

# Miernictwo elektroniczne

## WSTĘP

M.DOROZHOVETS

**Cel:** Zapoznać się z organizacją zajęć dydaktycznych, warunkami zaliczenia przedmiotu oraz wykazem literatury

### Plan wykładu

1. TEMATYKA ZAJĘĆ, WYKŁADY
2. TEMATYKA ZAJĘĆ, LABORATORIUM
3. WYKAZ LITERATURY
4. WARUNKI ZALICZENIA PRZEDMIOTU

M.DOROZHOVETS

### TEMATYKA ZAJĘĆ:

- Wstęp
- T1. Wymagania do aparatury pomiarowej oraz klasyfikacja mierników elektronicznych według ich zastosowania
- T2. Pomiary małych napięć w obwodach elektronicznych
- T3. Pomiary prądów w zakresie mikro-, nano- i piko-amperów
- T4. Pomiary małych i dużych rezystancji
- T5. Zakłócenia w obwodach pomiarowych oraz ich tłumienie
- T6. Uśrednianie cyfrowe w pomiarach elektronicznych
- Podsumowanie

M.DOROZHOVETS

### TEMATYKA ĆWICZEŃ LABORATORYJNYCH:

- **Wprowadzenie - zasady pracy w laboratorium.**
- **1. Uśrednianie wyników obserwacji napięć zakłóconych**
- **2. Pomiary małych rezystancji.**
- **3. Pomiary izolacji (dużych rezystancji).**
- **4. Cyfrowe pomiary parametrów sygnałów AC**
- **5. Korekcja oddziaływań systematycznych**
- **6. Pomiary LC**

M.DOROZHOVETS

# **Miernictwo elektroniczne T1 Aparatura do pomiarów elektronicznych**

M.DOROZHOVETS

## **Plan wykładu**

- 1. Wymagania do aparatury pomiarowej**
- 2. Ograniczenia występujące podczas pomiarów elektronicznych**
- 3. Klasyfikacja przyrządów pomiarowych według ich funkcji i właściwości**
  - 3.1. Multimetry elektroniczne cyfrowe (DMM)**
  - 3.2. Elektrometry**
  - 3.3. Nanowoltomierze**
  - 3.4. Pikoamperomierze**
  - 3.5. Mikroomomierze**
  - 3.6. Źródła mierzące (SMU)**

M.DOROZHOVETS

## 1. Wymagania do aparatury pomiarowej

Podstawowymi wymaganiami są:

- **Możliwość pomiaru wartości wielkości w zadany zakresie** (tak małych jak i dużych wartości), jest to wymagania amplitudowe;
- **Możliwość pomiarów wielokanałowych** – kilka wielkości jednego lub różnego rodzaju
- **Brak obciążenia** obiektu badanego – odpowiednia wartość rezystancji wejściowej
- **Zadana dokładność pomiarów**, zapewnia się odpowiednią klasą dokładności woltomierza oraz innymi wartościami jego parametrów: stabilnością temperaturową oraz czasową, odpornością na inne wielkości wpływające

M.DOROZHOVETS

## 1. Wymagania do aparatury pomiarowej

- **Odporność na oddziaływania zakłóceń** tak regularnych jak i losowych wpływu zakłóceń to wymaganie jest ważne przy pomiarach wielkości niskiego poziomu, w warunkach przemysłowych
- **Szybkość pomiaru** – to wymaganie jest ważne przy pomiarach wielkości szybko zmiennych (dynamicznych),.
- **Możliwość współpracy z PC** – jest to ważne przy automatyzacji pomiarów
- **Możliwość opracowania wyników** wg zadanego algorytmu
- **Łatwość obsługi**
- **Niska cena oraz niski koszty pomiarów**

M.DOROZHOVETS

## 2. Ograniczenia występujące podczas pomiarów wielkości elektrycznych.

Fundamentalnym czynnikiem ograniczającym jest szum cieplny lub szum Jonson'a.

Na dowolnej rezystancji **R** energia cieplna powoduje ruch nośników ładunków elektrycznych, który z kolei powodują szum elektryczny.

