



# Prawo autorskie

Niniejsze materiały podlegają ochronie zgodnie z **Ustawą o prawie autorskim i prawach pokrewnych** (Dz.U. 1994 nr 24 poz. 83 z późniejszymi zmianami).

Materiał te udostępniam **do celów dydaktycznych** jako materiały pomocnicze do wykładu z przedmiotu Metrologia prowadzonego dla studentów Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Mogą z nich również korzystać inne osoby zainteresowane metrologią. Do tego celu materiały te można **bez ograniczeń przeglądać, drukować i kopiować wyłącznie w całości**.

Wykorzystywanie tych materiałów bez zgody autora w inny sposób i do innych celów niż te, do których zostały udostępnione, **jest zabronione**.

W szczególności **niedopuszczalne jest**: usuwanie nazwiska autora, edytowanie treści, kopiowanie fragmentów i wykorzystywanie w całości lub w części do własnych publikacji.

Eligiusz Pawłowski

## Uwagi dydaktyczne

Niniejsza prezentacja stanowi **tylko i wyłącznie materiały pomocnicze** do wykładu z przedmiotu Metrologia prowadzonego dla studentów Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Udostępnienie studentom tej prezentacji nie zwalnia ich z konieczności sporządzania **własnych notatek z wykładów** ani też nie zastępuje **samodzielnego studiowania** obowiązujących podręczników.

Tym samym zawartość niniejszej prezentacji w szczególności **nie może być** traktowana jako zakres materiału obowiązujący na egzaminie.

Na egzaminie obowiązujący jest **zakres materiału faktycznie wyłożony podczas wykładu** oraz zawarty w odpowiadających mu fragmentach **podręczników** podanych w wykazie literatury do wykładu.

Eligiusz Pawłowski

# Tematyka wykładu

**Wzorce miar i etalony**

**Porównywanie wzorców**

**Wzorce państwowe utrzymywane w GUM**

**Budowa i właściwości wybranych wzorców wielkości elektrycznych**

## Wzorce, etalony, metrologia prawna - literatura

1. Dudziewicz J.: Etalony i precyzyjne pomiary wielkości elektrycznych, WKiŁ, Warszawa 1982.
2. Kartaschoff P.: Częstotliwość i czas, WKiŁ, Warszawa 1985.
3. Międzynarodowy słownik metrologii. Pojęcia podstawowe i ogólne oraz terminy z nimi związane, Przewodnik PKN-ISO/IEC Guide 99, PKN, Warszawa 2010.
4. Międzynarodowy słownik podstawowych i ogólnych terminów metrologii, GUM, Warszawa 1996.
5. PN-71/N-02050. Metrologia. Nazwy i określenia
6. Prawo o miarach, ustawa z dnia 11 maja 2001 r., tekst jednolity Dz.U. 2004 nr 243 poz. 2441.

# Gdańskie Wzorce Miar

**GDĄŃSKIE WZORCE MIAR**  
zrekonstruowane w 2005r.  
z inicjatywy i na podstawie projektu Akademii Rzygaczy  
przez pracownię Leonarda Dajkowskiego.

Na sztabach odpowiadających XIX-wiecznym miarom:  
stopie (31,4 cm), łokciowi (66,7cm) i połowie pręta (188,3cm)  
oznaczono również długości miar gdańskich  
używanych przed 1816r.:  
stopę (28,7cm), łokieć (57,4 cm) i sążeń (172,1cm).

Wsparcia udzieliły następujące osoby i instytucje:  
Paweł Adamowicz Prezydent Miasta Gdańska  
Muzeum Historyczne Miasta Gdańska  
Okręgowy Urząd Miar w Gdańsku  
Andrzej Januszajtis

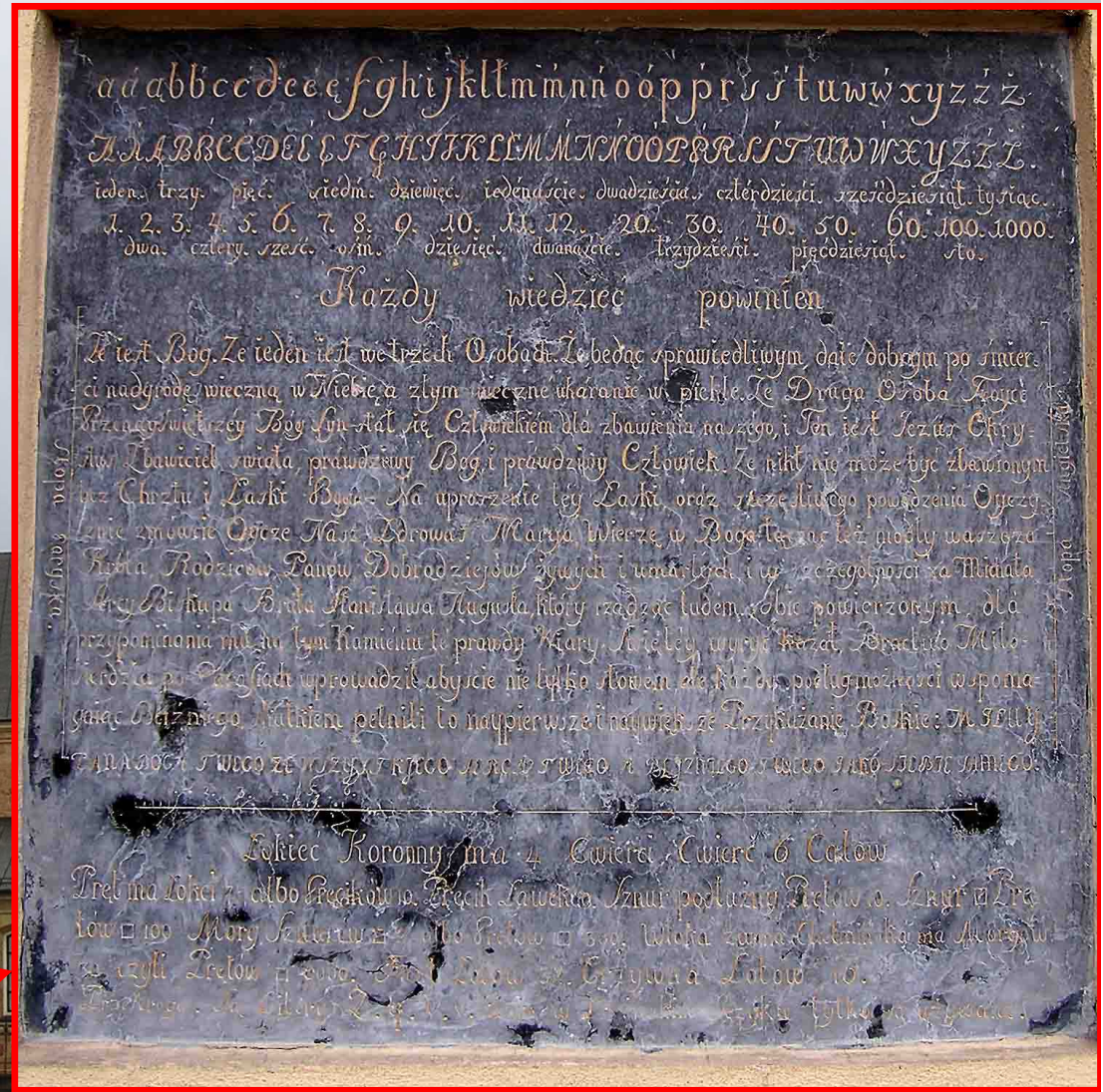
Wejście do Ratusza w  
Gdańsku przy ul. Długiej



Marmurowa tablica z ok. 1791 r.  
„Każdy wiedzieć powinien”

## Kieleckie Wzorce Miar

Katedra w Kielcach,  
Plac NMP 3



Łokieć Koronny ma 4 Cwierce, Cwierć 6 Calów

Pręt ma Łokci 7 ½ , albo Pręcików 10, Pręcik Ławek 10. Sznur podłużny Prętów 10. Sznur □ Prętów □ 100 Morg Sznurów □ 3 albo Prętów □ 300. Włoka zwana Chełmińska ma Morgów 30 czyli Prętów □ 9000 ...

aaabbccddeeeffghijklmnnnoopprrssttuwvxyzzz

AA BB CC DD EE FF GH II KK LL MM NN OO PP RR SS TT UU VV XX YY ZZ LL

ieden. trzy. pięć. siedm. dziewięć. jedenaste. dwadziecia. czterdzieci. sześćdziesiąt. tydzień.

1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8. 9. 10. 11. 12. 20. 30. 40. 50. 60. 100. 1000.

dwa. cztery. sześć. osm. dziesięć. dwanaście. trzydzieci. pięćdziesiąt. sto.

### Kazdy wiedziec powinien

**K**ieś Bog. Ze ieden ieś w trzech Orobach. Ze bedac sprawiedliwym, daie dobrym po smierci nagrode wieczna w Niebie, a zlym wieczne ukaranie w piekle. Ze Druza Oroba Trzyce Przenagowiczyzy Bog Syn Mat. ię Czlowiekim dla zbawienia naszego, i Ten ieś Jezus Chry-  
**S**tao Zbawiciel swiata, prawdziwy Bog, i prawdziwy Czlowiek. Ze nikt nie moze byc zbawionym bez Choztu i Łaski Boga. Na uproszenie łey Łaski, oraz szcześliwego powozdenia Oycze-  
**Z**mie znowie Oycze Nasz. Drowat Marya, wierzze w Boga, łez ię miodly waszszu  
**R**obta Rodzicu, Panow Dobrodziejow, zywyh i umarłych, i w szczełgospoci za Michala  
**A**ry Biskupa, Brata Stanisława Augusta, ktory rządziac ludem, łbie powierzonym, dla  
**p**rzypomiania miłnyh Kamicium te prawdy Mary, Kielecy, wyryt koczat, Bractwo Miło-  
**s**ierdzia, po Pałsiach wprowadzil, abyście nie lękke słowem, ale łozdym, podług możności wspomaga-  
**g**iac Blizniego, Katiciem pelnili to nappierwsze i najwieksze Trzypoluzanie, Błaznie: **M. J. B. U. Y.**  
**T**ANA 2067 SWICO ZE WZYKTYKICE MRE W SWICO, A WZYKTYKICE SWICO JAKO WYSTI AMICO.

Kopca

Kopca

Lokiec Koronny ma 4 Cwierci Cwierc 6 Cielow

Prel ma Lokci 7 albo Prekownik. Prekik Lawekia Sznur podluzny Prelow 10. Sznur 10 Prelow 100 Mary Sznur 100 albo Prelow 1000. Wloka zama Cielmika ma Mary 100  
 100 Prelow 1000. Sznur 100 Prelow 100. Sznur 100 Prelow 100. Sznur 100 Prelow 100.



## Chełmno – Ratusz i wzorzec długości

Ratusz w Chełmnie  
wzniesiony pod  
koniec XIII wieku.

Długość: 4,32 m. Dzieli się na mniejsze jednostki: stopy, łokcie  
i kroki.

Pręt chełmiński - średniowieczny wzorzec miary. Umiejscowiony za zachodnią ścianą Ratusza.

## Starożytne Wzorce Miar

Grecki wzorzec masy wykonany z brązu, ok. 5 wiek p.n.e.



Bronze weight inscribed ΔΙΟΣ ("of Zeus") from Olympia, 5th c. BCE

Museum of the History of the Olympic Games in Antiquity, Olympia, Greece

## Rodzaje narzędzi pomiarowych - przypomnienie [5]

**Narzędzia pomiarowe** – środki techniczne przeznaczone do wykonywania pomiarów:

**1. Wzorce miar** – odtwarzające jedną lub kilka znanych (wzorcowych) wartości danej wielkości,

**2. Przyrządy pomiarowe** – przetwarzające wartości wielkości mierzonej na wskazanie lub równoważną informację ,

**3. Przetworniki pomiarowe** – przetwarzające zgodnie z określonym prawem wartości wielkości wejściowej na wartości wielkości wyjściowej.

## Klasyfikacja narzędzi pomiarowych [1]

| Kryterium podziału  |                     | 1. Spełniana funkcja  |   |
|---------------------|---------------------|---|---|
|                     |                     | Narzędzia kontrolne   | Narzędzia użytkowe                                      |
| 2. Rodzaj narzędzia | Wzorce miar         | Wzorzec <b>jednostki miary</b> , stosowany do kalibracji, <b>etalon</b> | Wzorzec <b>użytkowy</b> , wzorzec stosowany w pomiarach |
|                     | Przyrządy pomiarowe | Przyrząd pomiarowy wzorcowy, stosowany do kalibracji                    | Przyrząd pomiarowy użytkowy, stosowany w pomiarach      |

## Zastosowanie wzorców - wzorcowanie (kalibracja)

**Wzorcowanie** (kalibracja, *ang. calibration*) – zbiór operacji ustalających (w określonych warunkach) relację pomiędzy wartościami wielkości mierzonej **wskazanymi przez przyrząd pomiarowy** (lub układ pomiarowy albo wartościami realizowanymi przez wzorzec miary), a odpowiednimi wartościami wielkości **realizowanymi przez wzorce** jednostki miary.

Wzorcowanie pozwala na wyznaczenie **błędów systematycznych** przyrządu pomiarowego **lub poprawek** dla jego wskazań.

Wynik wzorcowania może być potwierdzony odpowiednim dokumentem: świadectwem wzorcowania lub protokołem wzorcowania.

Wzorcowania nie należy mylić ze **skalowaniem i adjustacją**.

## Skalowanie i adjustacja przyrządu pomiarowego

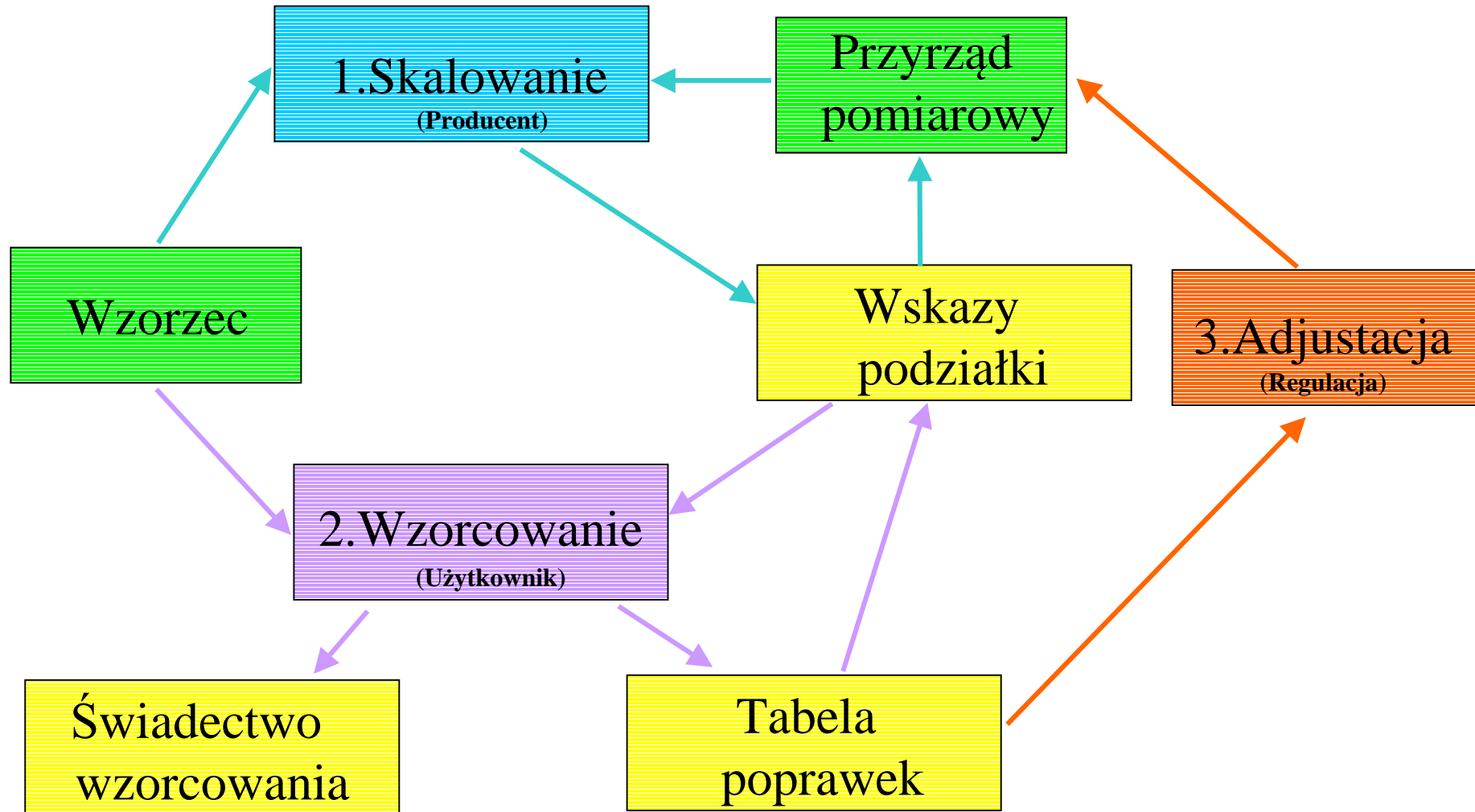
**Skalowanie przyrządu pomiarowego** (*ang. gauging*) [ˈgeɪdʒɪŋ] – ustalenie położenia wskazów (wszystkich lub tylko głównych) na podziałce przyrządu pomiarowego.

**Adjustacja przyrządu pomiarowego** (*ang. adjustment*) [əˈdʒʌstmənt] – czynności mające na celu doprowadzenie przyrządu pomiarowego do stanu działania odpowiadającego jego przeznaczeniu.

Jeśli adjustację przeprowadza się jedynie za pomocą środków przeznaczonych do dyspozycji użytkownika, to jest to **regulacja** przyrządu pomiarowego.

Przykładem adjustacji jest **zerowanie** przyrządu pomiarowego.

# Wzorcowanie - skalowanie - adjustacja



## Spójność pomiarowa

**Spójność pomiarowa** (*ang. traceability*) – właściwość wyniku pomiaru lub wzorca jednostki miary polegająca na tym, że można je powiązać z określonymi odniesieniami, na ogół z wzorcami państwowymi, za pośrednictwem nieprzerwanego łańcucha porównań, z których wszystkie mają określone niepewności.

Nieprzerwany łańcuch porównań nazywa się **łańcuchem powiązań** (łańcuch spójności pomiarowej *ang. traceability chain*).

Każde porównanie w łańcuchu powiązań wnosi swój udział do niepewności pomiaru.

Używa się również przymiotnika **„spójny”** w odniesieniu do wyniku pomiaru lub wzorca, które wykazują spójność pomiarową.



## Wzorzec jednostki miary, etalon [4]

**Wzorzec jednostki miary, etalon** (*ang. standard*) – wzorzec miary (przyrząd pomiarowy, materiał odniesienia lub układ pomiarowy) przeznaczony do zdefiniowania, zrealizowania, zachowania lub odtwarzania jednostki miary albo jednej lub wielu wartości pewnej wielkości i **służący jako odniesienie.**

Uwagi:

1. Etalon może być używany tylko jako odniesienie dla innych wzorców, **nie może być bezpośrednio używany w pomiarach.**

2. Dla polepszenia właściwości użytkowych stosowane są wzorce **grupowe**, składające się z wielu niezależnych wzorców.

## Materiał odniesienia

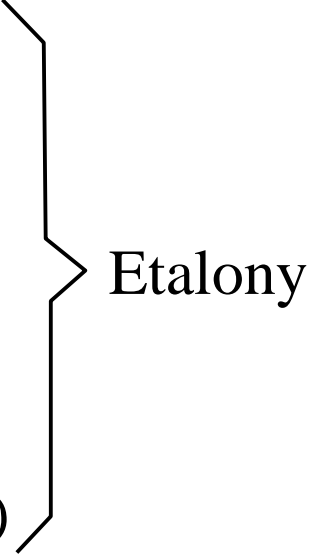
**Materiał odniesienia** (*ang. reference material*) – materiał lub substancja, których jedna lub więcej wartości ich właściwości są dostatecznie jednorodne i na tyle dobrze określone, aby mogły być stosowane do **wzorcowania przyrządu**, do oceny metody pomiarowej lub do przypisania wartości właściwościom innych materiałów.

Uwagi:

1. Materiał odniesienia może być ciałem czystym lub mieszaniną i występować pod postacią gazu, cieczy lub ciała stałego
2. Materiał odniesienia jest substancją, etalon jest pojęciem **szerszym** i może być substancją, przyrządem pomiarowym lub wieloma przyrządami połączonymi w jeden układ.

