

Miernictwo Elektroniczne

dr hab. inż. Łukasz Śliwczyński
Katedra Elektroniki
sliwczyn@agh.edu.pl
C3 - 515

Miernictwo elektroniczne, © Łukasz Śliwczyński, WIEiT, AGH, 2021

Charakterystyka przedmiotu

- **wykładowca**
dr hab. inż. Łukasz Śliwczyński
e-mail: sliwczyn@agh.edu.pl
tel. (617) 27-40
C3 - 515
- **wykład**
 - 18 godzin (01.03 - 14.04)
 - 9 wykładów, **2 x w tygodniu, on-line**
- **laboratorium**
 - 14 godzin: **terminy i zasady zostaną podane niebawem**
 - prowadzący: Witold Skowroński, Łukasz Buczek, Łukasz Śliwczyński, Karol Salwik
 - termin odróbczy: do ustalenia z prowadzącym laboratorium
- **strona internetowa:**
<http://galaxy.uci.agh.edu.pl/~lab515/dzienne/miernictwo/wyklad.html>

Zasady uzyskania zaliczenia

- aby otrzymać pozytywną ocenę z przedmiotu należy:
 - zaliczyć ćwiczenia laboratoryjne oraz
 - zdać testy obejmujące przygotowanie do ćwiczeń oraz wiadomości z wykładów
- ocena końcowa jest obliczana jako średnia ważona:

$$OK = 0.7 \cdot O_{\text{Lab}} + 0.3 \cdot O_{\text{Test}}$$
 (zgodnie z RS AGH OK > 50% aby otrzymać zaliczenie)

Zaliczenie laboratorium otrzymuje się na podstawie zaliczenia wszystkich ćwiczeń laboratoryjnych. Brak przygotowania do zajęć będzie skutkowało niedopuszczeniem do odrabiania ćwiczenia.

Aktywność na zajęciach może być wykorzystana przez prowadzącego do podniesienia oceny z laboratorium.

Czego chcemy się nauczyć?

metrologia

teoretyczna

jednostki miar
systemy jednostek
skale pomiarowe
analiza niepewności

prawna

jednolitość i legalność
narzędzi pomiarowych
przepisy prawne (ustawy)
normy
warunki techniczne

stosowana

budowa i wykorzystanie
przyrządów pomiarowych
pomiarów wielkości w
różnych obszarach
działalności ludzkiej

pomiar → porównanie → wzorzec

BIPM
Bureau International des Poids
et Mesures
NMI
National Metrology Institution
GUM
Główny Urząd Miar

ISO
International Organization for
Standardization
IEC
International Electrotechnical
Commission
PKN
Polski Komitet Normalizacyjny

miernictwo elektroniczne

- pomiary wielkości elektrycznych
- pomiary wielkości nieelektrycznych metodami elektronicznymi
- elektroniczne przyrządy pomiarowe

Program kursu

- 1) wprowadzenie: pomiar, jednostki, wzorce
- 2) sygnały i ich parametry: pomiary podstawowych wielkości
- 3) pomiary i przyrządy cyfrowe
- 4) pomiar wielkości nieelektrycznych: temperatura, siła, masa, ciśnienie
- 5) oscyloskop i pomiary oscyloskopowe (2 wykłady)
- 6) pomiar impedancji: metody pośrednie (techniczne) i mostkowe
- 7) błędy i niepewność pomiaru

Co to jest pomiar i do czego jest potrzebny?

pomiar:

proces ustalenia na podstawie eksperymentu wartości wielkości, która może w rozsądny sposób przypisana do procesu, zjawiska lub przedmiotu

International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)

analiza:

- weryfikacja teorii
- konstruowanie modeli empirycznych
- określenie parametrów urządzeń, elementów

monitorowanie:

- określenie wartości wielkości, np.: temperatury, napięcia, mocy ...
- konstruowanie/uruchamianie aparatury

sterowanie:

- określenie wartości wielkości, w celu użycia jej w układzie sterowania (w pętli zamkniętej lub otwartej)

uwagi:

- pomiar → porównanie z wzorcem i określenie wzajemnych relacji
- porównanie → bezpośrednie lub pośrednie
- zakładamy, że porównanie jest powtarzalne i odtwarzalne
- wykorzystujemy odpowiedni sprzęt i procedury pomiarowe
- wiemy, jak ich używać
- zapewnione są odpowiednie warunki pomiaru
- mamy świadomość, że pomimo starań każdy pomiar jest obciążony niepewnością
- wiemy, jak interpretować wynik pomiaru

pomiar to znacznie więcej niż tylko odczytanie jakichś cyfr z wyświetlacza

Wynik pomiaru

$$Q = |Q|[Q]$$

Q - wartość wielkości (ang. *quantity value*)
 $|Q|$ - wartość liczbowa (ang. *numerical value*)
 $[Q]$ - jednostka wielkości (ang. *unit*)

Międzynarodowy układ jednostek miar - SI (1960)

jednostki podstawowe

wielkość	symbol	jednostka	symbol
długość	l, h, r, x	metr	m
masa	m	kilogram	kg
czas	t	sekunda	s
natężenie prądu	I, i	amper	A
temperatura	T	kelwin	K
ilość substancji	n	mol	mol
światłość	I _v	kandela	cd

jednostki pochodne

$$[Q] = [kA^a B^x C^y] \quad \text{np.: } [N] = [kg \cdot m \cdot s^{-2}]$$

Zapis wyników pomiarów

przedrostki SI

wartość	nazwa	symbol	wartość	nazwa	symbol
10 ¹	deka	da	10 ⁻¹	decy	d
10 ²	hekto	h	10 ⁻²	centy	c
10 ³	kilo	k	10 ⁻³	mili	m
10 ⁶	mega	M	10 ⁻⁶	mikro	μ
10 ⁹	giga	G	10 ⁻⁹	nano	n
10 ¹²	tera	T	10 ⁻¹²	piko	p
10 ¹⁵	peta	P	10 ⁻¹⁵	femto	f
10 ¹⁸	exa	E	10 ⁻¹⁸	atto	a
10 ²¹	zeta	Z	10 ⁻²¹	zepto	z
10 ²⁴	jota	Y	10 ⁻²⁴	jokto	y

notacja wykładnicza (naukowa)

$$X = \pm M \cdot 10^E; \quad M \in [1, 10); \quad E \in \mathbb{Z}$$

np.: czy 10 kΩ = 10 000 Ω ???

$$\pm 1\% \Rightarrow U = 100 \Omega \Rightarrow \underbrace{1.00}_{\substack{\text{cyfry} \\ \text{znaczące}}} \cdot 10^4 \Omega$$

Zapis „R = 10 kΩ” może sugerować wartość 9.5 kΩ < R < 10.5 kΩ, czyli niepewność ±5%.

Wzorzec masy - krótka historia

starożytna Grecja, 560-550 p.n.e.
ważenie sylfionu pod nadzorem króla



Chiny, cesarstwo Qin, 221 - 207 p.n.e.
źródło: hellenicaworld.com



źródło: ajaonline.org



BIPM, terazniejszość
w sumie niewiele się zmieniło...
ale...



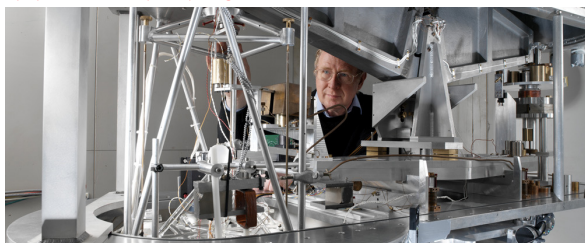
źródło: BIPM

20 maj 2019 - redefinicja jednostek podstawowych układu SI

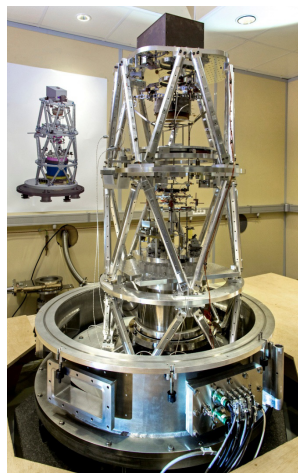
kilogram:

1 kilogram [kg] to taka masa, przy której wartość stałej Plancka wynosi dokładnie $6.62607015 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, metr [m] i sekunda [s] są wyznaczone w oparciu o prędkość światła oraz przejście nadsubtelne w atomie cezu Cs^{133})

„Stary” wzorzec kilograma zmienia się w tzw. wagę Kibble'a (poprzednio nazywany wagą wata - 'watt balance')



źródło: NPL, Wielka Brytania



źródło: BIPM

<https://www.kwantowo.pl/2018/11/16/nowy-kilogram-lepszy-bo-kwantowy/>
<https://www.bipm.org/en/bipm/mass/watt-balance/>
https://www.bipm.org/utis/common/pdf/.../Michael_Stock.pdf
https://en.wikipedia.org/wiki/2019_redefinition_of_SI_base_units

Jednostki - definicje, realizacja, niepewność

CZAS:

1 sekunda [s] jest to czas trwania 9 192 631 770 okresów promieniowania odpowiadających przejściu pomiędzy dwoma stanami nadsubtelnymi poziomu podstawowego atomu cezu Cs^{133}



wzorzec cezowy 5071A
(Symmetricom, dawniej HP)
niepewność 5×10^{-13} - 1×10^{-12}



zegary cezowe w PTB
Physikalisch-Technische
Bundesanstalt
Brunswick, Niemcy
niepewność $1,2 \times 10^{-14}$
 1×10^{-9} s/doba
 1 s/ $2,7 \times 10^6$ lat

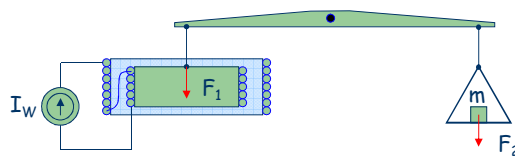
fontanna cezowa 1×10^{-15}

Jednostki - definicje, realizacja, niepewność

natężenie prądu elektrycznego:

1 amper [A] jest to natężenie prądu, który płynąc w dwóch równoległych przewodach... odległych o 1 metr powoduje ich przyciąganie się siłą 2×10^{-7} N na każdy metr długości (techniczna realizacja niemożliwa...)

waga prądowa Rayleigha



niepewność 6ppm $\rightarrow 6 \times 10^{-6}$

$$F_1 = K \cdot I_W^2; F_2 = m \cdot g$$

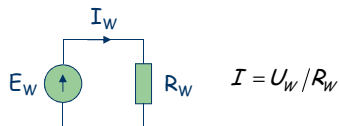
$$F_1 = F_2$$

$$\downarrow$$

$$I_W = \sqrt{\frac{m \cdot g}{K}}$$

realizacja oparta o prawo Ohma

1ppm $\rightarrow 1 \times 10^{-6}$



istotna zmiana: 20 maja 2019

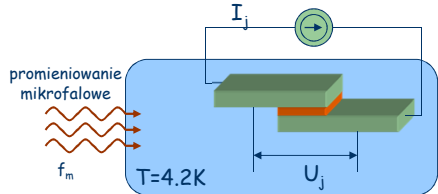
1 amper [A] to takie natężenie prądu, przy którym wartość ładunku elementarnego wynosi $1,602176634 \cdot 10^{-19}$ C (A·s, przy czym sekunda jest wyznaczana w oparciu o przejście nadsubtelne w atomach cezu Cs^{133})

Jednostki - definicje, realizacja, niepewność

różnica potencjałów (napięcie):

1 volt [V] jest to różnica potencjałów pomiędzy dwoma punktami przewodnika, gdy płynący przez niego prąd o natężeniu 1 A wydziela w nim moc równą 1 W. (1948)

wykorzystanie (odwrotnego) efektu Josephsona (lata 90 XX w)