Moc tego szumu opisuje się wzorem

$$P=4kTB,$$

gdzie:  $k=1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K- stała Boltсмana;

**T** –temperatura (K);

**B** – pasmo częstotliwościowe szumu (Hz).

Wartość skuteczna szumu Jonsona  $U_{sz}$  na rezystancji (**R**) równa się:

$$U_{sz} = \sqrt{PR} = \sqrt{4kBT R}$$

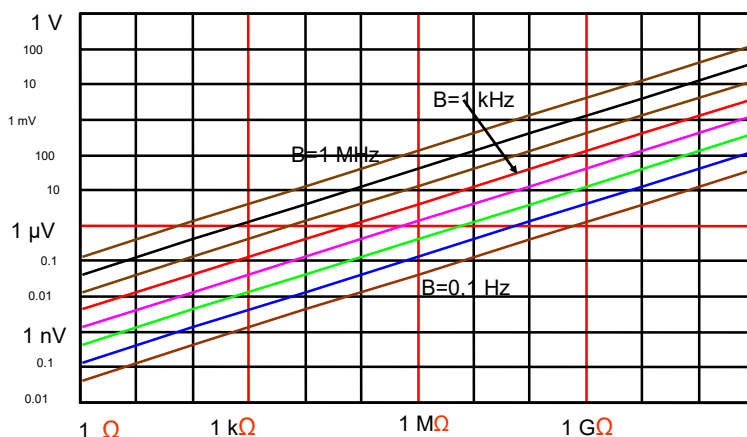
a wartość prądu szumu Jonsona  $I_{sz}$ :

$$I_{sz} = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{4kBT}{R}}$$

M.DOROZHOVETS

## 2. Ograniczenia występujące podczas pomiarów wielkości elektrycznych.

Zależności wartości napięcia oraz prądu szumu cieplnego przy **T=295 K (22°C)** jako funkcje rezystancji oraz szerokości pasma pokazane niżej



M.DOROZHOVETS

## 2. Ograniczenia występujące podczas pomiarów wielkości elektrycznych.

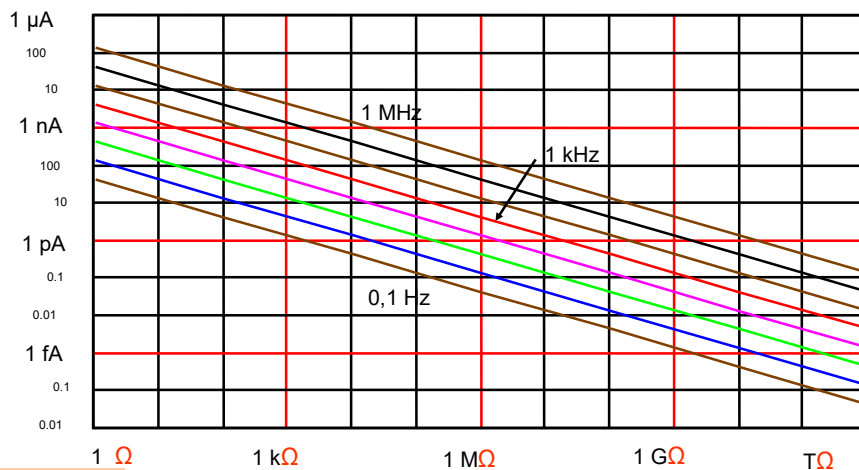
Teoretyczna granica czułości pomiaru napięcia

Rezystancja	Pasmo częstotliwości			
	0,1 Hz	1 Hz	1 kHz	1 MHz
1 $\Omega$	0,03 nV	0,1 nV	3 nV	0,1 $\mu$ V
1 k $\Omega$	1 nV	3 nV	0,1 $\mu$ V	3 $\mu$ V
1 M $\Omega$	30 nV	0,1 $\mu$ V	3 $\mu$ V	100 $\mu$ V
1 G $\Omega$	1 $\mu$ V	3 $\mu$ V	100 $\mu$ V	3 mV
1 T $\Omega$	30 $\mu$ V	100 $\mu$ V	3 mV	100 mV

M.DOROZHOVETS

## 2. Ograniczenia występujące podczas pomiarów wielkości elektrycznych.

Zależności wartości skutecznej prądu szumu cieplnego przy T=295 K (22°C) jako funkcje rezystancji oraz szerokości pasma



