczący sposób wpłynął na metrologię, że współcześnie większość pomiarów wszystkich wielkości występujących w przyrodzie dokonywana jest przez przekształcenie tych wielkości za pomocą różnego rodzaju czujników lub przetworników w wielkość elektryczną. Taka operacja pozwala nam na realizację dowolnych operacji matematycznych na mierzonych wielkościach oraz wprowadzenie automatycznych układów sterowania procesem pomiarowym (automatyczny dobór zakresu, pobudzenia itp.). Dzięki przekształceniu wielkości mierzonej na sygnał elektryczny możliwa jest także digitalizacja tejże wielkości w celu automatycznej rejestracji i archiwizacji danych.

Jak wspomniano wcześniej, większość współczesnych pomiarów polega na pomiarze uzyskanego różnymi sposobami sygnału elektrycznego. Do podstawowych wielkości elektrycznych należą natężenie prądu i napięcie. Przyrząd służący do pomiaru napięcia pomiędzy dwoma punktami to **woltomierz** i oznaczamy go symbolem:



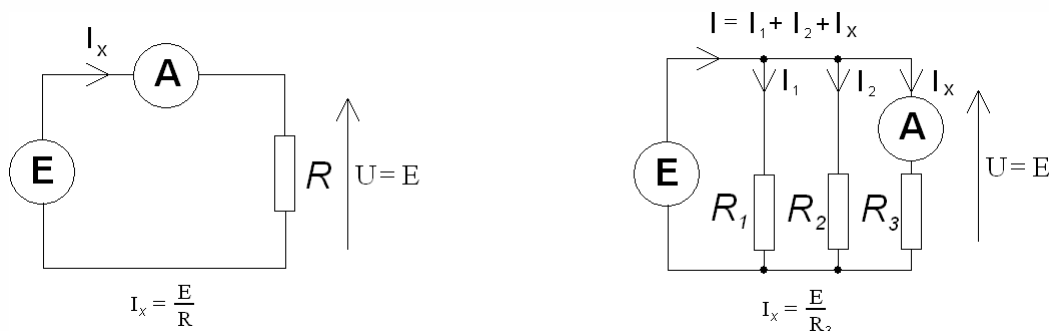
Idealny woltomierz jest przyrządem o nieskończenie dużej rezystancji i nie płynie przez niego żaden prąd. Woltomierz włączamy do układu równolegle, podłączając jego dwa zaciski wejściowe do punktów, pomiędzy którymi chcemy zmierzyć napięcie:



Przyrząd do pomiaru natężenia prądu to **amperomierz**. Oznaczamy go symbolem:



Idealny amperomierz jest przyrządem o rezystancji równej 0. Wskazuje on natężenie prądu, jaki przepływa pomiędzy jego zaciskami. Amperomierz włączamy do układu szeregowo tak, aby prąd, którego natężenie chcemy zmierzyć, przepłynął przez przyrząd pomiarowy:



Ze względu na ogólną zasadę działania, przyrządy pomiarowe możemy podzielić na analogowe i cyfrowe.

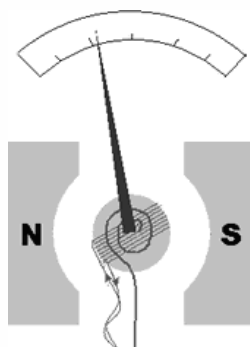
Przyrząd do pomiaru rezystancji to omomierz. Zasada jego działania polega na wymuszeniu w badanym obiekcie przepływu bardzo małego prądu, zmierzenie spadku napięcia na badanym obiekcie i wskazaniu jako wynik pomiaru rezystancji uzyskanej z prawa Ohma. Ze względu na to, że omomierz jest przyrządem aktywnym (dostarcza energii do mierzonego obiektu) nigdy nie można dokonywać pomiaru rezystancji wewnątrz obwodu znajdującego się pod napięciem. Dodatkowo napięcie na zaciskach badanego obiektu będzie zależne nie tylko od prądu pomiarowego omomierza, ale również od innych czynników. Wskazany wynik będzie niepoprawny.