## Hierarchia wzorców

Podział wzorców ze względu na zajmowane miejsce w hierarchii:

- Wzorzec (etalon) podstawowy
  - Wzorzec (etalon) wtórny
  - Wzorzec (etalon) świadek
  - Wzorzec (etalon) pośredniczący
  - Wzorzec (etalon) odniesienia
  - Wzorzec (etalon) roboczy (kontrolny)
  - Wzorzec użytkowy
- 
- Etalony

## Wzorzec podstawowy jednostki miary

**Wzorzec podstawowy (pierwotny) jednostki miary** (etalon podstawowy, pierwotny) (*ang. primary standard*) – wzorzec jednostki miary, który jest **ustalony lub powszechnie uznany** jako charakteryzujący się najwyższą jakością metrologiczną i którego wartość **jest przyjęta bez odniesienia** do innych wzorców miary tej samej wielkości.

Uwagi:

1. Wzorzec podstawowy często jest realizowany jako **wzorzec grupowy**.

## Wzorzec wtórny jednostki miary

**Wzorzec wtórny jednostki miary (etalon wtórny)** (*ang. secondary standard*) – wzorzec jednostki miary, którego wartość jest utworzona przez **porównanie z wzorcem pierwotnym** jednostki miary tej samej wielkości.

## Wzorzec świadek jednostki miary

**Wzorzec świadek** – wzorzec przeznaczony do kontroli stałości wzorca podstawowego lub do zastąpienia go w przypadku uszkodzenia. Właściwości wzorca świadka **nie są gorsze** niż właściwości wzorca podstawowego. Wzorca świadka nigdy nie używa się do innych celów, nawet do sprawdzania innych wzorców.

## Wzorzec odniesienia jednostki miary

**Wzorzec odniesienia jednostki miary (etalon odniesienia)** (*ang. reference standard*) – wzorzec jednostki miary o najwyższej zazwyczaj jakości metrologicznej dostępny **w danym miejscu** lub danej organizacji, który stanowi odniesienie dla wykonywanych tam pomiarów.

Uwagi:

1. Wzorzec odniesienia służy do wzorcowania wzorców roboczych.
2. W niektórych dziedzinach używa się pojęcia **kalibrator** .

## Wzorzec roboczy jednostki miary

**Wzorzec roboczy jednostki miary (etalon roboczy)** (*ang. working standard*) – wzorzec jednostki miary używany zwykle do **wzorcowania lub sprawdzania wzorców miar użytkowych**, przyrządów pomiarowych lub materiałów odniesienia.

Uwagi:

1. Wzorcowanie wzorca roboczego przeprowadza się zwykle przy użyciu wzorca odniesienia jednostki miary.
2. Wzorzec roboczy jednostki miary może być okresowo stosowany w celu upewnienia się, że pomiary są przeprowadzane poprawnie, wtedy jest nazywany **wzorcem kontrolnym jednostki miary**.

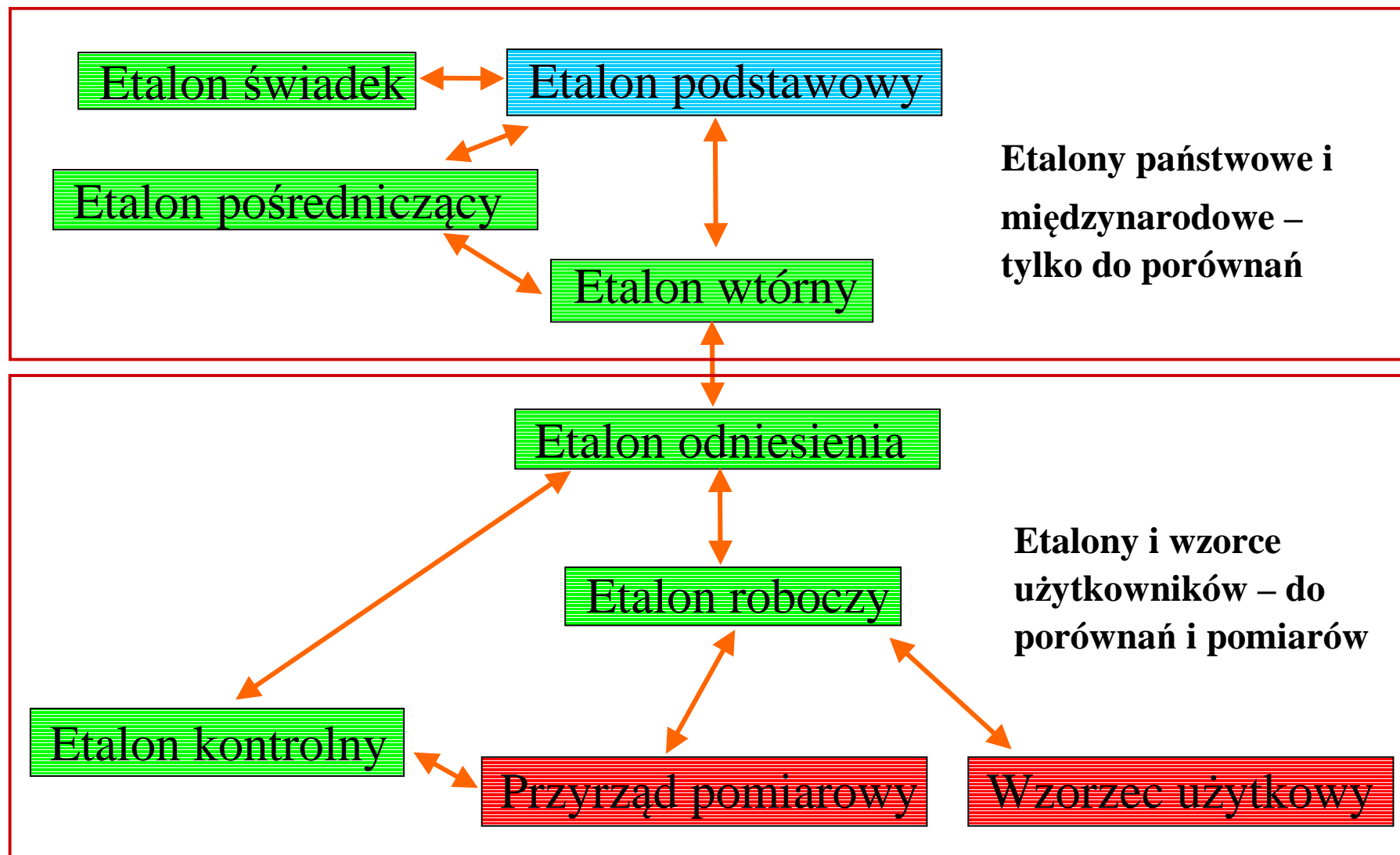


## Wzorzec pośredniczący

**Wzorzec pośredniczący jednostki miary** (*ang. transfer standard*)

– wzorzec miary stosowany jako pośrednik do porównywania innych wzorców jednostki miary. Często posiada specjalną konstrukcję umożliwiającą transport z jednego miejsca na drugie, wtedy może być wykorzystywany jako **wzorzec przenośny** (*ang. travelling standard*)

## Hierarchia wzorców - diagram zależności



## Własność wzorców

Podział wzorców ze względu na właściciela:

- Wzorzec (etalon) **międzynarodowy**
- Wzorzec (etalon) **państwowy**
- Wzorzec (etalon) **organizacji** metrologicznej
- Wzorzec (etalon) końcowego **użytkownika**

## Wzorzec międzynarodowy jednostki miary

**Wzorzec międzynarodowy jednostki miary** (etalon międzynarodowy) (*ang. international standard*) – wzorzec jednostki miary **uznany umową międzynarodową** za podstawę do przypisywania wartości innym wzorcom jednostki miary danej wielkości i przeznaczony do stosowania w skali światowej.

Wzorce międzynarodowe znajdują się pod kontrolą **BIPM** (*fran. Bureau International des Poids et Mesures*) – Międzynarodowe Biuro Wag i Miar z siedzibą w Sevres pod Paryżem  
<http://www.bipm.org/>

## Wzorzec państwowy jednostki miary

**Wzorzec państwowy jednostki miary** (etalon państwowy) (*ang. national standard*) – wzorzec jednostki miary uznany urzędowo w danym kraju za podstawę do przypisywania wartości innym wzorcom jednostki miary danej wielkości

W Polsce wzorce państwowe znajdują się pod opieką **GUM** – **Głównego Urzędu Miar** z siedzibą w Warszawie.

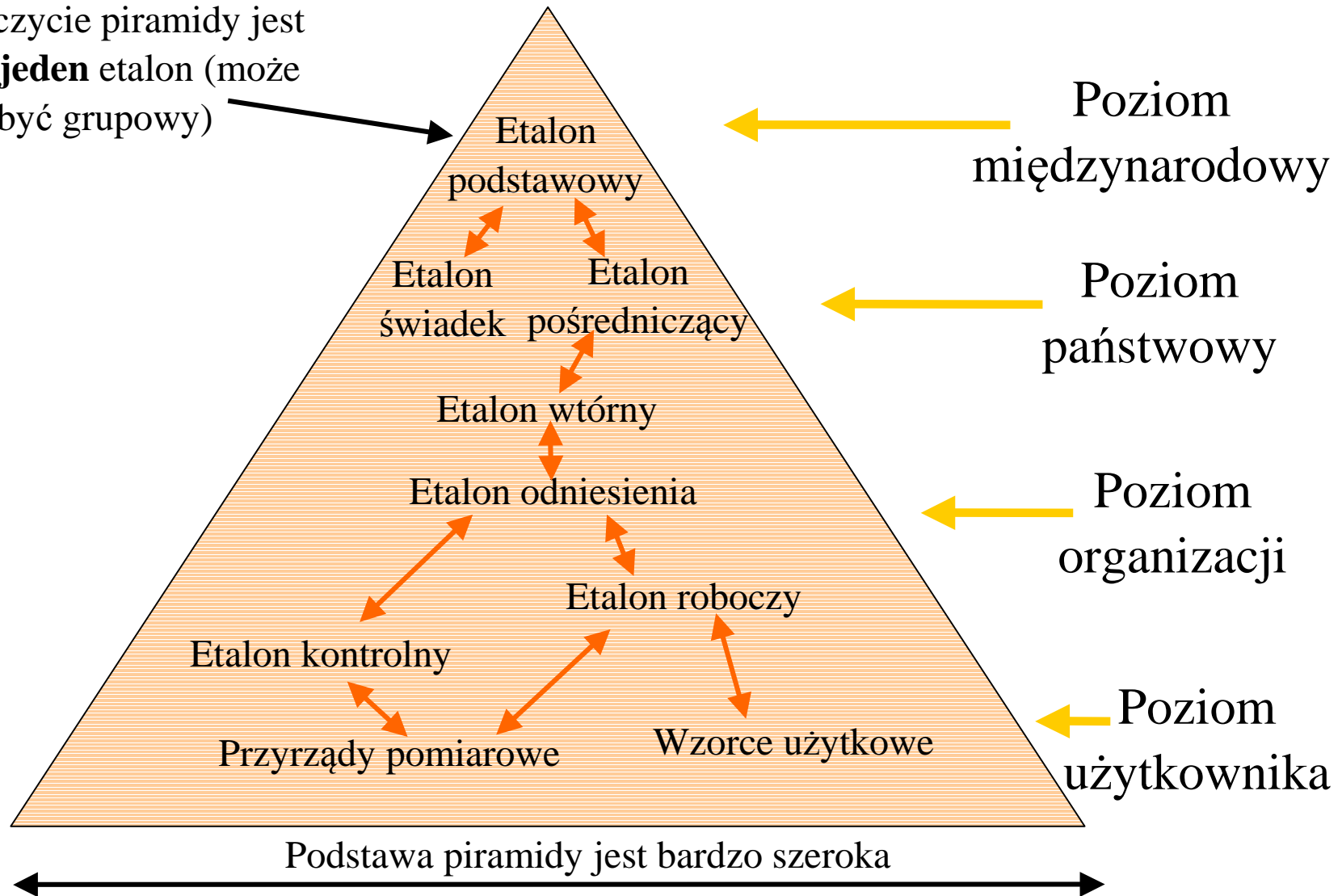
<http://www.gum.gov.pl>

**Decyzję w zakresie uznania państwowego wzorca jednostki miary wydaje Prezes GUM.**



# Piramida wzorców

Na szczycie piramidy jest tylko **jeden** etalon (może być grupowy)



Źródło: Sejm RP,  
<http://isip.sejm.gov.pl/>

492

## OBWIESZCZENIE PREZESA GŁÓWNEGO URZĘDU MIAR

z dnia 23 czerwca 2003 r.

w sprawie wzorców jednostek miar spełniających warunki określone dla państwowych wzorców jednostek miar

Na podstawie art. 16 pkt 2 ustawy z dnia 11 maja 2001 r. — Prawo o miarach (Dz. U. Nr 63, poz. 636 i Nr 154, poz. 1800 oraz z 2002 r. Nr 155, poz. 1286 i Nr 166, poz. 1360) ogłasza się wzorce jednostek miar spełniające warunki określone dla państwowych wzor-

ców jednostek miar, stanowiące załącznik do obwieszczenia.

Prezes Głównego Urzędu Miar: *W. Sanocki*

Załącznik do obwieszczenia Prezesa Głównego Urzędu Miar z dnia 23 czerwca 2003 r. (poz. 492)

## WZORCE JEDNOSTEK MIAR SPEŁNIAJĄCE WARUNKI OKREŚLONE DLA PAŃSTWOWYCH WZORCÓW JEDNOSTEK MIAR

| Lp. | Nazwa wzorca jednostki miary                     | Podstawowe części składowe i dane identyfikacyjne państwowego wzorca jednostki miary  | Miejsce stosowania i przechowywania państwowego wzorca jednostki miary       | Data wydania   | Numer     |
|-----|--|---|--|--|-----------|
|     |  |   |  | decyzji Prezesa GUM uznającej wzorzec jednostki miary za państwowy wzorzec jednostki miary |           |
| 1   | 2  | 3   | 4  | 5  | 6         |
| 1   | Państwowy wzorzec jednostki miary długości       | Stanowisko odtwarzające wzorcową długość fali promieniowania emitowanego przez laser He-Ne stabilizowany jodem  | Główny Urząd Miar, Zakład Długości i Kąta, 00-139 Warszawa, ul. Elekoralna 2 | 2003-04-24   | UW 1/2003 |
| 2   | Państwowy wzorzec jednostki miary kąta płaskiego | Stanowisko do odtwarzania jednostki miary kąta płaskiego, w którym odtwarzanie jednostki miary realizowane jest poprzez podział kąta pełnego. Generator małych kątów do odtwarzania jednostki miary kąta płaskiego, w którym odtwarzanie jednostki miary realizowane jest poprzez wyznaczenie stosunku dwóch długości | Główny Urząd Miar, Zakład Długości i Kąta, 00-139 Warszawa, ul. Elekoralna 2 | 2003-04-24   | UW 2/2003 |
| 3   | Państwowy wzorzec                                | Zespół pięciu punktów kwarcowych  | Główny Urząd Miar  | 2003-04-24   | UW 3/2003 |



## Wymagania stawiane wzorcom

### **Wzorce jednostek miar powinny spełniać wymagania:**

- niezmienność w czasie,
- duża dokładność,
- łatwa odtwarzalność,
- łatwa porównywalność,
- łatwość stosowania.

## Parametry wzorca miar

### Do parametrów wzorca należą:

- nominalna wartość miary wzorca,
- niedokładność miary wzorca,
- okres zachowania niedokładności miary wzorca,
- warunki, w których miara i niedokładności są zachowane.

### Uwagi:

1. Dla wzorca określa się niezależnie warunki **użytkowania** i warunki **przechowywania** (większość czasu wzorzec jest przechowywany!).
2. Wszystkie parametry wzorca podawane są na **tabliczce znamionowej** lub w jego **metryce**.
3. Zachowanie parametrów wzorca w okresie jego użytkowania wymaga odpowiedniego **utrzymania wzorca**.

## Utrzymanie wzorca jednostki miary

**Utrzymanie wzorca jednostki miary** (konserwacja) – zbiór operacji niezbędnych do utrzymania charakterystyk metrologicznych wzorca w ustalonych granicach.

Utrzymanie wzorca zazwyczaj obejmuje: okresową **weryfikację** lub **wzorcowanie**, **przechowywanie** w odpowiednich warunkach i przestrzeganie środków ostrożności w **użytkowaniu**.

**Weryfikacja** jest to zapewnienie obiektywnego dowodu, że dany przedmiot spełnia określone wymagania.

Uwagi:

1. **Weryfikacja** jest pojęciem szerszym od **wzorcowania**.
2. **Wzorcowanie** może być jednym z elementów **weryfikacji**.

## Wzorce miar wielkości elektrycznych

Do **najczęściej** wykorzystywanych wzorców miar wielkości elektrycznych należą wzorce:

- siły elektromotorycznej (napięcia),
- prądu,
- rezystancji,
- pojemności,
- indukcyjności własnej i wzajemnej,
- częstotliwości.

## Państwowe wzorce miar wielkości elektrycznych w GUM

|                                 |           |   |
|---------------------------------|-----------|---|
| Napięcie elektryczne stałe (DC) | Pierwotny | Stanowisko wzorca Josephsona o wartości nominalnej napięcia elektrycznego $(0 \div 10)$ V wykonane i zainstalowane przez firmę RMC (USA) z oprogramowaniem NISTVolt.<br>Niepewność rozszerzona względna odtwarzania jednostki miary: $2 \cdot 10^{-9}$ przy poziomie ufności 95 %.                              |
| Opór elektryczny                | Wtórny    | Grupa sześciu oporników o wartości nominalnej oporu elektrycznego $1 \Omega$ wzajemnie porównywana komparatorem prądowym mostkowym.<br>Niepewność rozszerzona względna odtwarzania jednostki miary we wzorcu grupowym $1 \cdot 10^{-6}$ przy poziomie ufności 95 % (w odniesieniu do wzorca pierwotnego w BIPM) |

**BIPM - Bureau International des Poids et Mesures, Sevres, Paris, France.**

**BIPM (Międzynarodowe Biuro Wag i Miar) jest instytucją międzynarodową z siedzibą we Francji, w Sevres pod Paryżem.**

## Państwowe wzorce miar wielkości elektrycznych w GUM, c.d.

|                       |        |  |
|-----------------------|--------|--|
| Pojemność elektryczna | Wtórny | Grupa czterech wzorcowych kondensatorów kwarcowych o wartości nominalnej pojemności elektrycznej 10 pF wzajemnie porównywana metodą mostkową.<br>Niepewność rozszerzona względna odtwarzania jednostki miary we wzorcu grupowym: $1 \cdot 10^{-6}$ (1000 Hz) oraz $4 \cdot 10^{-7}$ (1592 Hz) przy poziomie ufności 95 % (w odniesieniu do wzorca pierwotnego – kondensatora obliczeniowego – w PTB) |
|-----------------------|--------|--|

**PTB - Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin, Deutschland.**

**PTB jest niemieckim urzędem państwowym spełniającym funkcję analogiczną do polskiego GUM (Głównego Urzędu Miar).**

## Państwowe wzorce miar wielkości elektrycznych w GUM, c.d.

|                      |   |   |
|----------------------|---|---|
| Czas i częstotliwość | Wtórny (pracuje jako część międzynarodowego wzorca zespolowego) | <p>Dla przedziału czasu: <math>0,1 \mu\text{s} \div 1 \text{s}</math>.</p> <p>Niepewność rozszerzona: <math>1,3 \cdot 10^{-14} \text{s}</math> przy poziomie ufności 95 % (współczynnik rozszerzenia <math>k = 2</math>) i czasie uśredniania 5 dni.</p> <p>Dla częstotliwości: <math>1 \text{Hz} \div 10 \text{MHz}</math>.</p> <p>Niepewność rozszerzona: <math>1,3 \cdot 10^{-14} \text{Hz}</math> przy poziomie ufności 95 % (współczynnik rozszerzenia <math>k = 2</math>) i czasie uśredniania 5 dni.</p> <p>Dla skali czasu UTC (GUM): różnica względem UTC jest utrzymywana w granicach <math>(-200 \div 200) \text{ns}</math>.</p> <p>Niepewność rozszerzona wyznaczenia różnicy skali czasu UTC (GUM) względem UTC, prognozowanej na dzień bieżący: 27 ns przy poziomie ufności 95 % (współczynnik rozszerzenia <math>k = 2</math>) i czasie uśredniania 5 dni.</p> |
|----------------------|---|---|

## Niepewności wzorców miar wielkości elektrycznych w GUM

- siły elektromotorycznej:  $2 \cdot 10^{-9}$  V/V
- prądu:  $6 \cdot 10^{-6}$  V/V
- rezystancji :  $1 \cdot 10^{-6}$   $\Omega/\Omega$
- pojemności :  $4 \cdot 10^{-7}$  F/F
- częstotliwości :  $1,3 \cdot 10^{-14}$  V/V

**$\pm 1$  sekunda / 3 mln lat**

**Wniosek: wzorce częstotliwości i czasu należą do najdokładniejszych wzorców stosowanych obecnie w pomiarach**



## Inne wzorce miar utrzymywane w GUM

Tak jak wzorzec **podstawowy** w Sèvres, polski wzorzec **wtórny** został wykonany przez brytyjską firmę Johnson Matthey ze stopu platyny i irydu. Jest przechowywany w sejfie pod dwoma szczelnymi, szklanymi kloszami na specjalnej podstawie metalowej.