M.DOROZHOVETS

## 2. Wymagania do woltomierzy DC. Zakresy

Teoretyczna granica czułości pomiaru prądu

Rezystancja	Pasma częstotliwości			
	0,1 Hz	1 Hz	1 kHz	1 MHz
1 Ohm	30 pA	100 pA	3 nA	100 nA
1 kOhm	1 pA	3 pA	100 pA	3 nA
1 MOhm	0,03 pA	0,1 pA	3 pA	100 pA
1 GOhm	1 fA	3 fA	0,1 pA	3 pA
1 TOhm	0,03 fA	0,1 fA	3 fA	0,1 pA

M.DOROZHOVETS

## 3. Klasyfikacja przyrządów pomiarowych według ich funkcji i właściwości

W zależności od zakresów i warunków pomiaru (właściwości obiektu – rezystancja, pasmo częstotliwości) rozróżnia się:

- multimetry;
- elektrometry,
- nanowoltomierzy,
- pikoamperomierzy,
- mikro-omomierzy,
- przyrządy źródła – mierniki,
- oraz inne.

M.DOROZHOVETS

### 3. Klasyfikacja przyrządów pomiarowych według ich funkcji i właściwości

#### 3.1. Multimetry

są to przyrządy dla pomiarów:

- napięć powyżej 1 mV ;
- prądów powyżej 1 mA, oraz
- rezystancji poniżej 1 GΩ.

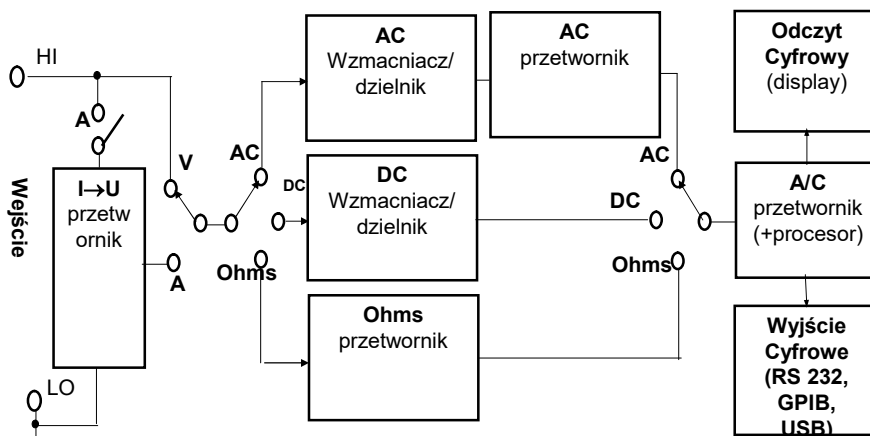
Rezystancja wejściowa woltomierza ( $R_v$ ) DMM stanowi od około (1-10-100) MΩ do maksymalnie (1-10) GΩ

Rozdzielczość DMM wynosi od  $3\frac{1}{2}$  cyfr dziesiętkowych (bardzo tanie) aż do drogiej  $6\frac{1}{2}$ - $7\frac{1}{2}$  cyfr dziesiętkowych.

Maksymalna czułość DMM stanowi do (0,1-0,01) mV (do 10 nV).

M.DOROZHOVETS

#### Przykładowy schemat strukturalny multimetru elektronicznego cyfrowego (DMM - ang. Digital Multi-Meter)



M.DOROZHOVETS



## Multimetr Metex MXD 4660A



M.DOROZHOVETS

## Multimetr HP-34401A



M.DOROZHOVETS

## Parametry multimetru HP-34401A firmy Hewlett-Packard

Tab.2. Funkcje i zakresy pomiarowe multimetru HP-34401A.