$$U_j = n \cdot f_m \frac{h}{2e} = \frac{n \cdot f_m}{K_j}$$

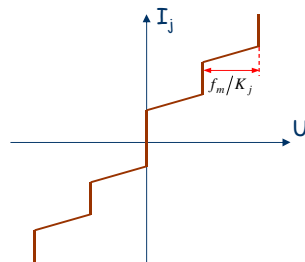
$$K_j = 483597.9 \text{ GHz/V}$$

$$f_m = 9.9546537 \text{ GHz} \rightarrow U \approx 20 \mu\text{V} \dots$$

matryca ~8192-69632 złącz Josephsona



napięcia z zakresu -10 ÷ +10V, niepewność ~10⁻¹⁰

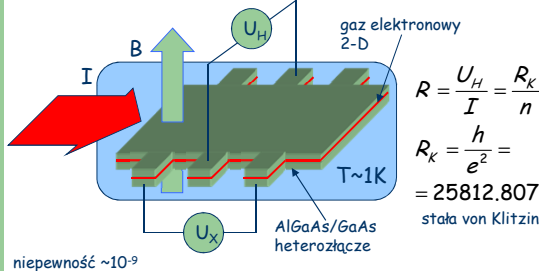


Jednostki - definicje, realizacja, niepewność

rezystancja:

1 om [Ω] jest to rezystancja pomiędzy dwoma punktami przewodnika przez który płynie prąd 1A, wywołując spadek napięcia równy 1V

realizacja wykorzystująca kwantowy efekt Halla

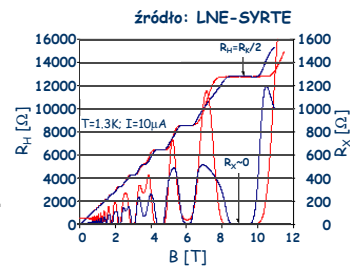


$$R = \frac{U_H}{I} = \frac{R_K}{n}$$

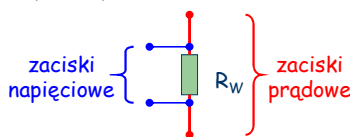
$$R_K = \frac{h}{e^2} = 25812.807 \Omega$$

stała von Klitzinga

niepewność ~10⁻⁹



rezystory wzorcowe 4-ro zaciskowe (Kelvina)



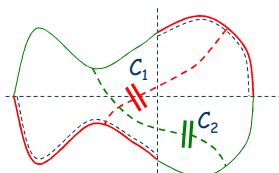
zakres wartości:
1 Ω ÷ 20M Ω
niepewność
~1 ÷ 20 ppm
stabilność
2 ÷ 10 ppm/rok

Jednostki - definicje, realizacja, niepewność

pojemność elektryczna:

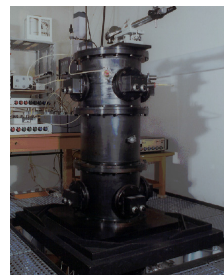
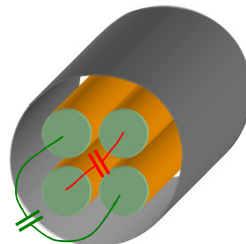
1 farad [F] jest to pojemność kondensatora na którego okładkach powstaje napięcie 1V po naładowaniu go ładunkiem 1C.

kondensator liczalny Thompsona-Lamparda



$$C_1 = C_2 = C_0 = \frac{\epsilon_0}{\pi} \ln 2 = 2.818376 \text{ pF/m}$$

niepewność ~0.02 ppm



źródło: PTB

robocze wzorce pojemności

<10pF - dielektryk powietrzny

<1μF - mika

>1μF - siarczek polipropylenu

niepewność - 0.02 ÷ 2%



źródło: IET-LABS

Jednostki spoza układu SI

jednostki do wyrażania stosunków

neper [Np]

$$L = \ln \frac{q_1}{q_2} \text{ [Np]}$$

bel [B], decybel [dB]

$$L = \log \frac{P_1}{P_2} \text{ [B]} \quad L = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_2} \text{ [dB]} \quad \text{w przypadku mocy}$$

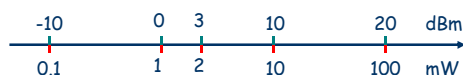
$$20 \cdot \log \frac{X_1}{X_2} \text{ [dB]} \quad \text{dla innych wielkości np. I, U, R itp.}$$

$$L_{dB} = 10 \cdot \log(e^{L_{Np}}) = L_{Np} \cdot 10 \cdot \log e \approx 4.34 \cdot L_{Np}$$

$$L_{Np} = \ln 10^{L_{dB}/10} = L_{dB} \cdot \frac{\ln 10}{10} \approx 0.23 \cdot L_{dB}$$

logarytmiczne jednostki mocy - dBm

$$P_{dBm} = 10 \cdot \log \frac{P}{1 \text{ mW}}$$



inne jednostki logarytmiczne (używane n.p. w akustyce)

dBV - napięcie względem 1 V

dBu - napięcie względem 0.7746 V

Uwagi o dBm-ach

Dodawanie decybeli i dBm-ów - UWAGA!