Został zakupiony w roku 1952 za 80 tyś. 532 zł 78 groszy (średnia pensja w Polsce wynosiła wtedy 650 zł miesięcznie).



Państwowy wzorzec (wtórny) jednostki miary masy utrzymywany w GUM o wartości nominalnej

$$m_{\text{nom}} = 1\text{kg} + 227 \cdot 10^{-9}\text{kg} \pm 2,3 \cdot 10^{-9}\text{kg}$$

Źródło: Główny Urząd Miar, <http://www.gum.gov.pl>

## Wzorce napięcia

Współcześnie jako wzorce napięcia wykorzystywane są :

- **Złącze Josephsona**, wykorzystywane obecnie jako wzorce pierwotne jednostki miary (etalony) napięcia,
- **Ogniwo Westona**, wykorzystywane obecnie jako wzorce (etalony) odniesienia i wzorce niższych rzędów, do niedawna wykorzystywane jako etalony pierwotne,
- **Dioda Zenera**, wykorzystywane głównie jako wzorce robocze.

## Złącze Josephsona (1962) – efekt stałoprądowy

Złącze Josephsona składa się z dwóch nadprzewodników rozdzielonych cienką warstwą dielektryka (1-2) nm.

W temperaturze ciekłego helu 4,2K przez warstwę dielektryczną może przepływać prąd (tzw. prąd tunelowy), będący sumą prądu pojedynczych elektronów i elektronów związanych w pary.

**Stałoprądowy efekt Josephsona** polega na tym, że przez złącze może przepływać prąd stały o wartości mniejszej od pewnej wartości krytycznej  $I_k$  nie wywołując spadku napięcia na złączu.

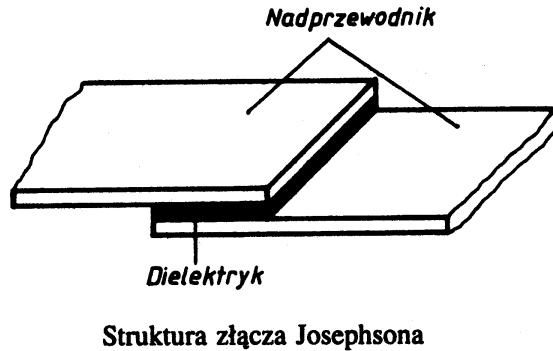
## Złącze Josephsona (1962) – efekt zmiennoprądowy

**Zmiennoprądowy wewnętrzny efekt Josephsona** występuje w przypadku umieszczenia złącza spolaryzowanego prądem stałym o wartości większej od wartości krytycznej w słabym (1mT) stałym polu magnetycznym. Wówczas przez złącze, oprócz prądu stałego, płynie również prąd przemienny o częstotliwości zależnej od napięcia  $U$  polaryzującego złącze zgodnie z zależnością:

$$f = \frac{2e}{h} U$$

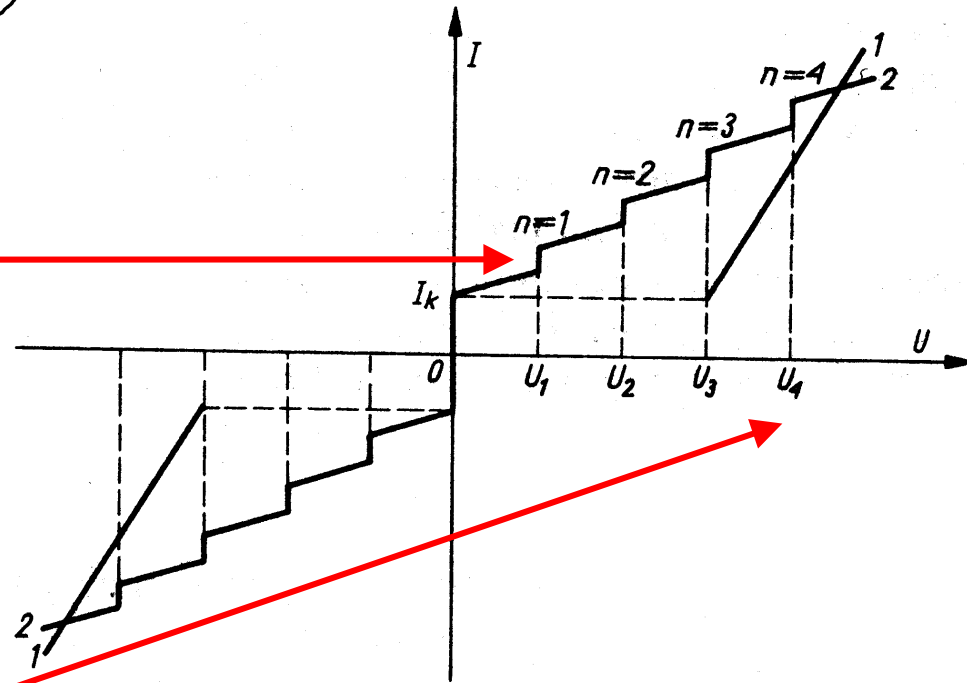
w której:  $e$  - ładunek elektronu,  
 $h$  - stała Plancka

# Złącze Josephsona (1962) – wykorzystywane zjawisko



Schodkowa charakterystyka prądowo-napięciowa przy zewnętrznym polu o częstotliwości  $f_s$

$$n \cdot f_s = \frac{2e}{h} U_n$$



Charakterystyka prądowo-napięciowa złącza Josephsona  
 1 — bez zewnętrznego pola magnetycznego,  
 2 — z zewnętrznym zmiennym polem magnetycznym

## Złącze Josephsona – właściwości fizyczne

Charakterystyka  $I = f(U)$  złącza ma przebieg schodkowy. Skok występuje przy napięciu  $U_n$  ( $n$  – numer kolejny schodka):

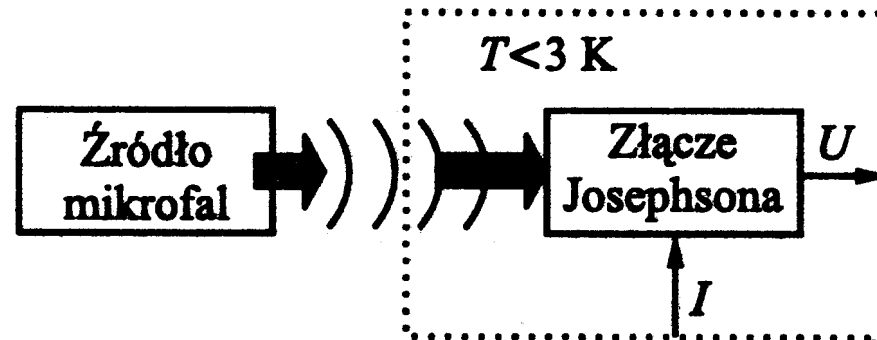
$$n \cdot f_s = \frac{2e}{h} U_n$$

Mierząc  $f_s$  (z błędem na poziomie  $10^{-10}$ ) można bardzo dokładnie wyznaczyć napięcie schodkowe  $U_n$ . Możliwe jest więc wykorzystanie złącza Josephsona do odtwarzania jednostki napięcia. Problemem jest tylko dokładne ustalenie wartości  $e$  i  $h$ .

Wartość stałej Josephsona została ustalona przez BIPM w 1990 r.

$$\frac{2e}{h} = 483\,597,9 \text{ GHz} / \text{V}$$

## Złącze Josephsona – budowa wzorca

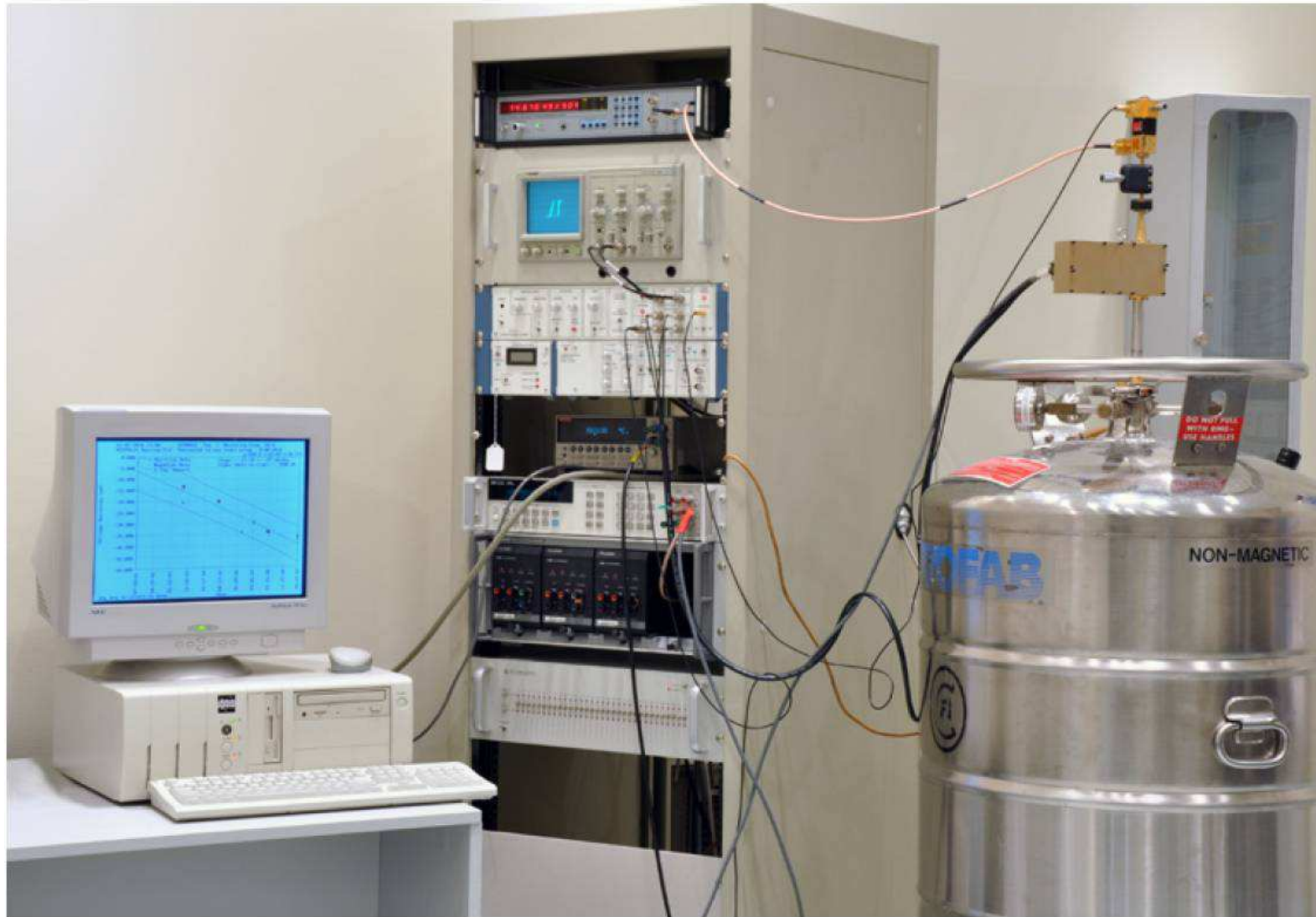


Napięcie na pojedynczym złączu jest poniżej 1mV. Dla częstotliwości 10GHz „schodek” napięcia ma ok. 20 $\mu$ V.

W praktyce stosuje się połączone szeregowo złącza (nawet do 20000 złączy), co pozwala otrzymać napięcie 10V. Niepewność takiego wzorca jest na poziomie 10<sup>-7</sup> lub lepsza.

W GUM pracuje wzorzec na złączu Josephsona firmy RMC (USA).

# Wzorzec napięcia na złączu Josephsona w GUM





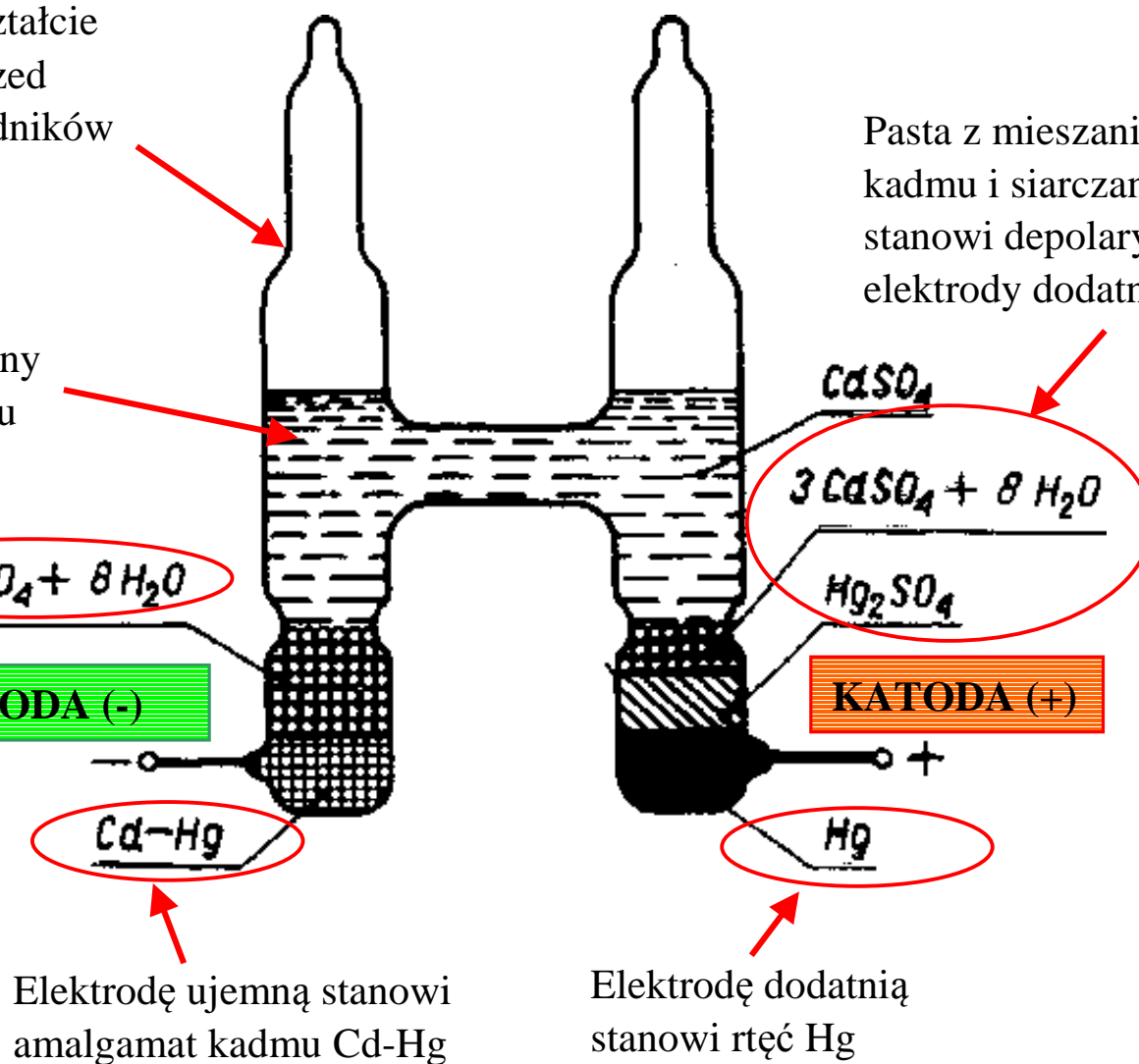
# Ogniwo Westona nasycone – budowa (1893 US Patent)

Pojemnik szklany w kształcie litery H zabezpiecza przed wymieszaniem się składników

Elektrolitem jest nasycony roztwór siarczanu kadmu

Dzięki kryształom siarczanu kadmu roztwór jest nasycony w każdej temperaturze

Pasta z mieszaniny siarczanu kadmu i siarczanu rtęci stanowi depolaryzator elektrody dodatniej



# Ogniwo Westona – 494,827 US Patent, 4 april 1893

(No Model.)

E. WESTON.  
VOLTAIC CELL.

No. 494,827.

Patented Apr. 4, 1893.

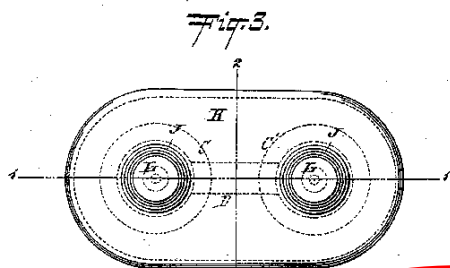
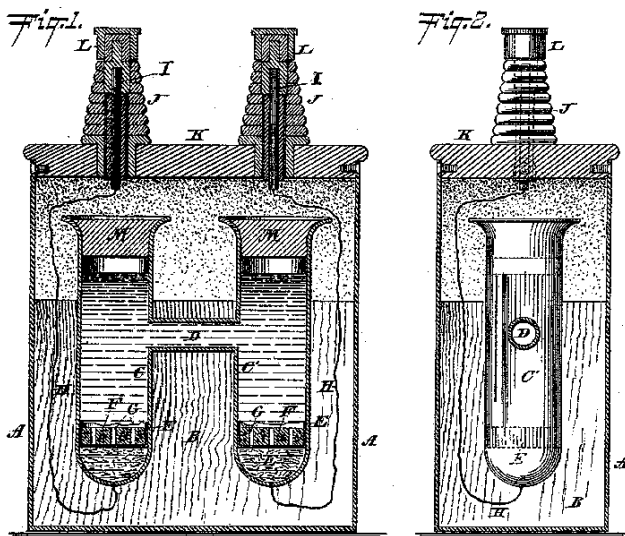
UNITED STATES PATENT OFFICE.

EDWARD WESTON, OF NEWARK, NEW JERSEY.

VOLTAIC CELL.

SPECIFICATION forming part of Letters Patent No. 494,827, dated April 4, 1893.

Application filed November 24, 1891. Serial No. 412,933. (No model.)



WITNESSES:  
*Gustav Westend*  
*Mr. Borch*

INVENTOR  
*Edward Weston*  
BY *Mark Benjamin*  
ATTORNEY.