Funkcja	Zakresy pomiarowe
DC V, AC V	100mV, 1V, 10V, 100V, 1000V (7)
$\Omega$ 2W, $\Omega$ 4W	100 $\Omega$ , 1k $\Omega$ , 10k $\Omega$ , 100k $\Omega$ , 100M $\Omega$
DC I, AC I	10mA (tylko dc), 100mA (tylko dc)

M.DOROZHOVETS

### 3. Klasyfikacja przyrządów pomiarowych według ich funkcji i właściwości

#### 3.2. Elektrometry.

Są to przyrządy pomiarowe dla pomiarów napięć, prądów, ładunku i rezystancji przy następujących warunkach:

- prądów poniżej 1  $\mu$ A do 100 pA, napięcie źródła przy pomiarach prądu jest poniżej kilku set mV;
- napięcia poniżej 1  $\mu$ V, źródło napięcia ma rezystancją wyjściową rzędu 1 G $\Omega$  i wyżej do 10 T $\Omega$ ;
- rezystancji powyżej 1 G $\Omega$ ;
- pomiar ładunku;
- pomiary przy porównywalnych wartościach szumów cieplnych oraz innych.

Rezystancja wejściowa woltomierza elektrometru stanowi typowo od około 100 T $\Omega$  nawet do około 100 P $\Omega$ .

M.DOROZHOVETS

## 6517B Electrometer/High Resistance Meter



M.DOROZHOVETS

## 6517B Electrometer/High Resistance Meter

- Measures resistances up to  $10^{18} \Omega$
- • 10 aA ( $10 \times 10^{-18} A$ ) current measurement resolution
- • Complete hardware-software solution for ASTM D257 high resistivity measurements with the 6517B, 8009 Resistivity Test Fixture, and the KickStart High Resistivity Measurement Application
- • <3 fA input bias current
- • 6~digit high accuracy measurement mode
- • <20  $\mu V$  burden voltage on the lowest current ranges
- • Voltage measurements up to 200 V with >200  $\Omega$  input impedance
- • Built-in  $\pm 1000$  V voltage source
- • Built-in test sequences for four different device characterization tests, surface and volume resistivity, surface insulation resistance, and voltage sweeping
- • GPIB and RS-232 interfaces

M.DOROZHOVETS

### 3. Klasyfikacja przyrządów pomiarowych według ich funkcji i właściwości

#### 3.3. Nanowoltomierze.

Są to bardzo czułe, pracujący w **pobliżu teoretycznej granicy czułości** w porównaniu do elektrometrów.

Rozdzielczość wynosi do około 1 nV

Duże tłumienie szumów losowych

Duże tłumienie zakłóceń szeregowych i wspólnych

Dodatkowe inne funkcje

M.DOROZHOVETS

### 3. Klasyfikacja przyrządów pomiarowych według ich funkcji i właściwości

Nanowoltomierz 100 VDC, 2182A/E, Keithley  
PLN 18 049.00



M.DOROZHOVETS

### 3. Klasyfikacja przyrządów pomiarowych według ich funkcji i właściwości

Nanowoltomierz 100 VDC, 2182A/E, Keithley (1nV)

- Dwukanałowy nanowoltomierz zoptymalizowany pod kątem stabilnych pomiarów napięcia i niskiego poziomu szumów
- Pomiary z wysokimi prędkościami i zachowaniem niskiego poziomu szumów, typowy szum zaledwie 15 nV p-p przy czasie reakcji 1 s, szum 40–50 nV p-p przy 60 ms
- Tryb delta koordynuje pomiary dla źródła prądu wstecznego o częstotliwości do 24 Hz przy szumie 30 nV p-p (typowym) dla jednego odczytu, uśrednia wiele odczytów zapewniając większą redukcję szumów
- Synchronizacja do linii zapewnia 110 dB NMRR i minimalizuje efekt prądów współbieżnych AC
- Dwa kanały umożliwiają pomiar napięcia, temperatury i stosunku nieznaney rezystancji do rezystora referencyjnego
- Wbudowana linearyzacja termopary i kompensacja zimnego złącza

M.DOROZHOVETS

### 3. Klasyfikacja przyrządów pomiarowych według ich funkcji i właściwości

#### 3.4. Pikoamperomierze.

Są to bardzo czułe, pracujące w pobliżu teoretycznej granicy czułości oraz przy mniejszych wartościach spadku napięcia (tzw. votage burden) w porównaniu do elektrometrów.

Pikoamperomierze zapewniają też inne właściwości, np. lepszą szybkość pomiaru lub możliwość logarytmicznej charakterystyki.