Pamiętać również należy, że pomiaru rezystancji elementu znajdującego się w obwodzie dokonujemy, wyjąwszy ten element z obwodu – w innym przypadku mierzyć będziemy rezystancję wypadkową całego obwodu, a nie interesującego nas elementu.

1.1 Przyrządy analogowe

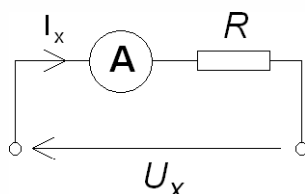
Zasada działania tych mierników analogowych oparta jest na podstawowych prawach fizycznych związanych z przepływem prądu, polem magnetycznym i polem elektrycznym. Napędem wskazówki jest siła jaka występuje przy tych oddziaływaniach, a od użytego przetwornika elektromechanicznego (magnetoelektrycznego, elektromagnetycznego, elektrodynamicznego czy elektrostatycznego), jego konstrukcji mechanicznej, precyzji skali i rodzaju odczytu zależą właściwości i dokładność wskazań przyrządu.

Najczęściej stosowanym przetwornikiem jest przetwornik magnetoelektryczny (tzw. ustrój magnetoelektryczny). Wskazuje on wartość średnią mierzonej wielkości. Składa się z trzech elementów: magnesu stałego będącego źródłem stałego pola magnetycznego, cewki, której os trwale umocowana jest w polu magnesu, oraz sprężyny utrzymującej cewkę w punkcie równowagi.



Pod wpływem prądu przepływającego przez cewkę powstaje pole magnetyczne wzdłuż osi tej cewki, które przeciwdziała polu magnetycznemu pochodzącemu od magnesu trwałego i powoduje obrót cewki do której przymocowana jest wskazówka.

W związku z zasadą działania przyrząd magnetoelektryczny jest w rzeczywistości amperomierzem. Aby dokonać pomiaru napięcia takim przyrządem musimy zastosować wewnątrz przyrządu następujący układ:



Przyjmując w takim układzie, że amperomierz jest przyrządem idealnym i ma zerową rezystancję (w rzeczywistości jest to kilka omów) otrzymujemy wskazanie:

$$I_x = \frac{U_x}{R}$$

Rezystor **R** nazywany jest **rezystorem zakresowym** lub **posobnikiem**. Można zauważyć, że zmieniając wartość tego rezystora, zmieniamy zakres możliwych do mierzenia napięć.

Przykład. Mierzmy napięcie o wartości 10 V woltomierzem magnetoelektrycznym. Zastosowany wskaźnik pokazuje maksymalną wartość, jeśli przez cewkę przetwornika płynie prąd o natężeniu 10 μA . Włączając rezystory zakresowe o wartościach 1 M Ω , 3 M Ω oraz 10 M Ω , otrzymamy następujące wskazania:

- dla rezystora 1 M Ω :

$$I = \frac{U}{R} = \frac{10}{1000000} = 0,00001 = 10 \mu\text{A} = 100\% \text{ skali,}$$

maksymalne możliwe do zmierzenia z tym posobnikiem napięcie to 10 V.

- dla rezystora 3 M Ω :

$$I = \frac{U}{R} = \frac{10}{3000000} = 0,0000033 = 3,3 \mu\text{A} = 33\% \text{ skali,}$$

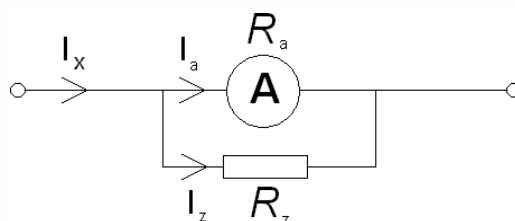
maksymalne możliwe do zmierzenia z tym posobnikiem napięcie to 30 V.

- dla rezystora 10 M Ω :

$$I = \frac{U}{R} = \frac{10}{10000000} = 0,000001 = 1 \mu\text{A} = 10\% \text{ skali,}$$

maksymalne możliwe do zmierzenia z tym posobnikiem napięcie to 100 V.