To all whom it may concern:  
Be it known that I, EDWARD WESTON, of Newark, Essex, county New Jersey, have invented a new and useful Voltaic Cell, of which the following is a specification.  
I have discovered a voltaic cell, the temperature coefficient of which is practically invariable; in other words, a cell which is free from temperature error, or in which the electromotive force does not depend upon the temperature of the cell. Such a cell has hitherto been unknown in the art. While a cell of this character may be applied to various uses, it will find its principal employment and be of the highest utility as a standard of measurement of electromotive force. There is, at the present time, no absolute standard of the unit of electromotive force, (the volt) but there is a variety of cells termed "standards" with which comparisons are made. In all of these cells, the effect of change of temperature is to change the value of the electromotive force. In the improved Clark standard cell, for example, which contains amalgamated platinum wire and a rod of pure zinc as elements, embedded in a paste of pure mercurous sulphate and a saturated solution of pure zinc sulphate, the effect of change of temperature is to change the value of the electromotive force about .077 per degree centigrade. It will be apparent that such a cell cannot be called a "standard" cell in any proper sense of the term, inasmuch as its indications depend, first, upon constantly varying temperatures, and second, upon the recognition of these variations through some other device; as for example, a thermometer, which in turn becomes the standard.  
In cells containing a sulphate of zinc solution, the density of the solution is dependent upon the temperature of the solvent (water) in which the zinc salt is dissolved; and with every change of density, there is a corresponding change of electromotive force; the latter rising to a marked extent as density diminishes. Furthermore, in all so-called standard cells, the thing, the cell, does local action of apparent

discovery to the purposes of a standard cell, I must not only devise a cell in which the value of the electromotive force does not change with temperature, but also one which contains such substances as will not cause local action to affect the electromotive force.  
I have discovered that the electromotive force of all cadmium salts is practically independent of temperature changes. This appears to be due to the fact that such salts are equally as soluble in hot as in cold water; the density of the solution remaining substantially the same, so that there is no disturbance of electromotive force due to changes in density. The chemical affinities in the cell are substantially the same, no matter what the temperature of the cell may be within reasonable limits; and in fact, we have the very remarkable condition of the action of chemical affinities being practically unhelpt by heat. Any salt of cadmium may be used, the acid of which forms a practically insoluble compound with mercury when the salt is in the state of a saturated solution in water, or in a solution of the salt of cadmium employed. Such salts, for example, are the sulphate, the chloride, the bromide and the iodide. I may use a single salt or I may use combinations of these various salts with any insoluble salt and mercury. The ingredients of the cell will depend upon the use to which it is to be put. If, for example, it is to be employed as an absolute standard, then it should be so made as to be absolutely permanent; and in such condition, it may be supplied to the market as a completed article of manufacture; or the cells may be put together by the user and intended only for an hour or two's employment. In that case, it is immaterial if the compounds become impaired in efficiency at the end of that time, since they may be thrown aside and be replaced on the next occasion for use.  
I may arrange the ingredients of the cell in either of three ways. First, I may use an electrolyte composed of a saturated solution

Źródło: United States Patent and Trademark Office,

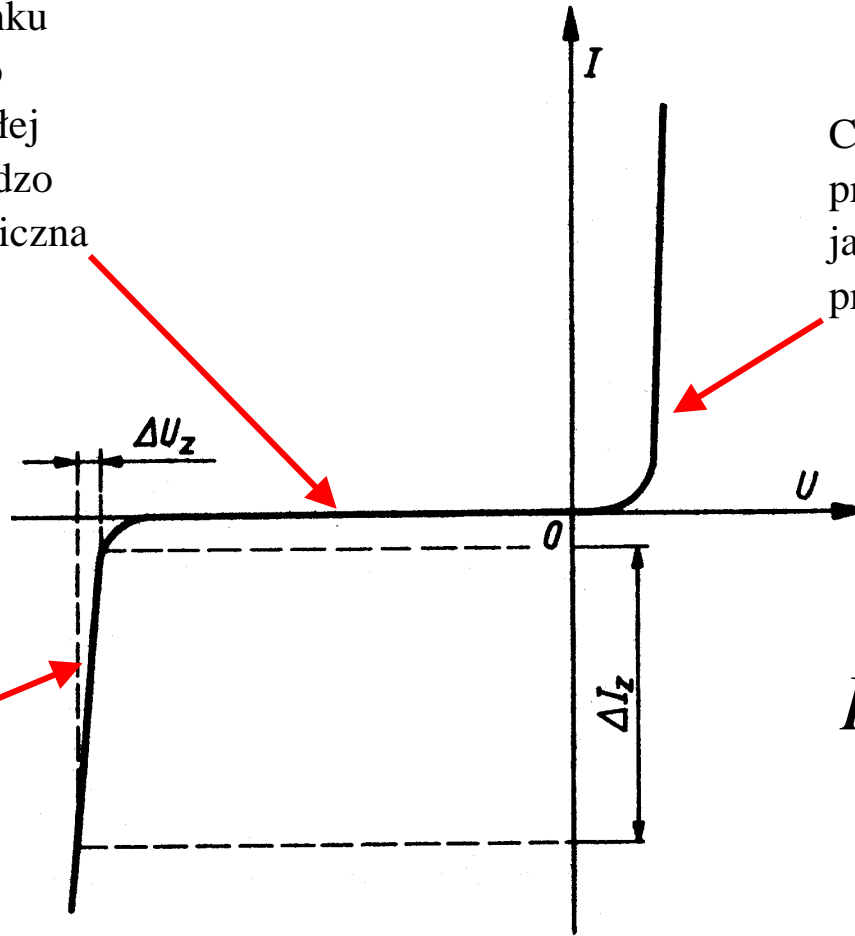
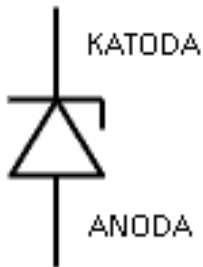
<http://www.uspto.gov/>

## Ogniwo Westona nasycone - właściwości

1. Wartość siły elektromotorycznej w temperaturze równej  $+20^{\circ}\text{C}$  wynosi od **1,018540V** do **1.018730V** (zależnie od jakości użytych materiałów), klasa dokładności od 0,01 do 0,0002 (2ppm/rok).
2. Wartość siły elektromotorycznej ogniwa nasyconego jest zależna od **temperatury**. W obudowie powinno znajdować się gniazdo na termometr umożliwiający pomiar temperatury ogniwa.
3. Ogniwa nasycone są **bardzo wrażliwe na wstrząsy**.
4. Ogniwa nasycone mają **dużą rezystancję wewnętrzną** rzędu  $1\text{k}\Omega$  i niewielką obciążalność prądową poniżej  $1\mu\text{A}$ . (obciążenie rezystancją powyżej  $1\text{M}\Omega$ ). Pobór prądu powyżej  $100\mu\text{A}$  trwale uszkadza źródło (obciążenie rezystancją poniżej  $9\text{k}\Omega$ ).
5. Odporniejsze mechanicznie i elektrycznie są ogniwa nienasycone, posiadają one jednak gorsze parametry metrologiczne.

# Dioda Zenera – charakterystyka I-U

Charakterystyka w kierunku zaporowym, **początkowo** analogiczna jak dla zwykłej diody prostowniczej (bardzo **duża rezystancja dynamiczna**  $R_d$ )



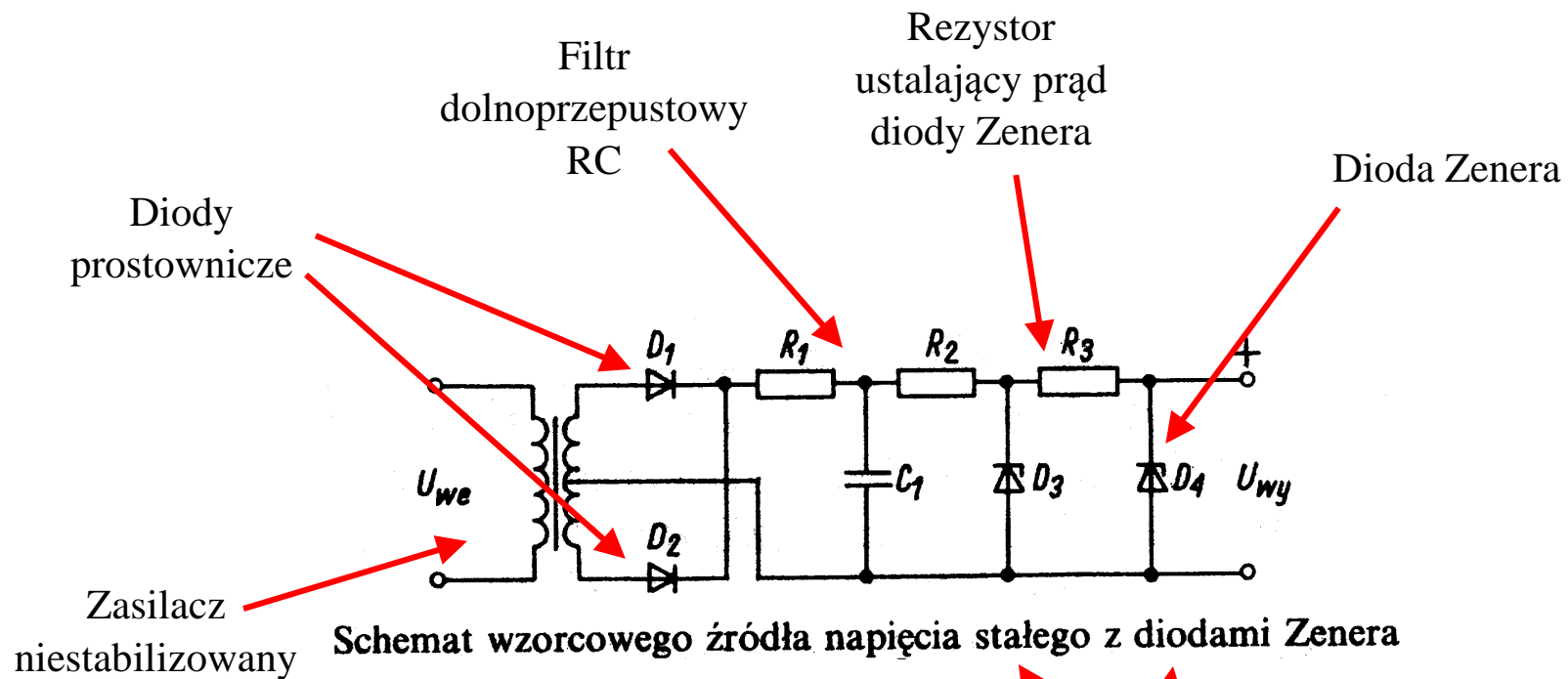
Charakterystyka w kierunku przewodzenia, analogiczna jak dla zwykłej diody prostowniczej

Stromy fragment charakterystyki w kierunku zaporowym, wykorzystywany do stabilizowania napięć (bardzo **mała rezystancja dynamiczna**  $R_d$ )

$$R_d = \frac{\Delta U_z}{\Delta I_z}$$

**Charakterystyka prądowo-napięciowa diody Zenera**

# Dioda Zenera – budowa wzorca prostego

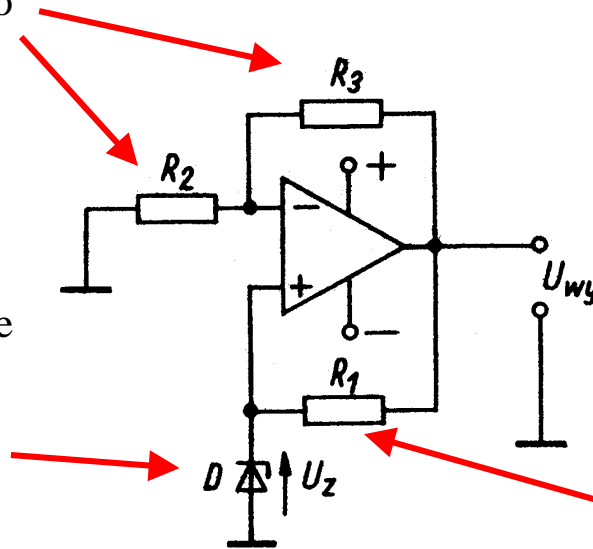


Dwa stopnie stabilizacji  
zwiększają stabilność napięcia

# Dioda Zenera – budowa wzorca ze wzmacniaczem

Rezystory ujemnego sprzężenia zwrotnego

Dodatnie sprzężenie zwrotne początkowo jest duże (duża wartość początkowa  $R_d$ ), a potem maleje (małą wartość  $R_d$  w obszarze stabilizacji)



$$U_{wy} = \frac{R_2 + R_3}{R_2} U_z$$

Rezystor dodatniego sprzężenia zwrotnego

**Schemat wzorcowego źródła napięcia stałego ze wzmacniaczem operacyjnym i diodą Zenera**

### FEATURES

- Low drift: 1.5 ppm/°C
- Low initial error: 1 mV
- Pin programmable output
- +10 V, +5 V, ±5 V tracking, -5 V, -10 V
- Flexible output force and sense terminals
- High impedance ground sense
- SOIC\_W-16 and CERDIP-16 packages
- MIL-STD-883-compliant versions available

tzw. sztuczna  
masa (aktywna)

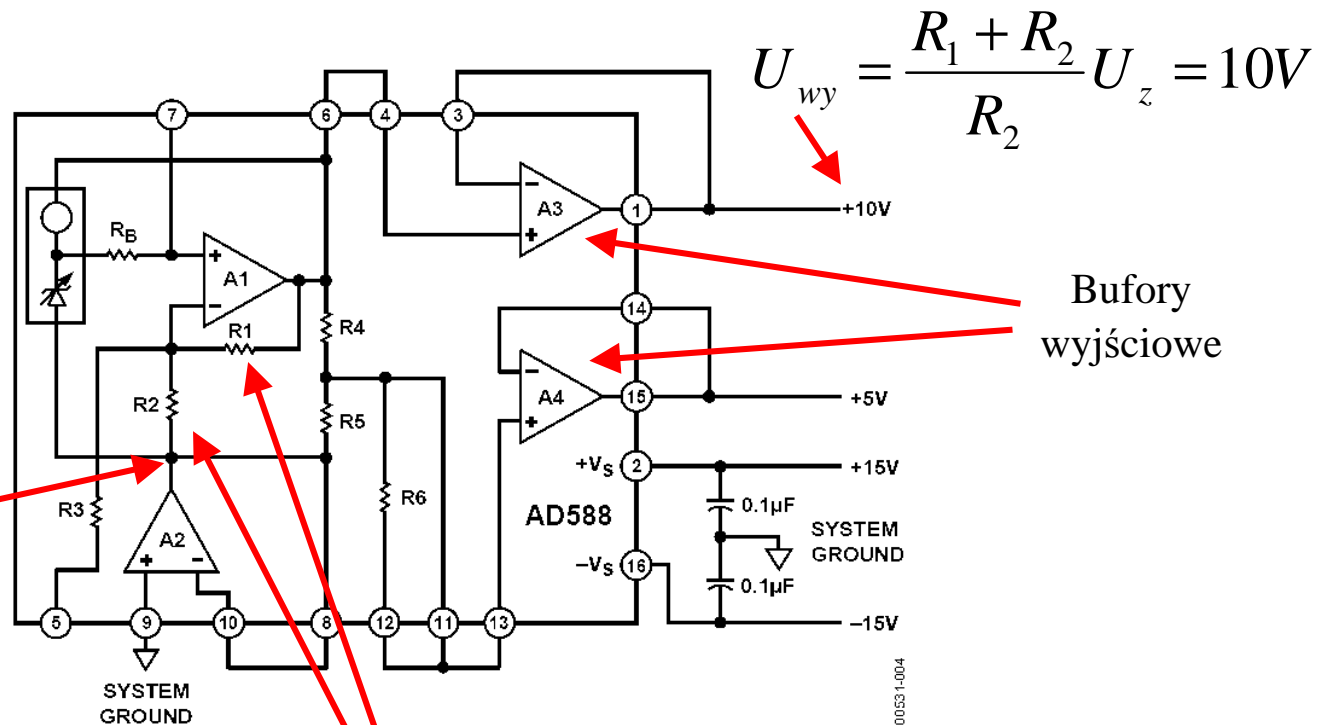


Figure 4. +10V Output

Rezystory ujemnego  
sprzężenia zwrotnego

## Wzorce prądu

Współcześnie jako wzorce prądu wykorzystywane są :

- **Wagi prądowe**, wykorzystywane obecnie jako wzorce pierwotne jednostki miary (etalony) prądu,
- **Kalibratory prądu**, wykorzystywane obecnie jako wzorce (etalony) odniesienia i wzorce niższych rzędów.

Waga prądowa realizuje wzorzec ampera na podstawie definicji ampera zawartej w rozporządzeniu „W sprawie legalnych jednostek miar”, ale nie w dosłowny sposób.



**Źródło: Sejm RP,**  
<http://isip.sejm.gov.pl/>

**1638****ROZPORZĄDZENIE RADY MINISTRÓW**

z dnia 30 listopada 2006 r.

w sprawie legalnych jednostek miar<sup>1)</sup>

**Bardzo trudne do  
bezpośredniej  
praktycznej realizacji**

Na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 11 maja 2001 r. — Prawo o miarach (Dz. U. z 2004 r. Nr 243, poz. 2441, z 2005 r. Nr 163, poz. 1362 i Nr 180, poz. 1494 oraz z 2006 r. Nr 170, poz. 1217) zarządza się, co następuje:

§ 1. Rozporządzenie określa:

- 1) nazwy, definicje i oznaczenia legalnych jednostek miar, zwanych dalej „jednostkami miar”;
- 2) legalne jednostki miar nienależące do Międzynarodowego Układu Jednostek Miar (SI), które mogą być stosowane na terytorium Rzeczypospolitej Polskiej, zwane dalej „jednostkami dopuszczonymi”;
- 3) przedrostki i ich oznaczenia przeznaczone do tworzenia dziesiętnych podwielokrotności i wielokrotności legalnych jednostek miar;
- 4) zasady pisowni oznaczeń legalnych jednostek miar.

§ 2. Jednostki miar będące jednostkami podstawowymi Międzynarodowego Układu Jednostek Miar (SI), zwane dalej „jednostkami podstawowymi SI”, mają następujące nazwy i oznaczenia:

- 6) mol określający jednostkę liczności materii o oznaczeniu „mol”;
- 7) kandela określająca jednostkę światłości o oznaczeniu „cd”.

§ 3. Jednostki podstawowe SI oznaczają:

- 1) metr — długość drogi przebytej w próżni przez światło w czasie  $1/299\,792\,458$  sekundy;
- 2) kilogram — jednostkę masy, która jest równa masie międzynarodowego prototypu kilograma przechowywanego w Międzynarodowym Biurze Miar w Sèvres;
- 3) sekunda — czas równy  $9\,192\,631\,770$  okresom promieniowania odpowiadającego przejściu między dwoma nadsubtelnymi poziomami stanu podstawowego atomu cezu 133;
- 4) amper — prąd elektryczny niezmienny się, który, płynąc w dwóch równoległych prostoliniowych, nieskończenie długich przewodach o przekroju kołowym znikomo małym, umieszczonych w próżni w odległości 1 metra od siebie, wywołałby między tymi przewodami siłę  $2 \cdot 10^{-7}$  niutona na każdy metr długości;