M.DOROZHOVETS

### 3. Klasyfikacja przyrządów pomiarowych według ich funkcji i właściwości

#### Keithley Series 6400 Picoammeters



M.DOROZHOVETS

### 3. Klasyfikacja przyrządów pomiarowych według ich funkcji i właściwości

#### Keithley Series 6400 Picoammeters

Model	Description	Current	Number of Channels	PC Interface	Resistance	Source	List Price
6485 <a href="#">View Datasheet</a>	-	10fA - 20mA	1	GPIB, RS-232	-	-	US \$2,030 <a href="#">Configure &amp; Quote</a>
6487 <a href="#">View Datasheet</a>	-	10fA - 20mA	1	GPIB, RS-232	10 <sup>7</sup> - 10 <sup>15</sup> ?	0 - ±500V	US \$4,550 <a href="#">Configure &amp; Quote</a>
6482 <a href="#">View Datasheet</a>	-	1fA - 20mA	2	GPIB, RS-232	-	0 - ±30V, each channel	US \$4,670 <a href="#">Configure &amp; Quote</a>

M.DOROZHOVETS

### 3. Klasyfikacja przyrządów pomiarowych według ich funkcji i właściwości

#### 3.5. Mikro-omomierzy.

Mikro-omomierz jest to specjalny omomierz przeznaczony do pomiaru **bardzo niskich wartości rezystancji**.

Typowy mikro-omomierz ma czułość do około **10  $\mu\Omega$** .

Pomiar małych rezystancji odbywa się **przez 4-przewodowe podłączenie** obiektu badanego (w celu eliminacji wpływu rezystancji przewodów) oraz charakteryzują się dodatkowymi (w porównaniu do DMM) funkcjami.

Z pośród nich jest to możliwość kompensacji napięcia przesunięcia (offset), spowodowanego przykładowo termoelektryczną SEM, możliwość ograniczenia napięcia wzdłuż badanej rezystancji do **bardzo niskiego poziomu (typowo poniżej 20 mV)**, co jest bardzo ważne przy testowaniu takich elementów jak kontakty przełączników, kluczy oraz (rele) kontaktronów.

M.DOROZHOVETS

### 3. Klasyfikacja przyrządów pomiarowych według ich funkcji i właściwości

#### Mikroomomierz 580 Keythley



RANGE	RESOLUTION	MAXIMUM TEST CURRENT	NON DRY CIRCUIT TEST ACCURACY 1 Year, 18°-28°C ±(%rdg + counts)		DRY CIRCUIT TEST MAXIMUM POWER DISSIPATION IN SAMPLE ACCURACY 1 Year, 18°-28°C ±(%rdg + counts)	
			PULSED	DC	500 $\mu$ W	PULSED
200 m $\Omega$	10 $\mu\Omega$	100 mA	0.04 + 2	0.04 + 3	500 $\mu$ W	0.05 + 2
2 $\Omega$	100 $\mu\Omega$	10 mA	0.04 + 2	0.04 + 3	50 $\mu$ W	0.05 + 2
20 $\Omega$	1 m $\Omega$	1 mA	0.04 + 2	0.04 + 3	5 $\mu$ W	0.05 + 2
200 $\Omega$	10 m $\Omega$	1 mA	0.04 + 2	0.04 + 2		
2 k $\Omega$	100 m $\Omega$	1 mA	0.04 + 2	0.04 + 2		
20 k $\Omega$	1 $\Omega$	10 $\mu$ A	0.05 + 2	0.05 + 2		
200 k $\Omega$	10 $\Omega$	10 $\mu$ A	0.075 + 2	0.075 + 2		

M.DOROZHOVETS

### 3. Klasyfikacja przyrządów pomiarowych według ich funkcji i właściwości

#### 3.5. Źródła mierzące (Przyrządy źródła – mierniki)

##### Source-Measure Unit - SMU

są to przyrządy, funkcjami których są:

- pomiar napięcia;
- pomiar prądu;
- źródło napięcia;
- źródło prądu.

SMU pozwalają na jednoczesne dokładne (o zadanej wartości):

- wymuszanie obiektu napięciowe i pomiar prądu odpowiedzi oraz
- wymuszanie obiektu prądowe i pomiar napięcia odpowiedzi.