Podobne zasady stosujemy przy ustalaniu zakresu pomiarowego amperomierza. Schemat połączeń wewnętrznych amperomierza wygląda następująco:



Rezystor zakresowy **R_z** w amperomierzu zwany jest często **bocznikiem**. Natężenie prądu płynącego przez amperomierz zgodnie z I prawem Kirchhoffa oraz zgodnie z zasadą równoległego łączenia rezystorów jest równy:

$$I_a = I_x - I_z = I_x - \frac{U}{R_z} = I_x - \frac{I_x}{\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_z}} \cdot \frac{1}{R_z} = I_x \cdot \left(1 - \frac{R_a}{R_a + R_z}\right).$$

Przykład. Mierzmy prąd o natężeniu 1 mA amperomierzem magnetoelektrycznym. Zastosowany wskaźnik pokazuje maksymalną wartość, jeśli przez cewkę przetwornika płynie prąd o natężeniu 100 μA. Rezystancji cewki przetwornika wynosi 0,9 Ω. Włączając rezystory zakresowe o wartościach 0,1 Ω i 0,03 Ω, otrzymamy następujące wskazania:

- dla rezystora 0,1 Ω:

$$I_a = I_x \cdot \left(1 - \frac{R_a}{R_a + R_z}\right) = 0,001 \left(1 - \frac{0,9}{1}\right) = 0,0001 = 100 \mu A = 100\% \text{ skali},$$

maksymalne mierzone z tym bocznikiem natężenie prądu to 1 mA.

- dla rezystora 0,03 Ω:

$$I_a = I_x \cdot \left(1 - \frac{R_a}{R_a + R_z}\right) = 0,001 \left(1 - \frac{0,9}{0,93}\right) = 0,000032 = 32 \mu A = 32\% \text{ skali},$$

maksymalne mierzone z tym bocznikiem natężenie prądu to około 3,1 mA.

Maksymalną dopuszczalną wartość błędu pomiaru miernikiem analogowym (niepewność miernika) określa producent podczas kalibracji, oznaczając tzw. klasę dokładności miernika. Jest ona podana na skali miernika razem z oznaczeniami typu przetwornika elektromechanicznego, wymaganego położenia przyrządu w czasie pomiaru, napięcia probierczego izolacji itp.

Klasa dokładności przyrządu jest to dopuszczalny błąd wyrażony w procentach końcowej wartości zakresu pomiarowego. Stąd przy pomiarze np. napięcia można zapisać:

$$kl \rightarrow \delta U_x = (\Delta / X_{\max}) \cdot 100\%,$$

i odwrotnie:

$$\Delta = (kl \cdot X_{\max}) / 100\%,$$

gdzie:

Δ_{\max} – maksymalny dopuszczalny błąd bezwzględny pomiaru (niepewność pomiaru)

X_{\max} – zakres pomiarowy (maksymalna możliwa do zmierzenia wartość)

Wartości liczbowe klas zgodnie z PN są dziesiętymi wielokrotnościami i podwielokrotnościami liczb 1; 3; 5. Dobór odpowiedniego zakresu do wartości mierzonej wpływa istotnie na dokładność przeprowadzonego pomiaru.

Przykład. *Woltomierz magnetoelektryczny klasy 0,1 jest użyty do pomiaru napięcia o spodziewanej wartości 1,8 V. Na jakim zakresie dokonać pomiaru: 2 V czy 10 V?*

Na zakresie 2 V niepewność pomiaru wynosi $0,1\% \cdot 2 = 0,002 V$,

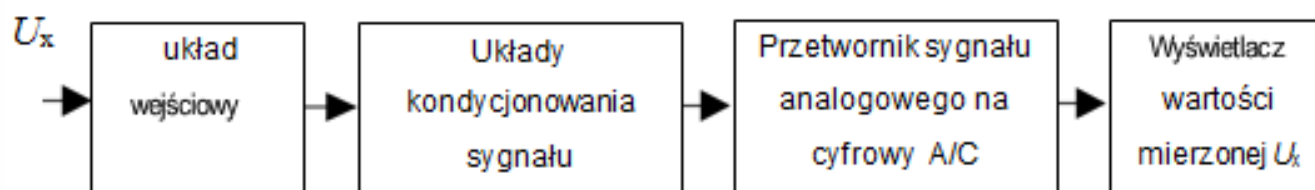
na zakresie 10 V niepewność pomiaru wynosi $0,1\% \cdot 10 = 0,01 V$.