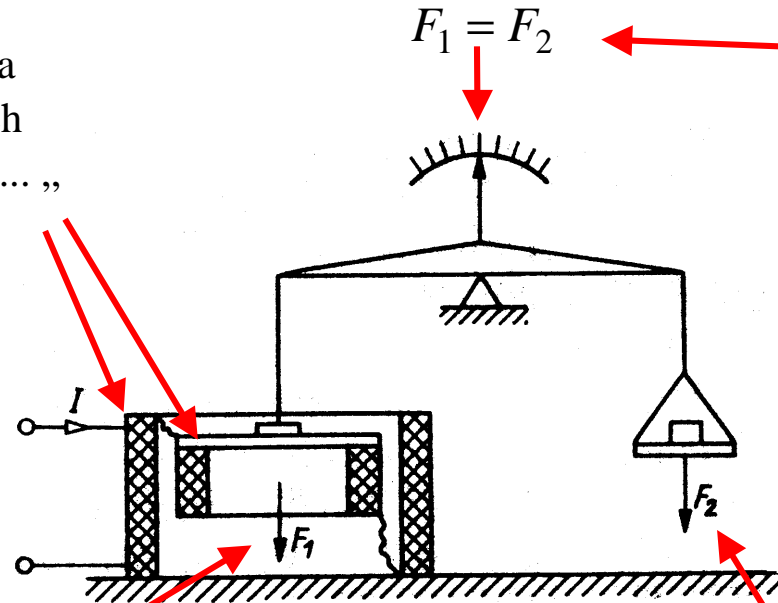
# Wzorce prądu – waga prądowa Rayleigha

Praktyczna realizacja „dwóch równoległych nieskończenie długich ... „

$k$  – stała wynikająca z konstrukcji cewek

$$k = \frac{F_1}{I^2}$$

$$F_1 = k \cdot I^2$$



Schemat wagi prądowej

Stan równowagi wagi oznacza równość sił  $F_1 = F_2$

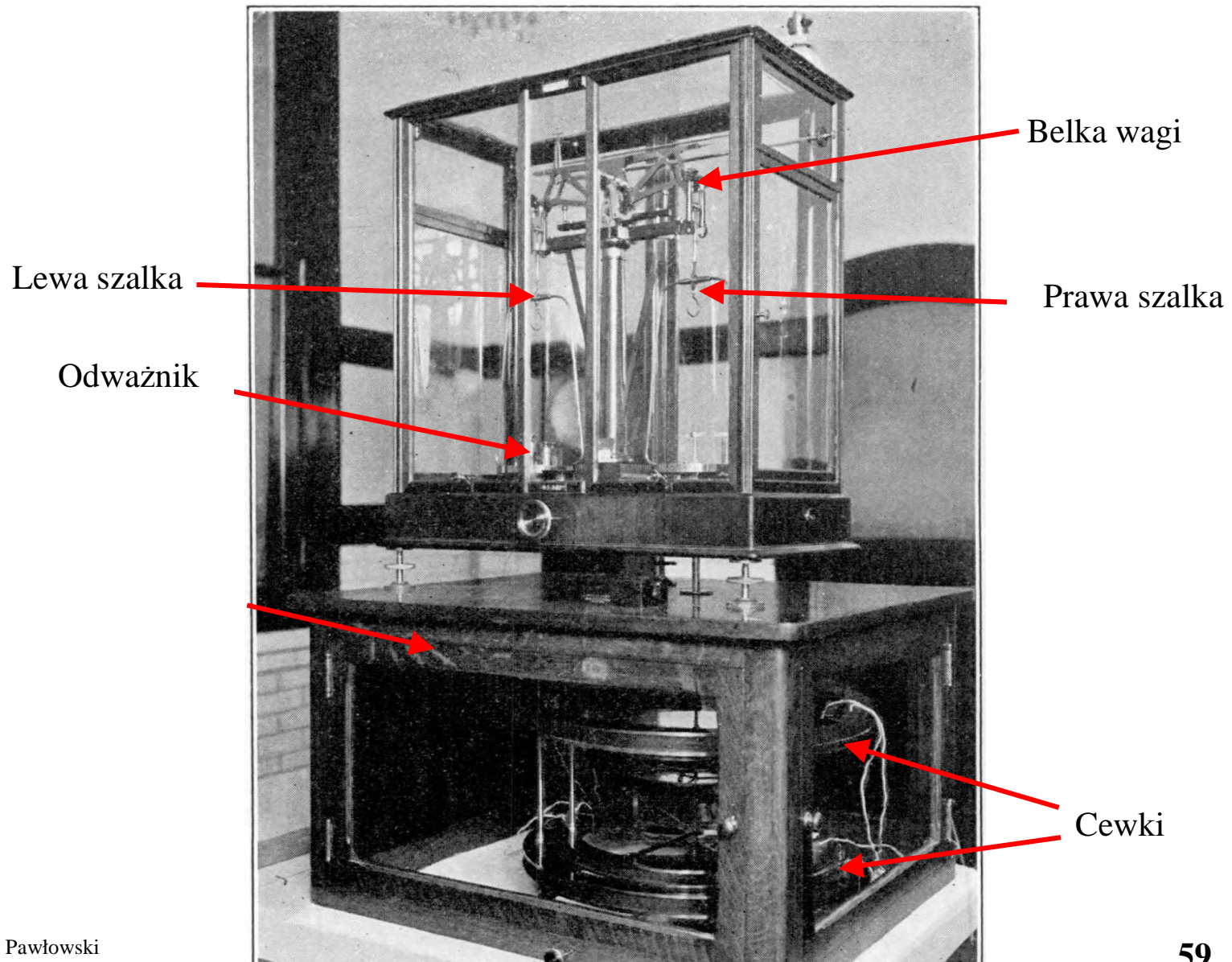
$$F_2 = m \cdot g$$

$m$  – masa odważników  
 $g$  – przyspieszenie ziemskie

Niepewność odtworzenia jednostki prądu na poziomie 6 ppm

$$I = \sqrt{\frac{mg}{k}}$$

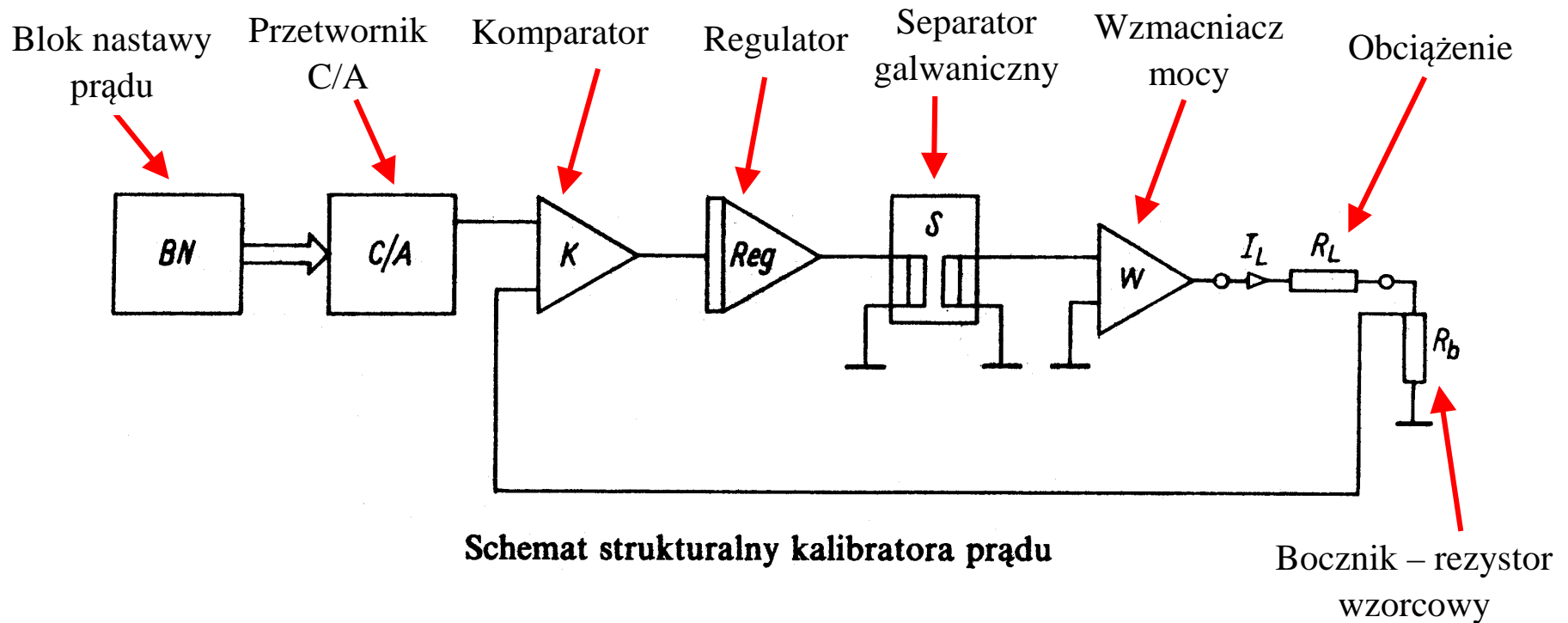
## Waga prądowa NIST – konstrukcja z 1927 roku



## Wzorce prądu – wnioski

1. Niepewność odtworzenia jednostki prądu za pomocą wagi prądowej Rayleigha na poziomie 6 ppm należy uznać za **niewielką**.
2. Waga prądowa jest dość złożoną i zawodną konstrukcją elektromechaniczną. Z tych względów jest **rzadko stosowana**.
3. W praktyce jednostkę prądu odtwarza się **metodą pośrednią** z jednostki napięcia (złącze Josephsona, niepewność 0,002 ppm) i jednostki rezystancji (rezystory wzorcowe 1 om, niepewność 1 ppm).
4. W zastosowaniach nie wymagających tak wysokich dokładności wykorzystuje się **kalibratory prądu**.

# Wzorce prądu – kalibrator prądu



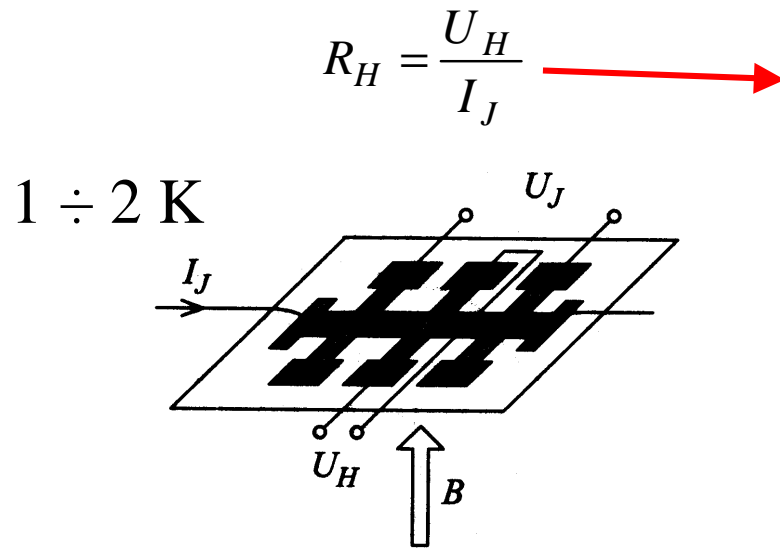
Niepewność odtworzenia  
nastawionej wartości prądu jest na  
poziomie rzędu  $10 \div 50$  ppm

## Wzorce rezystancji

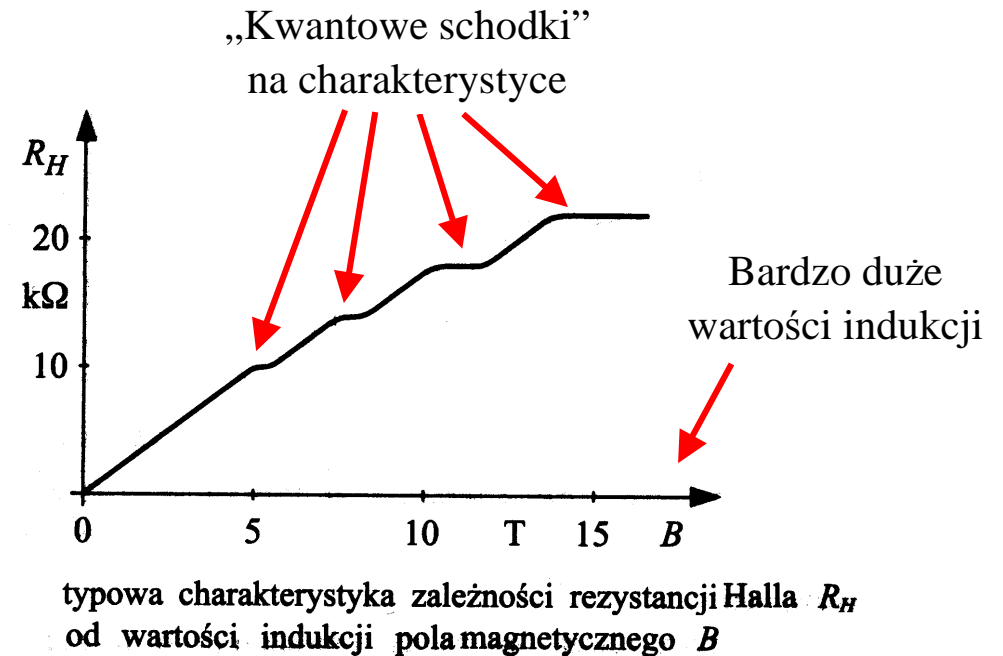
Współcześnie jako wzorce rezystancji wykorzystywane są :

- **kwatowy efekt Halla**, wykorzystywane obecnie jako wzorce pierwotne jednostki miary (etalony) rezystancji,
- **Rezystory wzorcowe**, wykorzystywane obecnie jako wzorce (etalony) odniesienia i wzorce niższych rzędów, do niedawna wykorzystywane jako etalony pierwotne,

## Wzorce rezystancji - kwantowy efekt Halla (Nobel 1985)



Konstrukcja hallotronu kwantowego



Niepewność odtworzenia wartości rezystancji jest na poziomie rzędu 0,01 ppm

$$R_H(n) = \frac{h}{2e^2 n} = \frac{K_K}{n}$$

Stała Klitzinga  $K_K = \frac{h}{2e^2} = 25812,807 \Omega$

## Wzorce rezystancji – oporniki wzorcowe

Wzorcami rezystancji są bardzo starannie wykonane i dokładnie wzorcowane oporniki z drutów i taśm rezystancyjnych. Materiał oporowy z którego wykonuje się wzorce powinien się charakteryzować poniższymi właściwościami:

- duża rezystywność;
- mały współczynnik temperaturowy,
- mała siła termoelektryczna w styku z miedzią,
- stałość oporu w czasie,
- duża wytrzymałość mechaniczna i cieplna.



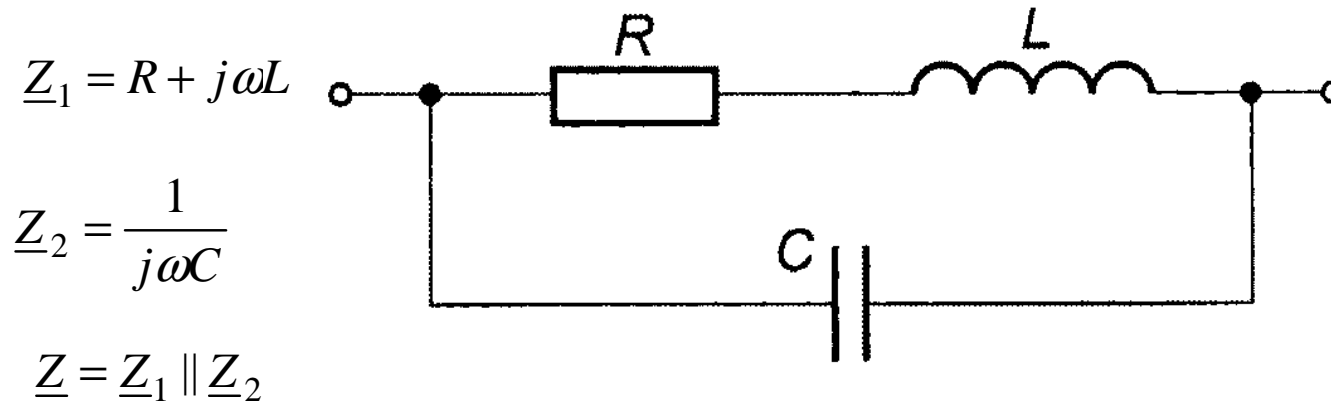
## Wzorce rezystancji – drut oporowy

Materiałami spełniającymi te wymagania są stopy **miedzi, manganu i niklu**, znane pod nazwami handlowymi *manganin* i *nikrothal*.

**Ich parametry elektryczne są następujące:**

|  | <i>manganin</i>                        | <i>nikrothal</i>                        |
|--|--|---|
| • współczynnik temperaturowy rezystancji | $\leq 2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  | $\leq 1 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$   |
| • rezystywność                           | ok. $43 \cdot 10^{-8} \Omega \text{m}$ | ok. $133 \cdot 10^{-8} \Omega \text{m}$ |
| • napięcie termoelektryczne w/m miedzi   | ok. $1 \mu\text{V/K}$                  | ok. $2 \mu\text{V/K}$                   |

## Wzorce rezystancji - schemat zastępczy



Stała czasowa  $\tau$   
rezystora istotna dla  
napięć zmiennych

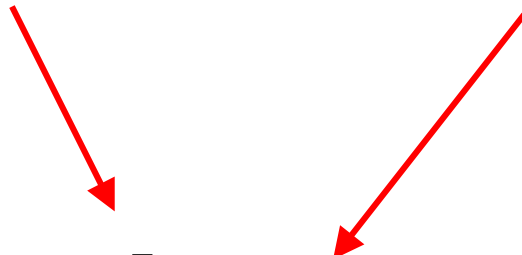
$$\underline{Z} = \frac{(R + j\omega L) \frac{1}{j\omega C}}{R + j\omega \cdot L + \frac{1}{j\omega \cdot C}} \approx R \left[ 1 + j\omega \left( \frac{L}{R} - RC \right) \right]$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R} = \frac{\omega(L - R^2 C)}{R}$$

## Wzorce rezystancji – stała czasowa

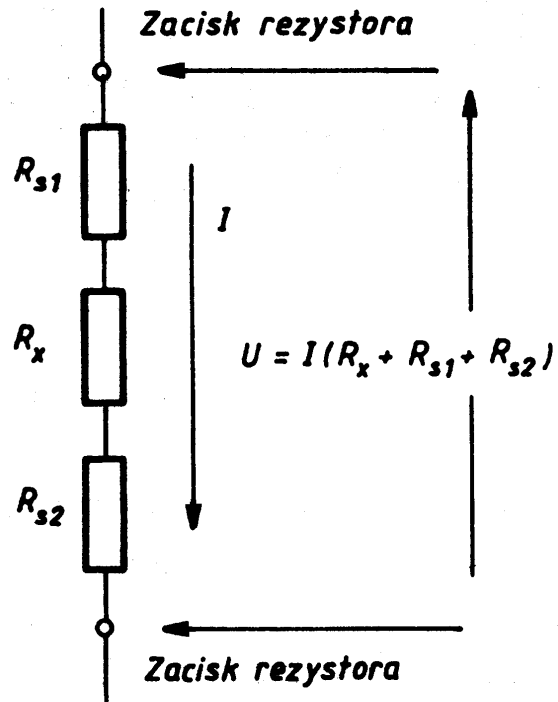
Stała czasowa  $\tau$  rezystora wprowadza przesunięcie fazowe dla przebiegów przemiennych oraz zniekształca sygnały impulsowe, dlatego powinna być jak najmniejsza.

Poprzez odpowiednią konstrukcję należy zapewnić **małą indukcyjność  $L$**  oraz **małą pojemność  $C$**