wynik będzie w ogólności zależał od rodzaju sygnałów i ich relacji fazowych

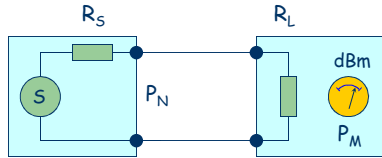
zamiana na napięcie/prąd

$$U_{sk} = \sqrt{1[\text{mW}] \cdot R_L \cdot 10^{P_{dBm}/10}} = \sqrt{R_L[\text{k}\Omega] \cdot 10^{P_{dBm}/10}}$$

$$R_L = 50 \Omega: 0 \text{ dBm} \Rightarrow U_{sk} = 223,6 \text{ mV}$$

$$R_L = 600 \Omega: 0 \text{ dBm} \Rightarrow U_{sk} = 774,6 \text{ mV}$$

(nie)dopasowanie impedancja źródła/obciążenia



jeśli $R_S \neq R_L \Rightarrow P_M \neq P_N; P_M = P_N + K$

$$\text{korekcja: } K = 10 \cdot \log \frac{4R_S R_L}{(R_S + R_L)^2} \text{ [dB]}$$

$$R_S = 50 \Omega; R_L = 600 \Omega \Rightarrow -5,47 \text{ dB}$$

$$R_S = 600 \Omega; R_L = 50 \Omega \Rightarrow -5,47 \text{ dB}$$

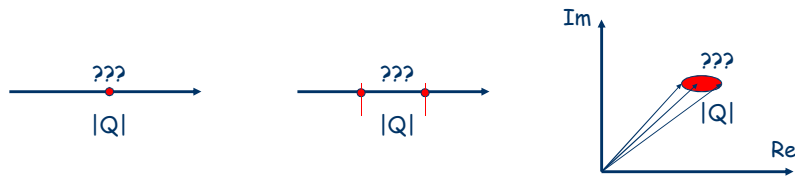
Wartość wielkości, wynik pomiaru

$$Q = |Q| [Q]$$

Q - wartość wielkości (ang. *quantity value*)

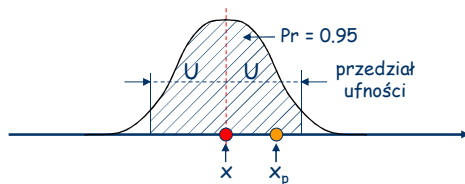
$|Q|$ - wartość liczbowa (ang. *numerical value*)

$[Q]$ - jednostka wielkości (ang. *unit*)



niepewność pomiaru (ang. *uncertainty*):

przedział wokół wartości zmierzonej, w którym ze znaczącym prawdopodobieństwem (np. 95%) znajduje się wartość prawdziwa mierzonej wielkości



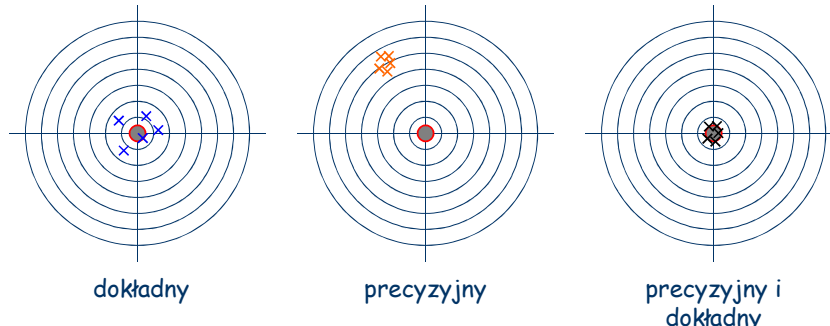
$$\Pr\{x_p \in (-U+x, x+U)\} = 0.95$$

$$\Pr\{x_p \notin (-U+x, x+U)\} = 0.05$$

wynik pomiaru zapisujemy:

$$x \pm U$$

Dokładność, precyzja



dokładność (ang. *measurement accuracy*) - stopień zgodności pomiędzy wartością mierzoną a wartością prawdziwą

precyzja (ang. *measurement precision*) - stopień zgodności pomiędzy wynikami uzyskanymi przy wielokrotnym pomiarze tej samej wielkości

prawdziwość (ang. *measurement trueness*) - stopień zgodności pomiędzy średnią z wyników wielu pomiarów tej samej wielkości oraz wartością prawdziwą