Pomiar będzie dokładniejszy na zakresie 2 V.

DOKONUJĄC POMIARU USTAWIAMY NAJMNIJSZY ZAKRES, W JAKIM MIEŚCI SIĘ SPODZIEWANA WARTOŚĆ MIERZONEJ WIELKOŚCI.

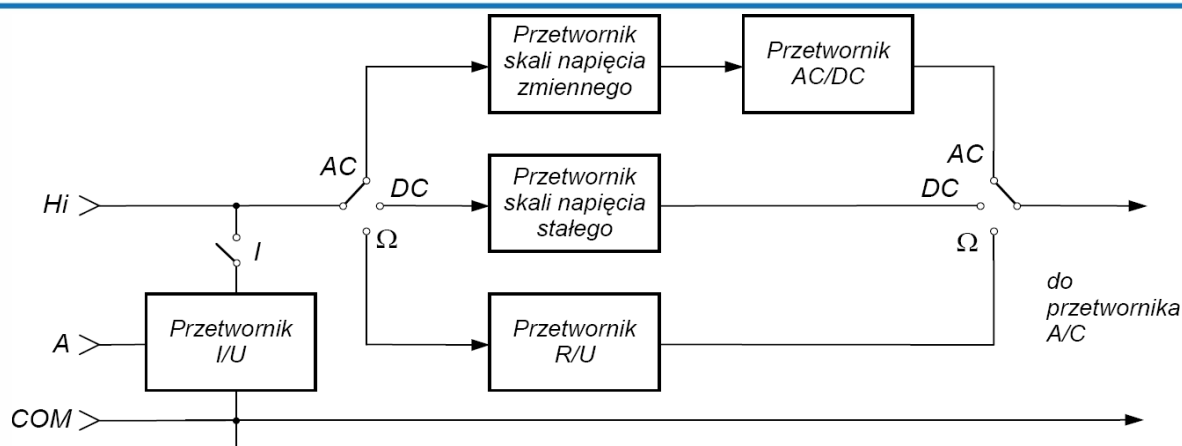
1.2 Przyrządy cyfrowe

We współczesnym laboratorium pomiarowym – poza uzasadnionymi przypadkami – rzadko już się stosuje przyrządy analogowe. Większość współczesnej aparatury pomiarowej jest aparaturą cyfrową. Uproszczony schemat blokowy toru miernika cyfrowego pokazano poniżej:



Układ wejściowy odpowiada za odseparowanie przyrządu od mierzonego obiektu oraz za dopasowanie poziomu sygnału wejściowego do możliwej do zmierzenia wartości. Typowe elementy składowe obwodów wejściowych to wzmacniacze, układy izolujące czy też filtry. Tak przygotowany sygnał podawany jest na kondycjoner, który przetwarza mierzoną wartość na napięcie, gdyż większość przetworników sygnału analogowego na cyfrowy (A/C) to przetworniki napięcia. Kondycjoner składa się najczęściej z układów przemieniających prąd w napięcie, rezystancję w napięcie, częstotliwość w napięcie lub też sygnał zmienny na napięcie stałe.