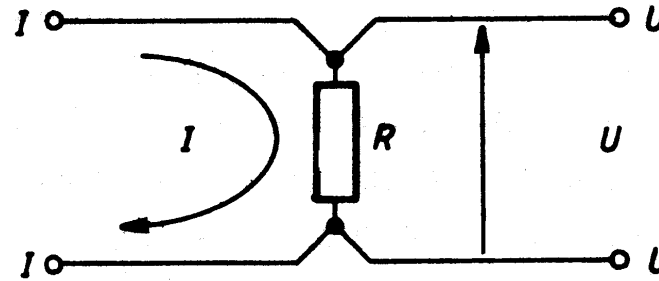

$$\tau = \frac{L}{R} - RC$$



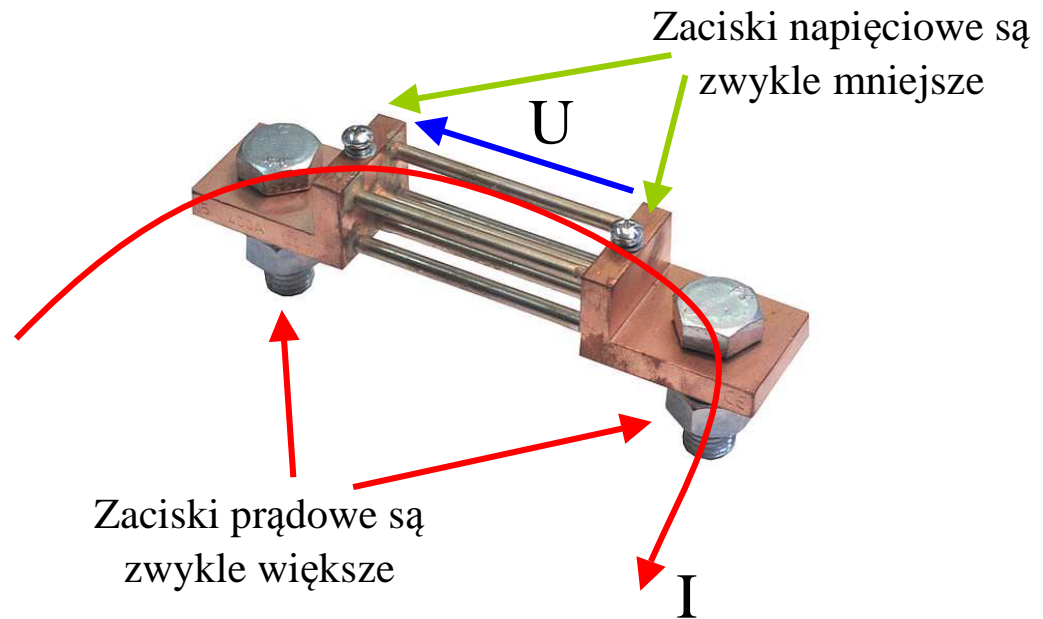
# Wzorce rezystancji – 2 i 4 zaciskowe



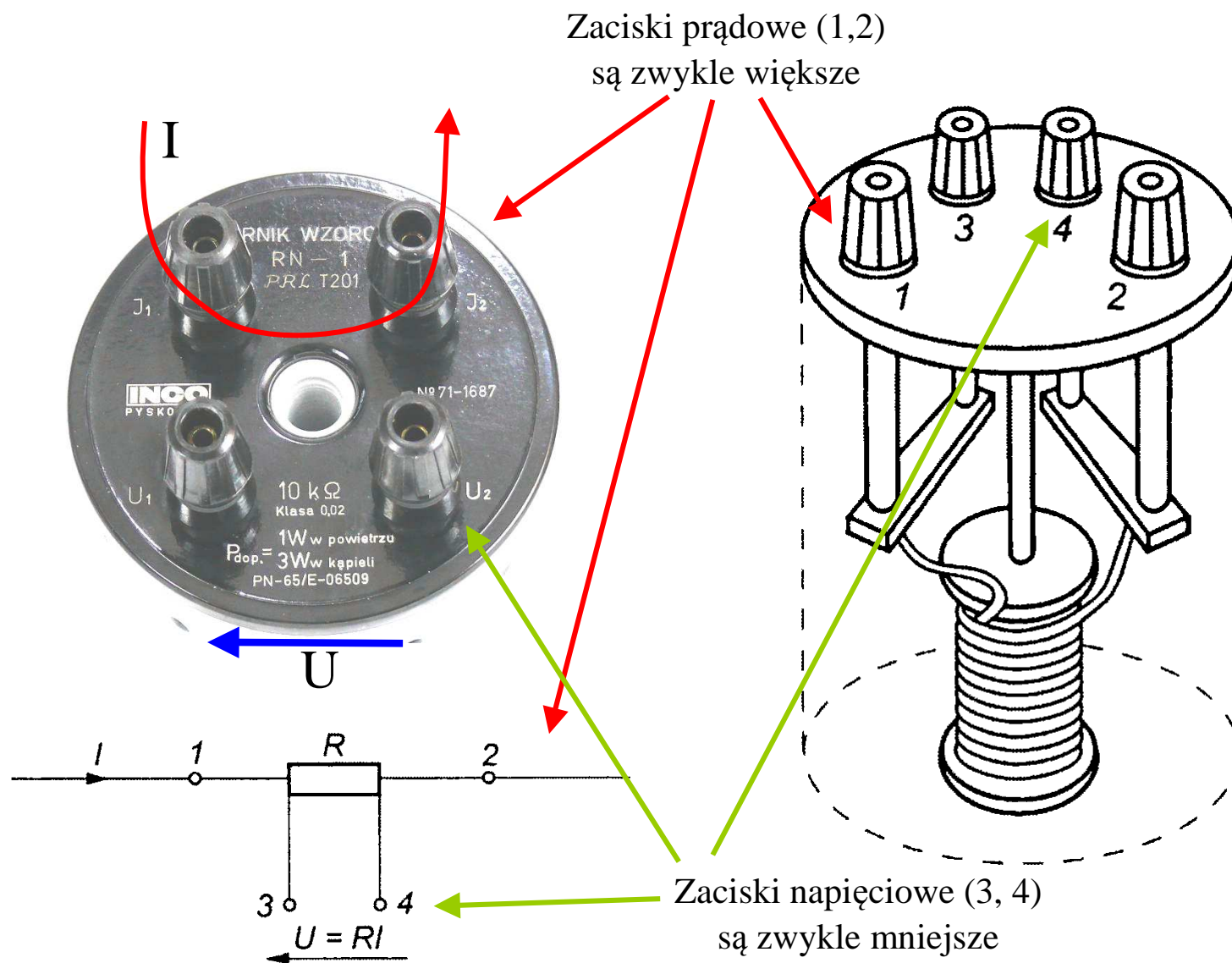
Układ do pomiaru rezystancji rezystora dwuzaciskowego



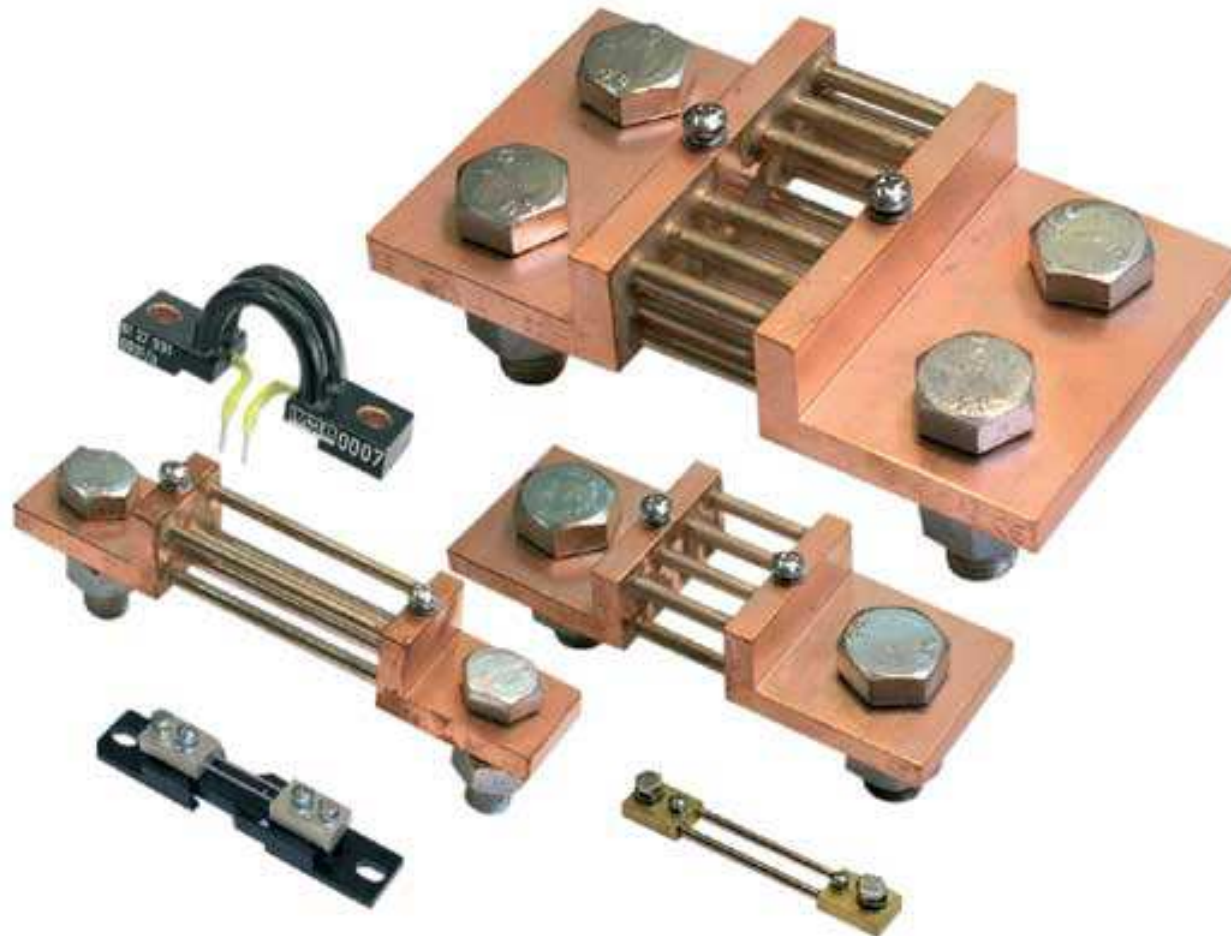
Schemat rezystora czterozaciskowego



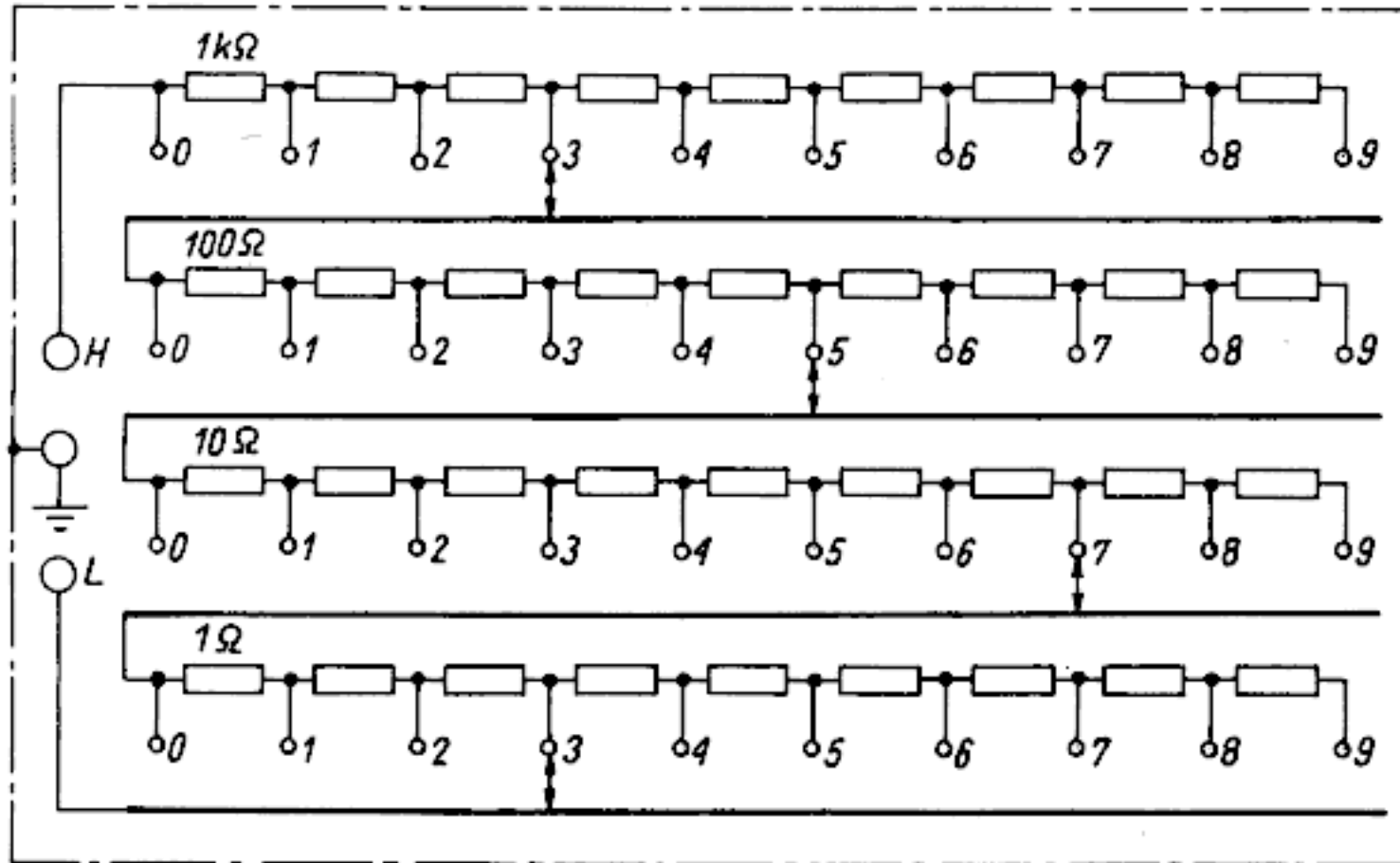
# Wzorzec rezystancji laboratoryjny 4 zaciskowy



# Wzorce rezystancji przemysłowe 4 zaciskowe (boczniki)



## Wzorce rezystancji nastawne – rezystory dekadowe



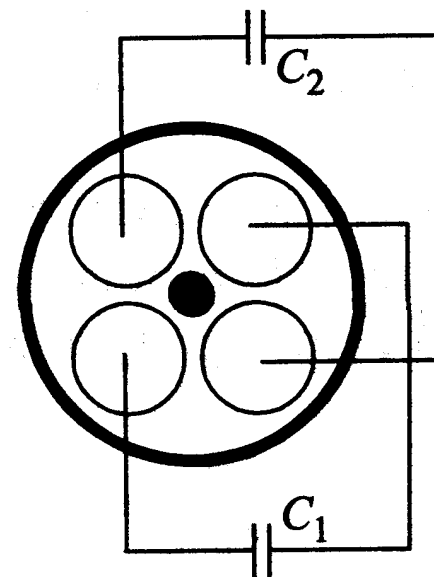
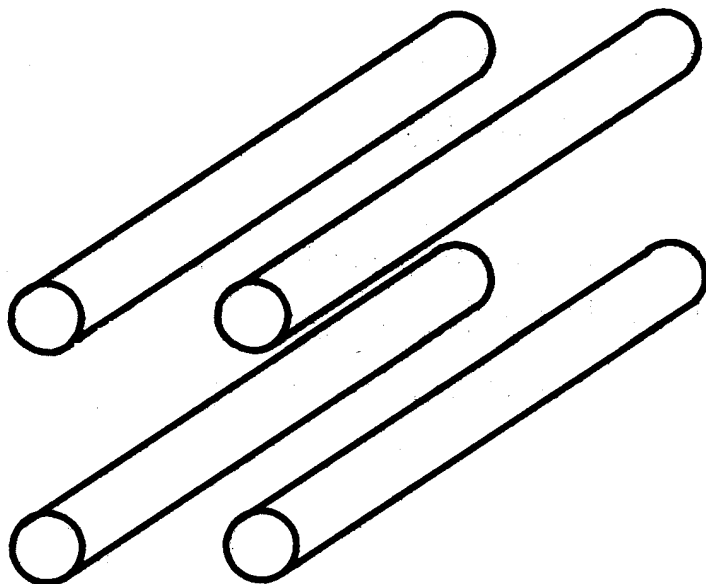


## Wzorce pojemności

Współcześnie jako wzorce pojemności wykorzystywane są :

- **kondensatory liczalne**, konstrukcji Thompsona-Lamparda wykorzystywane obecnie jako wzorce pierwotne jednostki miary (etalony) pojemności,
- **kondensatory płaskie**, z dielektrykiem powietrznym lub stałym (kwarc, tworzywa sztuczne) wykorzystywane obecnie jako wzorce niższych rzędów

## Wzorce pojemności – liczalny wzorzec Thompsona-Lamparda



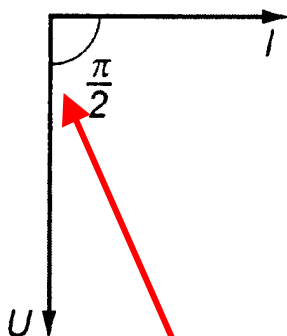
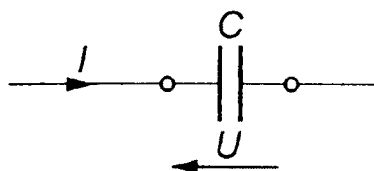
Wzorcowy liczalny kondensator powietrzny Thompsona-Lamparda

$$C = \frac{\ln 2}{4\pi^2} \frac{l}{c^2} 10^7$$

$c$  – prędkość światła,  
 $l$  – długość prętów

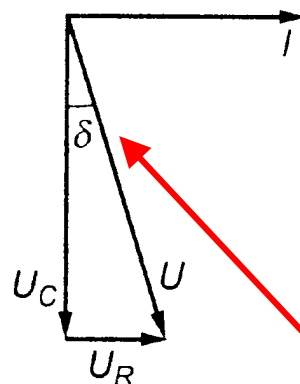
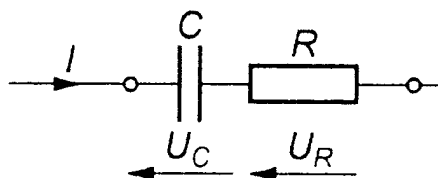
## Wzorce pojemności – schemat zastępczy

a)



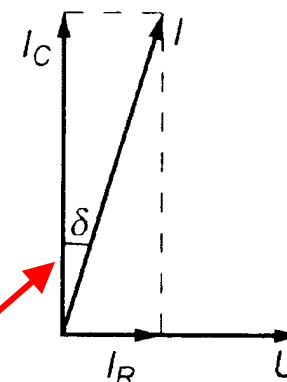
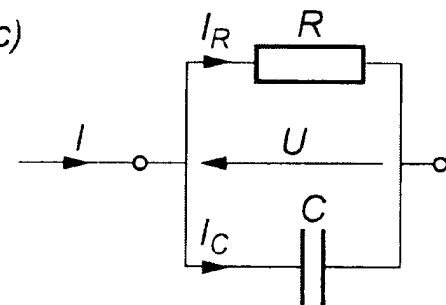
W idealnym kondensatorze kąt  $\delta$  jest równy zero

b)

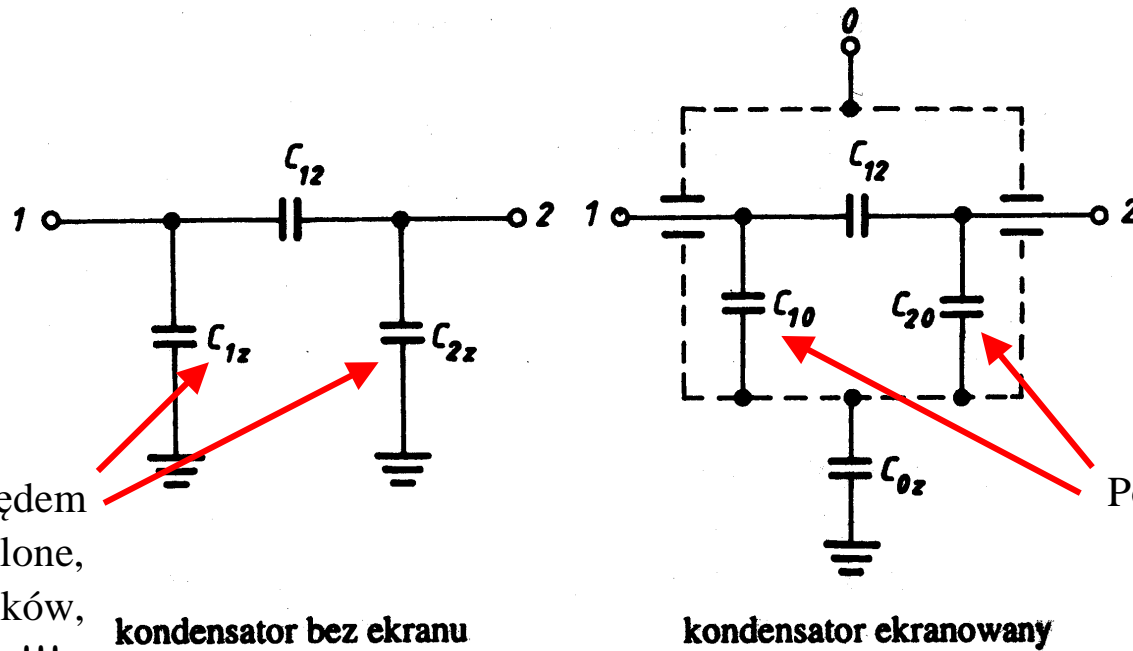


Tangens kąta stratności  $\delta$  jest miarą jakości rzeczywistego kondensatora

c)



## Wzorce pojemności - ekranowanie



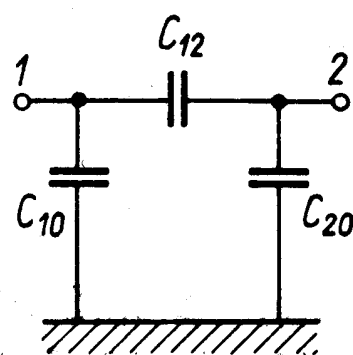
Pojemności względem ziemi są nieokreślone, zależne od warunków, są więc zmienne !!!