Metody pomiarowe (VIM), wynik pomiaru

bezpośrednia (ang. *direct*)

wartość wielkości mierzonej uzyskujemy bez konieczności dokonywania obliczeń, np.: pomiar napięcia woltomierzem;

pośrednia (ang. *indirect*)

wartość wielkości uzyskujemy mierząc bezpośrednio inne wielkości, od których w znany sposób zależy wielkość poszukiwana i wykonując odpowiednie obliczenia, np.: pomiar rezystancji metodą techniczną lub wyznaczanie obwodu koła na podstawie pomiaru jego średnicy;

$$A = \pi \cdot d$$

$$\begin{array}{r} \pi\pi\pi\dots\dots \\ \times \quad ddd \\ \hline rrrr\dots\dots \\ rrrr\dots\dots \\ +rrrr\dots\dots \\ \hline zzzzz\dots\dots \end{array}$$

Postępowanie uproszczone:

dodawanie/odejmowanie:
zachowujemy w wyniku tyle cyfr po przecinku dziesiętnym, ile ma najmniej dokładny składnik

mnożenie/dzielenie
zachowujemy tyle cyfr znaczących, ile jest w najmniej dokładnym czynniku

potęgowanie/pierwiastkowanie
zachowujemy tyle cyfr znaczących, ile jest w liczbie poddawanej operacji

Zagadnienie to będzie omówione dokładniej podczas wykładu traktującego o wyznaczaniu niepewności pomiarów

Podsumowanie

- pomiar → porównanie z wzorcem i określenie wzajemnych relacji
- porównanie → bezpośrednie lub pośrednie
- zakładamy, że porównanie jest powtarzalne i odtwarzalne
- wykorzystujemy odpowiedni sprzęt i procedury pomiarowe
- wiemy, jak ich używać
- zapewnione są odpowiednie warunki pomiaru
- mamy świadomość, że pomimo starań każdy pomiar jest obarczony niepewnością
- wiemy, jak interpretować wynik pomiaru

błędy grube

uszkodzone przyrządy (kable)

pomiary multimetrem źle nastawionym - ampery, omy itp...

multimetry bateryjne

Literatura/materiały źródłowe

Literatura w języku polskim

- S. Tumański: Technika Pomiarowa, WNT, 2013
- A. Zięba: Analiza danych w naukach ścisłych i technice, PWN, 2013
- J. Dusza, G. Gortat, A. Leśniewski: Podstawy miernictwa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2007
- A. Kamieniecki: Współczesny oscyloskop, btc, 2009
- A. Zatorski, R. Sroka: Podstawy Metrologii Elektrycznej, Wydawnictwa AGH, 2011
- J. Arendarski: Niepewność pomiarów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2003

Literatura w języku angielskim

- S. Tumański: Principles of Electrical Measurements, Taylor & Francis, 2005
- R.A. Witte (Agilent Technologies): Electronic Test Instruments: Analog and Digital Measurements, Prentice Hall, 2002
- SI Units Brochure:
http://www.bipm.org/utis/common/pdf/si_brochure_8_en.pdf
- The NIST Reference on Constants, Units and Uncertainty
<http://physics.nist.gov/cuu/Units/index.html>
- International Vocabulary of Metrology (VIM):
http://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_200_2012.pdf
- R.A. Witte (Agilent Technologies): Spectrum & Network Measurements, Prentice Hall, 1993
- A.K. Ghosh: Introduction to Measurements and Instrumentation, PHI Learning, 2012
- R.B. Northrop: Introduction to Instrumentation and Measurements, Taylor & Francis, 2005