Większość używanych we współczesnych laboratoriach i warsztatach elektronicznych mierników to multimetry. Multimetr jest wielofunkcyjnym przyrządem, pozwalającym na pomiar prądu, napięcia, rezystancji, częstotliwości, temperatury itp. Zasada działania takiego przyrządu zawarta jest w odpowiednio skonstruowanym układzie kondycjonera. Typowy kondycjoner sygnału wejściowego multimetru przedstawiono poniżej:



W przypadku pomiaru napięcia lub rezystancji, badaną wartość przyłączamy pomiędzy zaciski **Hi** oraz **COM** przyrządu pomiarowego. W przypadku pomiaru prądu zaciskami amperomierza są zaciski **A** (czasem oznaczany jako **I**) oraz **COM**. Zacisk **A** (lub **I**) jest wyposażony w układ przetwarzający wpływający prąd na napięcie. Dalsze przetwarzanie jest dokonywane już na sygnale napięciowym. W zależności od tego, czy badamy sygnał stały, zmienny czy rezystancję, jest on przetwarzany w odpowiednim torze na napięcie stałe i w tej postaci podawany do przetwornika A/C.

Niepewność pomiaru przyrządem cyfrowym zawiera dwa składniki. Z częścią analogową toru pomiarowego wiąże się składowa niepewności **a** wynikająca z tolerancji wartości elementów, nieliniowości wzmacnienia i niepewności wzorca napięcia. Drugi składnik niepewności wynika z rozdzielczości przetwarzania sygnału analogowego na cyfrowy (błąd kwantowania i zliczania) – składnik **c**. Niepewność pomiaru jest zatem sumą liczoną ze wzoru:

$$\Delta = \pm (aX + cX_{\min}),$$

gdzie:

X - wartość odczytana

Δ - niepewność pomiaru (bezwzględna),

X_{\min} - **rozdzielczość przetwarzania A/C**,

Parametry **a**, **c** oraz X_{\min} podaje producent.

Składowa błęd **c** związana jest z rozdzielczością miernika i niepewnością zastosowanego w nim przetwornika A/C. Rozdzielczość jest to najmniejsza możliwa do wyświetlenia wartość na danym zakresie, lub też – według innej definicji – najmniejsza zmiana wartości wielkości mierzonej, która powoduje zmianę wskazania przyrządu. Składowa **c** podawana jest przeważnie jako całkowita wielokrotność rozdzielczości i zapisywana w formie np. „3 cyfry”.

Jeżeli producent nie podaje w instrukcji miernika składowej **c**, to przyjmuje się, że jest on równy rozdzielczości wskaźnika (wyświetlacza) dla ustawionego zakresu pomiarowego. Wielkość jest związana z liczbą cyfr wyświetlacza. Liczba cyfr jest to ilość wyświetlanych cyfr z zakresu 0-9. Często przyrząd ma możliwość wyświetlenia dodatkowo cyfry 1 przed wynikiem i poszerzenie przez to zakresu pomiarowego. Wtedy taką pozycję na wyświetlaczu liczy się za ½ cyfry. Przykładowo dla miernika o rozdzielczości 3½ cyfry jeśli producent nie podał inaczej na zakresie pomiarowym:



2 V	(wyświetlacz: 1,999)	ΔU_{\min} wyniesie $\pm 0,001$ V
20 V	(wyświetlacz: 19,99)	ΔU_{\min} wyniesie $\pm 0,01$ V
200 V	(wyświetlacz: 199,9)	ΔU_{\min} wyniesie $\pm 0,1$ V

Niepewność względna pomiaru, zgodnie z definicją liczymy z wzoru:

$$\delta = \Delta / X = \pm (a + c \cdot X_{\min} / X)$$

Niepewność względną wyrażamy w procentach. Często jest także podawana w jednostce **ppm** (ang. *parts per milion*):

$$1 \text{ ppm} = 0,000\ 001 = 0,0001\%$$

Przykład: *Dokonano pomiaru napięcia stałego woltomierzem o rozdzielczości 3½ cyfry. Producent podaje, iż błąd graniczny tego przyrządu to 0,8% + 3 cyfry. Miernik wskazał nam na zakresie 2 V wartość 1,800 a na zakresie 20 V wartość 1,80. Niepewność pomiaru tych dwóch napięć to:*