**kondensator bez ekranu**

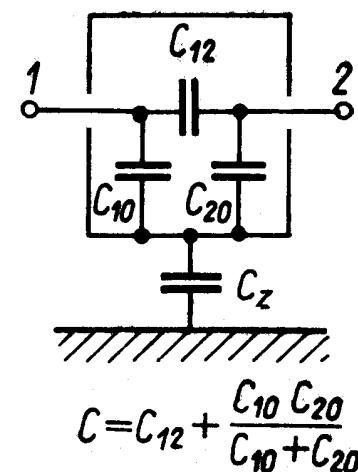
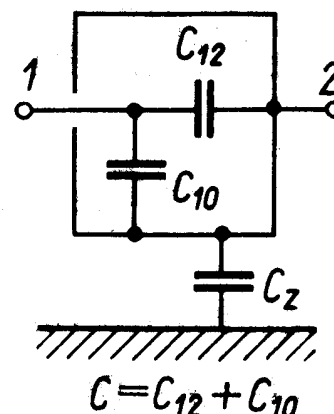
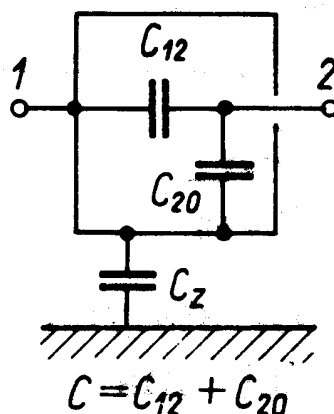
Pojemności względem ekranu są znane i stabilne w czasie

**kondensator ekranowany**

## Wzorce pojemności – łączenie ekranu



kondensator  
niezaekranowany



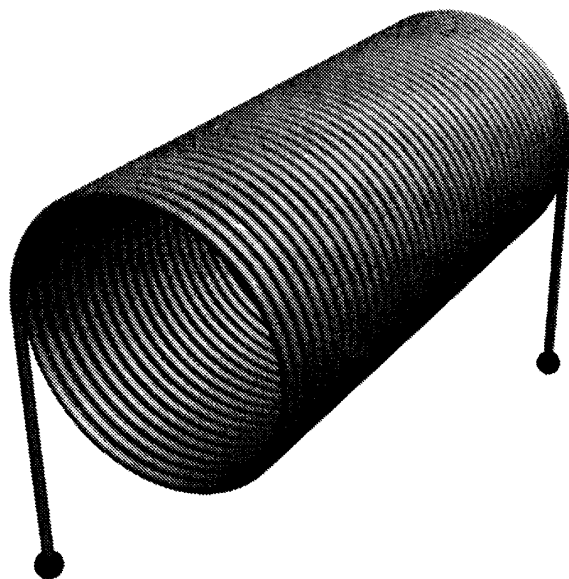
kondensatory ekranowane o różnych  
sposobach połączenia ekranów

## Wzorce indukcyjności

Współcześnie jako wzorce indukcyjność wykorzystywane są :

- **cewki indukcyjności własnej,**
- **cewki indukcyjności wzajemnej.**

## Wzorce indukcyjności – wzorzec liczalny



$$L = \frac{4\pi^2 n^2 r^2}{l} 10^{-7}$$

gdzie:

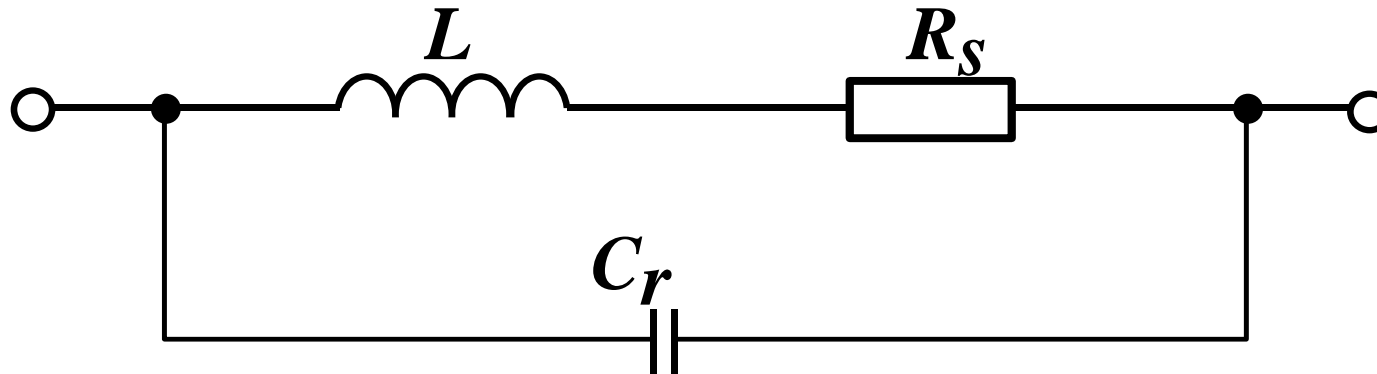
$n$  – liczba zwojów,

$r$  – promień cylindra,

$l$  – długość cylindra ( $l \gg r$ ).

Powietrzna cewka cylindryczna jako liczalny wzorzec indukcyjności

## Wzorce indukcyjności – schemat zastępczy



### Schemat zastępczy wzorca indukcyjności

$L$  – indukcyjność dławika dla małych częstotliwości,

$R_s$  – rezystancja szeregową,  $C_r$  – pojemność równoległa,

**Wzorce indukcyjności własnej** budowane są od wartości

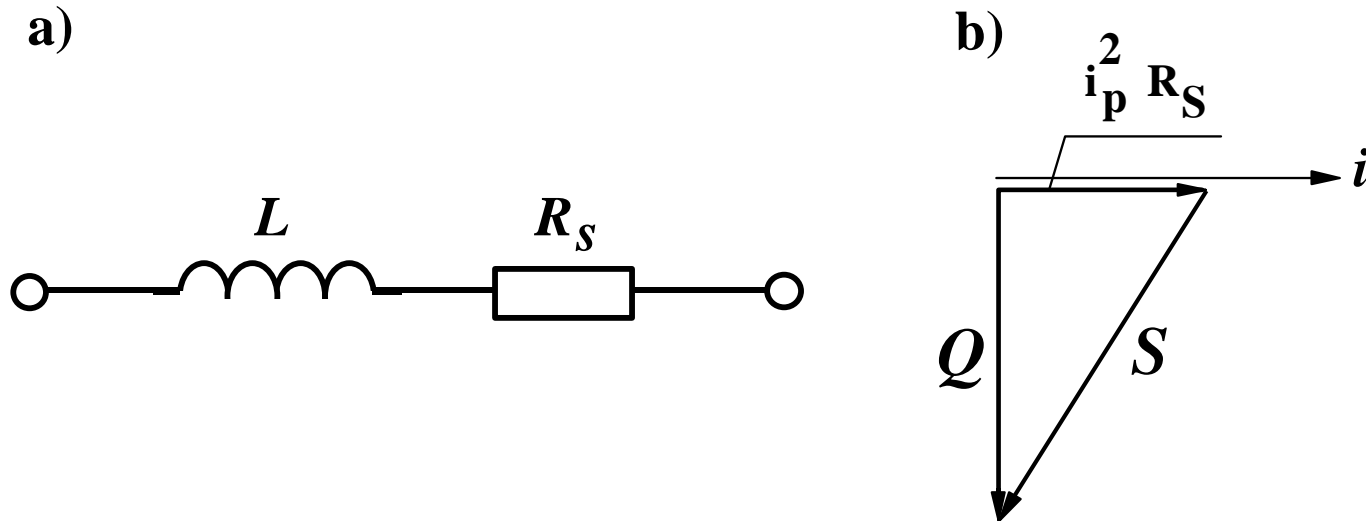
**$10 \mu\text{H}$  do  $10 \text{H}$ .**

**Błąd wzorca  $\sim 5 \text{ ppm}$  ( $5 \cdot 10^{-4} \%$ ).**

**Wzorce użytkowe - błąd  $\sim 0,02 \%$ .**



## Wzorce indukcyjności – dobroć

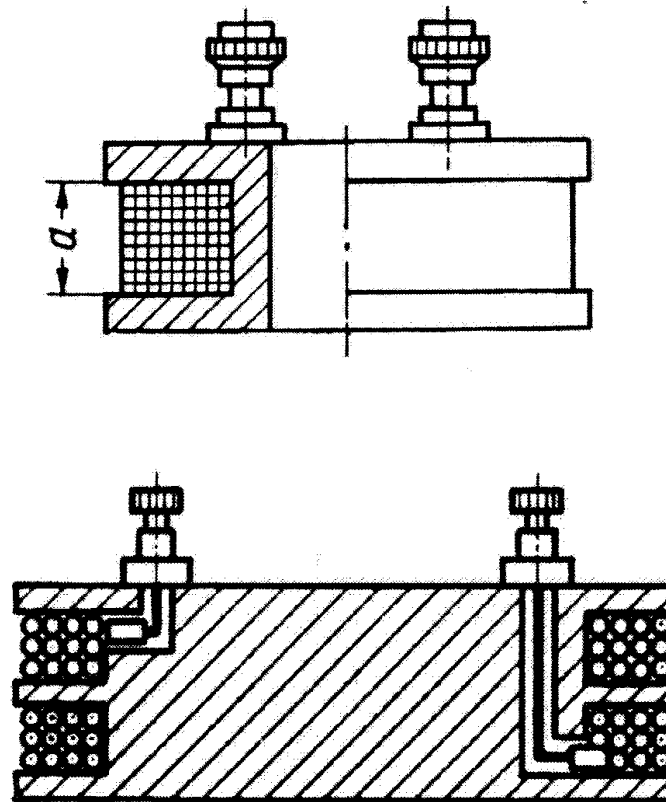


**W praktyce schemat zastępczy cewki upraszcza się do schematu szeregowego**

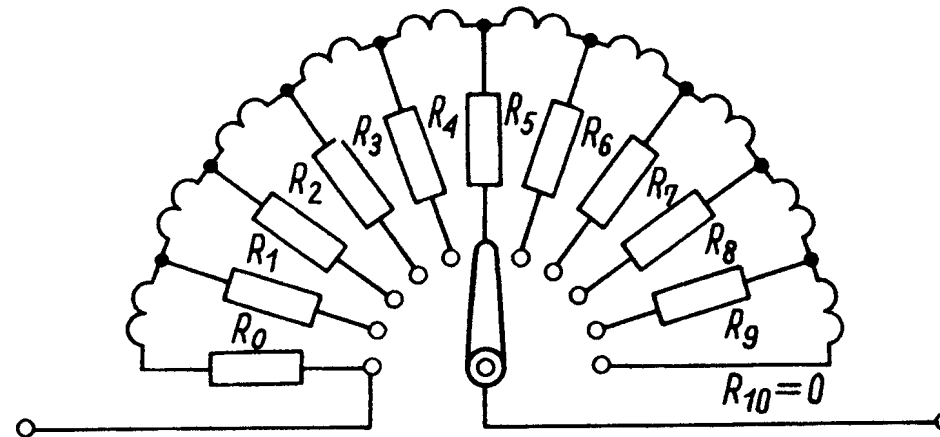
**Dobroć cewki**

$$Q = \frac{|X_L|}{R} = \frac{\omega L}{R} = \frac{2\pi f L}{R}$$

# Wzorce indukcyjności własnej i wzajemnej - budowa



## Wzorce indukcyjności własnej dekadowe



Układ połączeń dekady indukcyjności

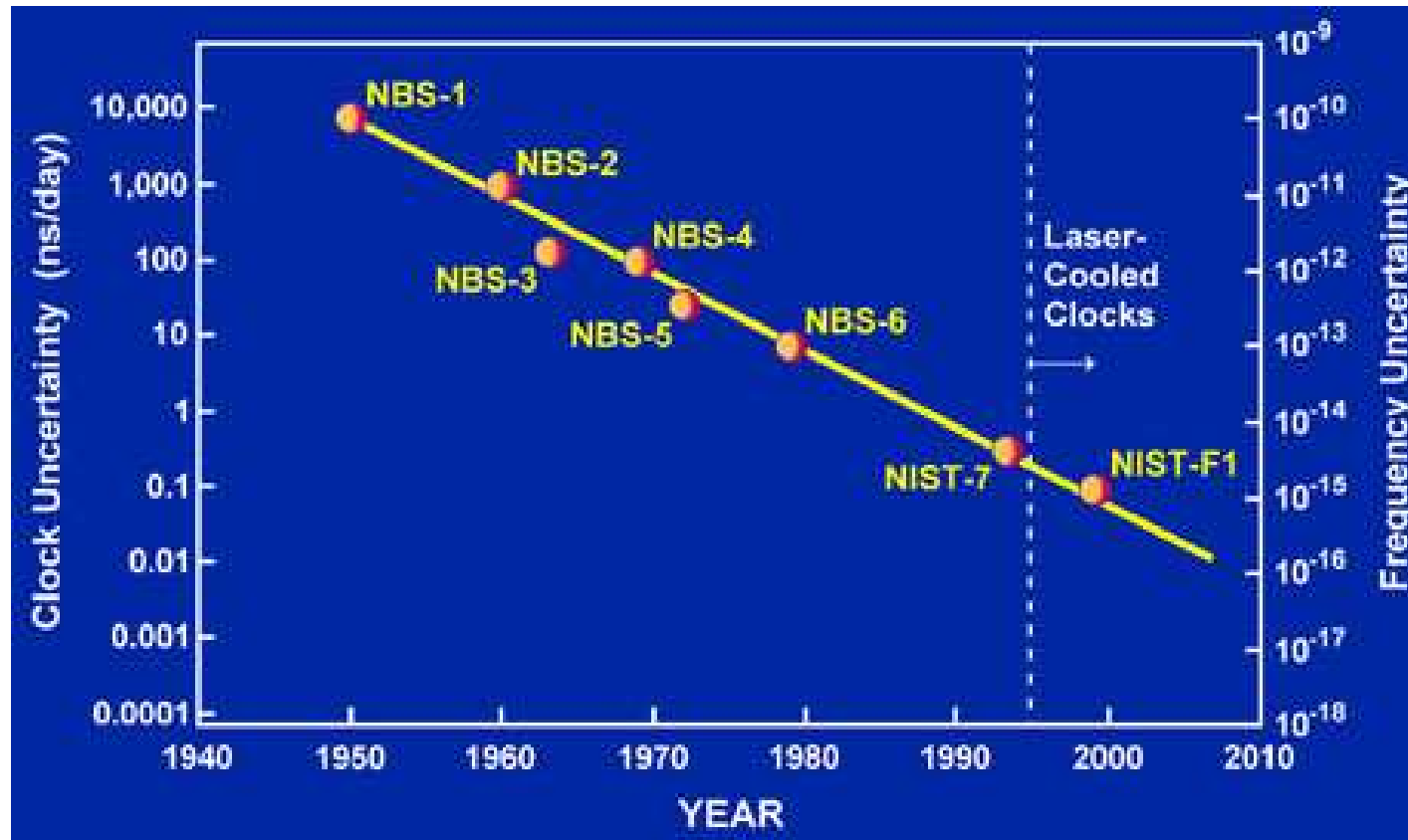
## Wzorce częstotliwości

Współcześnie jako wzorce częstotliwości wykorzystywane są :

- **Fontanna cezowa**, wykorzystywana obecnie jako wzorce pierwotne jednostki miary (etalony) czasu i częstotliwości,
- **Cezowe zegary atomowe**, wykorzystywane obecnie jako wzorce (etalony) odniesienia i wzorce niższych rzędów, do niedawna wykorzystywane jako etalony pierwotne,
- **Generatory kwarcowe**, wykorzystywane głównie jako wzorce robocze,
- **Radiowe sygnały częstotliwości wzorcowych, WRC** (KCzW) 225kHz (1program PR), DCF 77,5kHz, sygnał 1PPS systemu GPS, (pulse per second) wykorzystywane do synchronizacji generatorów kwarcowych wzorców roboczych.

# Wzorce częstotliwości – uzyskiwane dokładności

NIST - National Institute of Standards and Technology



Źródło: NIST Time and Frequency Division, <http://www.nist.gov/pml/div688/>

**NIST jest amerykańską agencją federalną spełniająca funkcję analogiczną do polskiego GUM (Głównego Urzędu Miar).**

## Wzorce częstotliwości – pogładowe przedstawienie dokładności

| Przedział czasu    | Liczba sekund                | Błąd 1 sekundy w danym przedziale czasu |                    |                    | Uwagi  |
|--------------------|------------------------------|---|--------------------|--------------------|--|
|                    |                              | %                                       | ppm                | -                  |  |
| minuta             | 60                           | 1,666666667                             | 1666,66667         | 0,016666667        | ← miernik do pomiarów technicznych klasy 2                           |
| <b>34 minuty</b>   | <b>2 040</b>                 | <b>0,049019608</b>                      | <b>490,1960784</b> | <b>0,000490196</b> | ← najdokładniejsza znormalizowana klasa przyrządów pomiarowych: 0,05 |
| godzina            | 3 600                        | 0,027777778                             | 277,7777778        | 0,000277778        |  |
| <b>2,5 godziny</b> | <b>9 000</b>                 | <b>0,011111111</b>                      | <b>111,1111111</b> | <b>0,000111111</b> | ← zegarek mechaniczny: ±10 sekund/dobę                               |
| dość               | 86 400                       | 0,001157407                             | 11,57407407        | 1,15741E-05        |  |
| <b>3 dni</b>       | <b>259 200</b>               | <b>0,000385802</b>                      | <b>3,858024691</b> | <b>3,85802E-06</b> | ← zegarek elektroniczny: ±10 sekund/miesiąc                          |
| miesiąc            | 2 635 200                    | 3,79478E-05                             | 0,379477838        | 3,79478E-07        |  |
| rok                | 31 622 400                   | 3,16232E-06                             | 0,031623153        | 3,16232E-08        |  |
| <b>10 lat</b>      | <b>316 224 000</b>           | <b>3,16232E-07</b>                      | <b>0,003162315</b> | <b>3,16232E-09</b> | ← dobrej klasy laboratoryjny częstotściomierz cyfrowy (np. typu PFL) |
| 100 lat            | 3 162 240 000                | 3,16232E-08                             | 0,000316232        | 3,16232E-10        |  |
| 1000 lat           | 31 622 400 000               | 3,16232E-09                             | 3,16232E-05        | 3,16232E-11        |  |
| 10 tyś. lat        | 316 224 000 000              | 3,16232E-10                             | 3,16232E-06        | 3,16232E-12        |  |
| 100 tyś. lat       | 3 162 240 000 000            | 3,16232E-11                             | 3,16232E-07        | 3,16232E-13        |  |
| 1 mln lat          | 31 622 400 000 000           | 3,16232E-12                             | 3,16232E-08        | 3,16232E-14        |  |
| <b>3 mln lat</b>   | <b>94 867 200 000 000</b>    | <b>1,05411E-12</b>                      | <b>1,05411E-08</b> | <b>1,05411E-14</b> | ← wzorzec GUM ±1 sekunda/3 mln lat, zegarek DCF77                    |
| 10 mln lat         | 316 224 000 000 000          | 3,16232E-13                             | 3,16232E-09        | 3,16232E-15        |  |
| 100 mln lat        | 3 162 240 000 000 000        | 3,16232E-14                             | 3,16232E-10        | 3,16232E-16        |  |
| <b>138 mln lat</b> | <b>4 363 891 200 000 000</b> | <b>2,29153E-14</b>                      | <b>2,29153E-10</b> | <b>2,29153E-16</b> | ← wzorzec NPL: ±1 sekunda/138 mln lat                                |

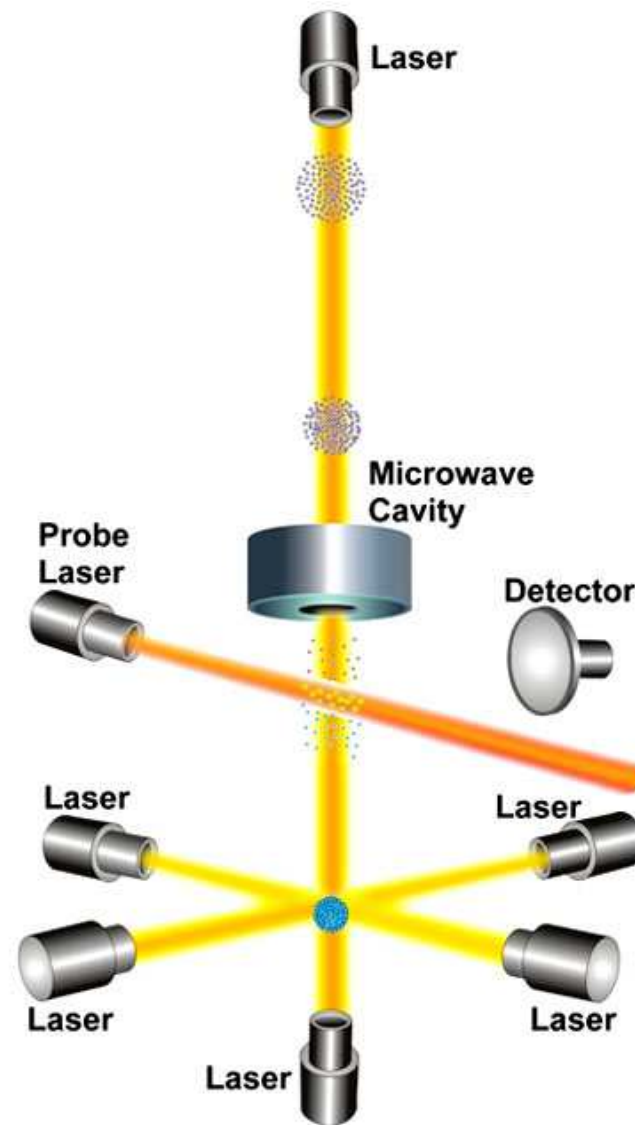
## Najdokładniejszy wzorzec częstotliwości – fontanna cezowa