M.DOROZHOVETS

### 3. Klasyfikacja przyrządów pomiarowych według ich funkcji i właściwości

#### Keithley 2400 SourceMeter SMU Instruments



M.DOROZHOVETS



### 3. Klasyfikacja przyrządów pomiarowych według ich funkcji i właściwości

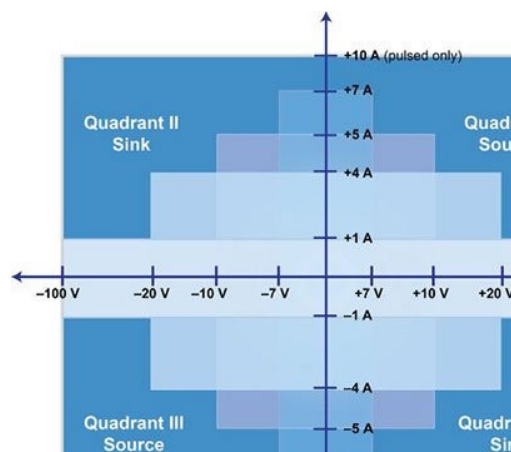
#### Keithley 2400 SourceMeter SMU Instruments

- Mierniki SMU serii 2400 firmy Keithley są przeznaczone specjalnie do wykonywania testów, które wymagają ścisłego sprzężenia zasilania z pomiarem.
- Wszystkie modele SourceMeter zapewniają precyzyjne zasilanie napięciem i energią oraz precyzyjne pomiary.
- Każdy przyrząd służy jako bardzo stabilne, niskoszumowe źródło zasilania DC z funkcją Readback oraz niskoszumowy 5 1/2-pozycyjny multimetr.
- Wynikiem tego jest kompaktowy, jednocanałowy tester parametrów DC, który można wykorzystać jako źródło napięcia, źródło prądu, miernik napięcia, miernik prądu i omomierz – zwłaszcza w produkcji elementów i modułów w technice komunikacyjnej, półprzewodnikowej, komputerowej, samochodowej i medycznej.
- SourceMeter to niezastąpiony pomocnik podczas wielu zadań związanych z charakterystyką i testowaniem w ramach produkcji.

M.DOROZHOVETS

### 3. Klasyfikacja przyrządów pomiarowych według ich funkcji i właściwości

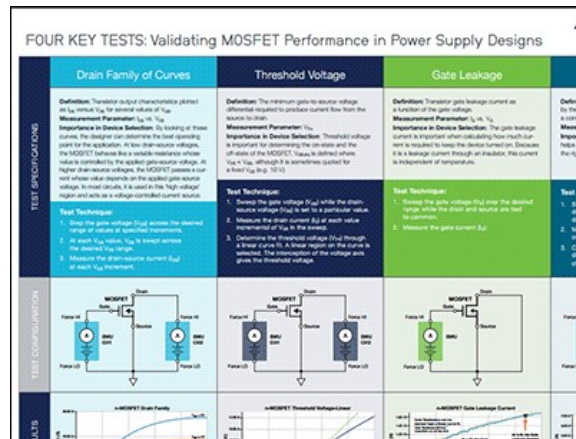
#### Keithley 2400 SourceMeter SMU Instruments



M.DOROZHOVETS

### 3. Klasyfikacja przyrządów pomiarowych według ich funkcji i właściwości

#### Keithley 2400 SourceMeter SMU Instruments



M.DOROZHOVETS

### 3. Klasyfikacja przyrządów pomiarowych według ich funkcji i właściwości

#### Keithley 2400 SourceMeter SMU Instruments

- Dane techniczne
- Moc wyjściowa 20 W
- Napięcie wyjściowe DC od 0 V do  $\pm 1$  kV
- Prąd wyjściowy DC od 0 A do  $\pm 1$  A
- Zakres pomiaru napięcia DC: 5  $\mu$ V - 1 kV
- Zakres pomiaru prądu DC 50 pA - 1 A
- Zakres pomiaru rezystancji 0.2  $\Omega$  - 200 M $\Omega$
- Regulacja obciążenia  $\pm (200$  mV + 100  $\mu$ V) i  $\pm (100$   $\mu$ A + 100 pA)
- Regulacja sieci  $\pm 100$  mV (0,01%) i  $\pm 100$   $\mu$ A (0,01%)

M.DOROZHOVETS