- dla zakresu 2 V:

$$\Delta U_x = \pm (0,008U_x + 3 \cdot c) = \pm (0,0144 + 3 \cdot 0,001) = 0,0174 \text{ V}$$

a więc zgodnie z zasadami zapisywania wyników pomiarów

$$U_x = (1,800 \pm 0,017) \text{ V}$$

- dla zakresu 20 V:

$$\Delta U_x = \pm (0,008U_x + 3 \cdot c) = \pm (0,0144 + 3 \cdot 0,01) = 0,0444 \text{ V}$$

a więc zgodnie z zasadami zapisywania wyników pomiarów

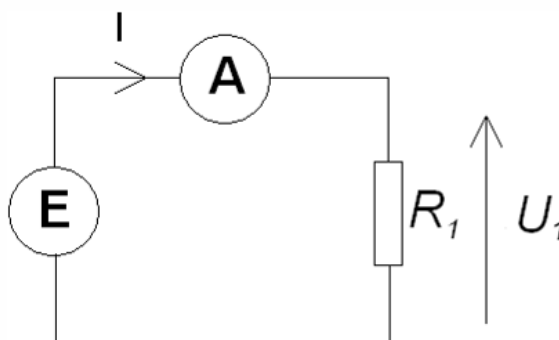
$$U_x = (1,800 \pm 0,044) \text{ V}$$

Również w przypadku mierników cyfrowych obowiązuje zasada, że pomiaru dokonujemy na najniższym zakresie, w którym mieści się mierzona wartość.

2. Przebieg ćwiczenia

UWAGA! Przed włączeniem zasilania na stanowisku należy pokazać prowadzącemu zmontowany układ pomiarowy i uzyskać zgodę na rozpoczęcie pomiarów

1. Dokonać pomiarów napięcia wyjściowego nieobciążonego zasilacza ustawionego na 1 V kolejno za pomocą wszystkich woltomierzy znajdujących się na stanowisku. Pomiar wykonać kolejno na wszystkich zakresach jakie posiada dany woltomierz. Aby w multimetrach Agilent 34401A mieć możliwość przełączania zakresu należy najpierw przy pomocy przycisku Auto/Man wejść w tryb manualnego wyboru zakresu (na wyświetlaczu pojawi się napis Man) a następnie strzałkami znajdującymi się na lewo od tego przycisku można przełączać poszczególne zakresy.
2. Powtórzyć pomiary ustawiając napięcie zasilacza na 10 V.
3. Wyznaczyć niepewność pomiaru napięć z pkt. 1 i 2. Dane dotyczące sposobu wyznaczania tej niepewności odczytać z instrukcji przyrządów. Skomentować wyniki. Który zakres jest najbardziej optymalny w poszczególnych miernikach dla napięć 1 V oraz 10 V?
4. Kolejno za pomocą wszystkich amperomierzy na stanowisku dokonać pomiaru natężenia prądu płynącego w obwodzie jak na rysunku (na wszystkich zakresach):



W zasilaczu ustawić napięcie wyjściowe 10V. Wartość rezystancji R_1 wynosi 1 k Ω

5. Wyznaczyć niepewność pomiaru natężenia prądu z pkt. 4. Dane dotyczące sposobu wyznaczania tej niepewności odczytać z instrukcji przyrządów.

PRZYKŁADOWA TABELA POMIAROWA

Wyniki pomiarów

(dla każdego z mierników – tutaj przykład miernika cyfrowego Agilent 34401A)

Zakres pomiarowy (dc voltage range)	Rozdzielczość (accuracy: % of reading)	Dokładność (accuracy: % of range)	Wyniki pomiarów		Niepewność bezwzględna Δ [V]		Niepewność względna δ [%]	
			$U_z = 1$ V	$U_z = 10$ V	$U_z = 1$ V	$U_z = 10$ V	$U_z = 1$ V	$U_z = 10$ V
100,000 mV	0,0030	0,0030	...	...	...	...	...	...
1,00000 V	0,0020	0,0006	...	...	...	...	...	...