Niepewność odtworzenia  
wartości czasu i  
częstotliwości w **NPL** wynosi

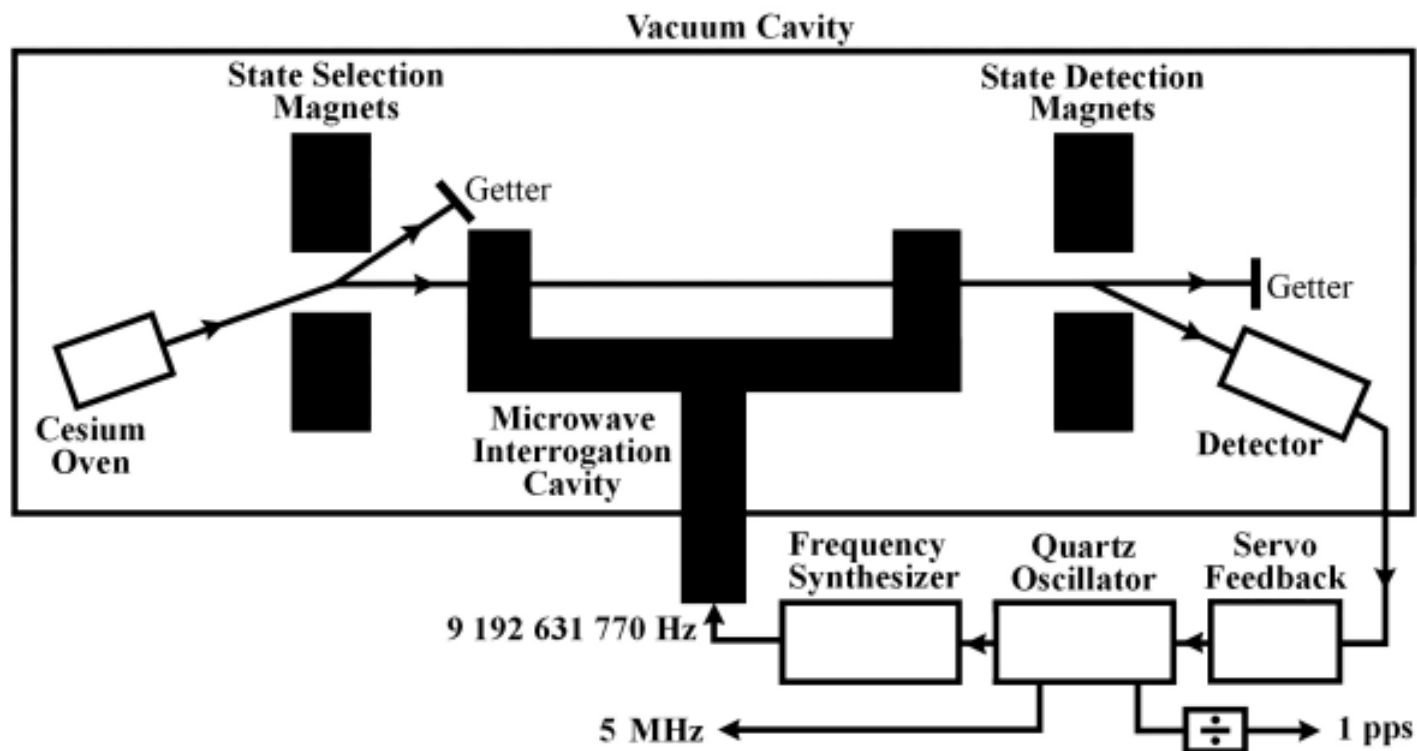
$2,3 \cdot 10^{-16}$  czyli  $2,3 \cdot 10^{-10}$  ppm

**Jest to najdokładniejszy  
obecnie wzorzec na świecie!**

**NPL** - National Physical  
Laboratory near London,  
UK



## Wzorce częstotliwości – cezowy zegar atomowy



Niepewność odtworzenia wartości czasu i częstotliwości  
w GUM wynosi  $1,3 \cdot 10^{-14}$  czyli  $1,3 \cdot 10^{-8}$  ppm



## Wzorzec częstotliwości GUM – cezowy zegar atomowy



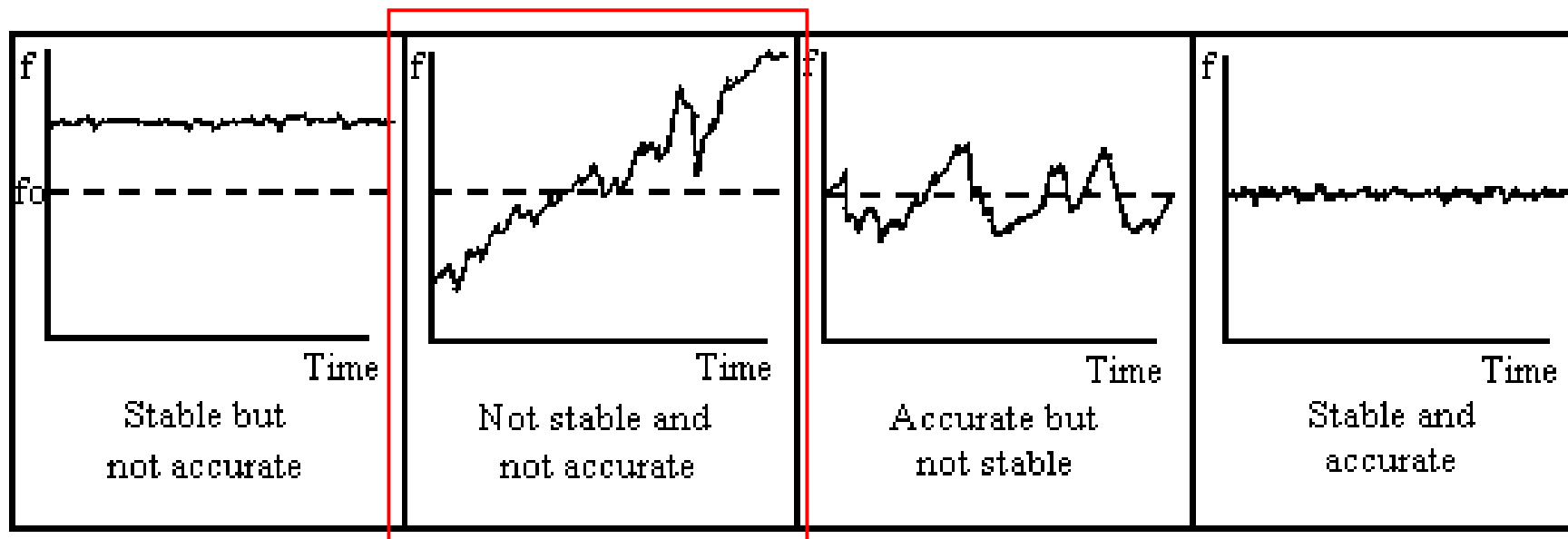
Źródło: Główny Urząd Miar, <http://www.gum.gov.pl>

# Wykaz usług pomiarowych GUM – czas i częstotliwość

| Lp. | Usługa   | Zakres pomiarowy                             | Najlepsza zdolność pomiarowa   |  |
|-----|--|--|--|--|
| 1.  | Porównywanie skal czasu metodą porównań bezpośrednich  | $(-1 \div +1)$ s                             | 2 ns   |  |
| 2.  | Porównywanie skal czasu metodą obserwacji jednoczesnych satelitów globalnych systemów nawigacyjnych  | $(-1 \div +1)$ s                             | 10 ns  |  |
| 3.  | Wzorcowanie zegarów kwarcowych cyfrowych   | $(-1 \div +1)$ s                             | 600 ns   |  |
| 4.  | Wzorcowanie zegarów kwarcowych analogowych oraz czasomierzy (w tym sekundomierze –również stopery), w których odchylenie względne częstotliwości wewnętrznego generatora określa się przy użyciu chronokomparatora | $(-19,99 \div +19,99)$ s/d                   | 0,009 s/d  |  |
| 5.  | Wzorcowanie chronometrów okrętowych mechanicznych  | $(-120 \div +19,99)$ s/d                     | 0,04 s   |  |
| 6.  | Wzorcowanie generatorów przedziałów czasu $\tau$ oraz czasomierzy i sekundomierzy sterowanych elektrycznie wszelkiego rodzaju, w tym również stanowiące integralną część innych urządzeń, np. oscyloskopów         | 8 ns $\div$ +1E+4 s                          | 0,5E-09s +1E-11x $\tau$  |  |
| 7.  | Wzorcowanie czasomierzy i sekundomierzy sterowanych ręcznie wszelkiego rodzaju, w tym również stanowiące integralną część innych urządzeń  | $(1 \div 86400)$ s                           | 0,02 s   |  |
| 8.  | Wzorcowanie czasomierzy i sekundomierzy sterowanych ręcznie wszelkiego rodzaju, w tym również stanowiące integralną część innych urządzeń  | $(1 \div 86400)$ s                           | 0,02 s   |  |
| 9.  | Wzorcowanie dawkowników czasu z sygnalizacją akustyczną ręcznego startu i stopu  | $(1 \div 100)$ min                           | 0,6 ms   |  |
| 10. | Wzorcowanie generatorów wysokostabilnych (wtórne wzorce częstotliwości) dyscyplinowanych i o biegu swobodnym   | Częstotliwości stałe<br>(0,1; 1; 5 i 10) MHz | 2,5E-12 Hz/Hz  |  |
| 11. | Wzorcowanie generatorów kwarcowych oraz bez stabilizacji kwarcowej, także stanowiących integralną część innych urządzeń, np. kalibratorów napięć zmiennych i kalibratorów oscyloskopowych                          |  | $(0,1 \div 14E+9)$ Hz  | 1,5E-5 Hz+2,2E-10xf  |
| 12. | Wzorcowanie komparatorów częstotliwości  |  | $(4E+3 \div 2E+6)$ Hz  | 0,5E-6 Hz+2,5E-12xf  |
| 13. | Wzorcowanie częstościomierzy cyfrowych wszelkiego rodzaju, w tym również stanowiące integralną część innych urządzeń, np. analizatorów widma, oscyloskopów   |  | $(0,1 \div 8E+7)$ Hz<br>$(5E+3 \div 1E+9)$ Hz<br>$(1E+4 \div 5.4E+9)$ Hz<br>$(1E+8 \div 2E+10)$ Hz | 0,5E-6Hz+1E-11xf<br>4E-4Hz+6,4E-12xf<br>2,5E-12xf<br>2,5E-12xf |
| 14. | Wzorcowanie chronokomparatorów cyfrowych i analogowych   |  | $(-120 \div +120)$ s/d   | 0,5E-6 Hz+1E-11xf  |
| 15. | Sprawdzanie liczników impulsowych (zdarzeń)  |  | 80 MHz max,<br>T $\geq$ 8 ns   | -  |
| 16. | Sprawdzanie źródła grup impulsów   |  | $(1 \div 1E+15)$ impulsów  | -  |
| 17. | Kontrola radiowej częstotliwości wzorcowej 225 kHz (WRC)   |  | 225 kHz  | 0,02E-10 Hz/Hz   |
| 18. | Prowadzenie Państwowego Wzorca Jednostek Miar Czasu i Częstotliwości   |  | $(-1 \div +1)$ s<br>(0,1; 1; 5 i 10) MHz   | 60 ns<br>5E-14 Hz/Hz   |

[http://bip.gum.gov.pl/pl/bip/px\\_m44\\_2.pdf](http://bip.gum.gov.pl/pl/bip/px_m44_2.pdf)

## Stabilność i dokładność wzorców częstotliwości

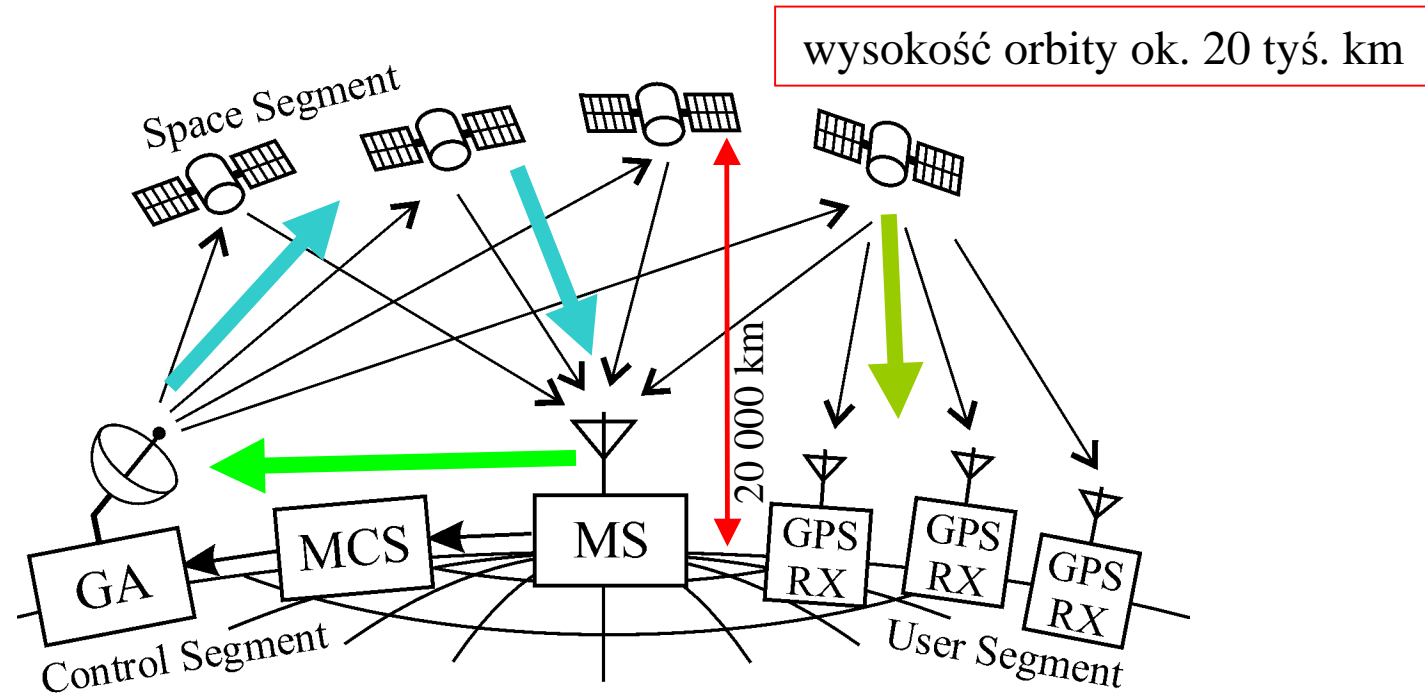


Źródło: NIST (<http://www.nist.gov>)



To jest przypadek użytkownika generatorów wzorcowych użytkowych niższego rzędu.

# Konfiguracja systemu GPS



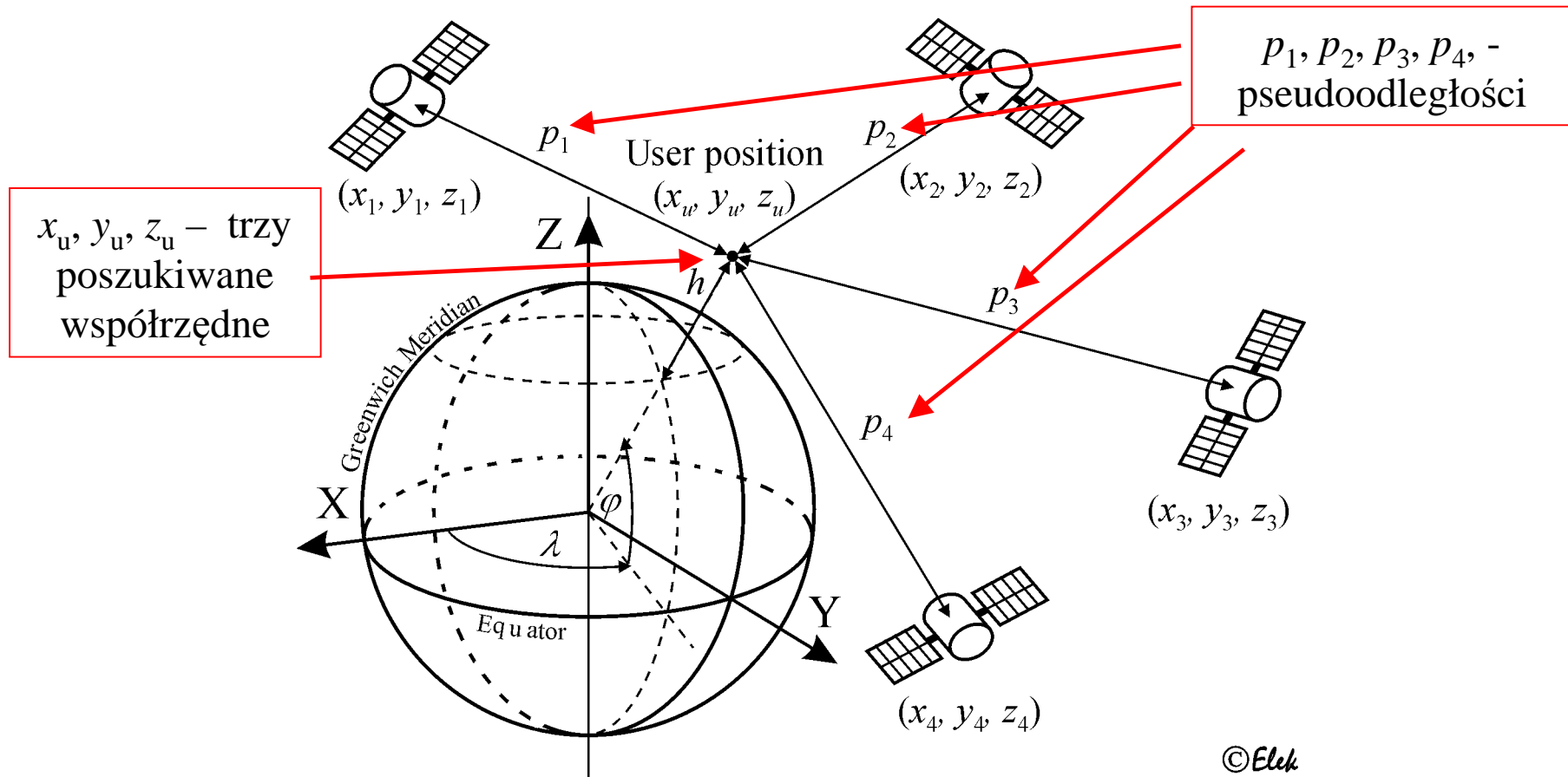
**MCS** - Main Control Station

**MS** - Monitoring Stations

**GA** - Ground Antennas

**GPS RX** - User's GPS receivers

# Wyznaczanie pozycji w systemie GPS



Czwartą niewiadomą jest czas !

## Cztery równania na pozycję w systemie GPS

Pseudoodległości  $p_1, p_2, p_3, p_4$  są obliczane na podstawie czasu i prędkości światła  $c$

$$p_1 = \sqrt{(x_1 - x_u)^2 + (y_1 - y_u)^2 + (z_1 - z_u)^2} + cb_u$$

$$p_2 = \sqrt{(x_2 - x_u)^2 + (y_2 - y_u)^2 + (z_2 - z_u)^2} + cb_u$$

$$p_3 = \sqrt{(x_3 - x_u)^2 + (y_3 - y_u)^2 + (z_3 - z_u)^2} + cb_u$$

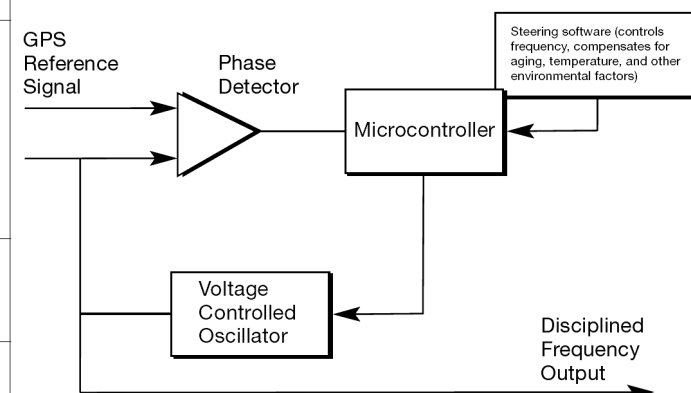
$$p_4 = \sqrt{(x_4 - x_u)^2 + (y_4 - y_u)^2 + (z_4 - z_u)^2} + cb_u$$

Odbiornik GPS oblicza poprawkę własnego zegara względem czasu GPS

**Wniosek: Odbiornik GPS jest bardzo precyzyjnie zsynchronizowany z atomowym wzorcem czasu systemu GPS**

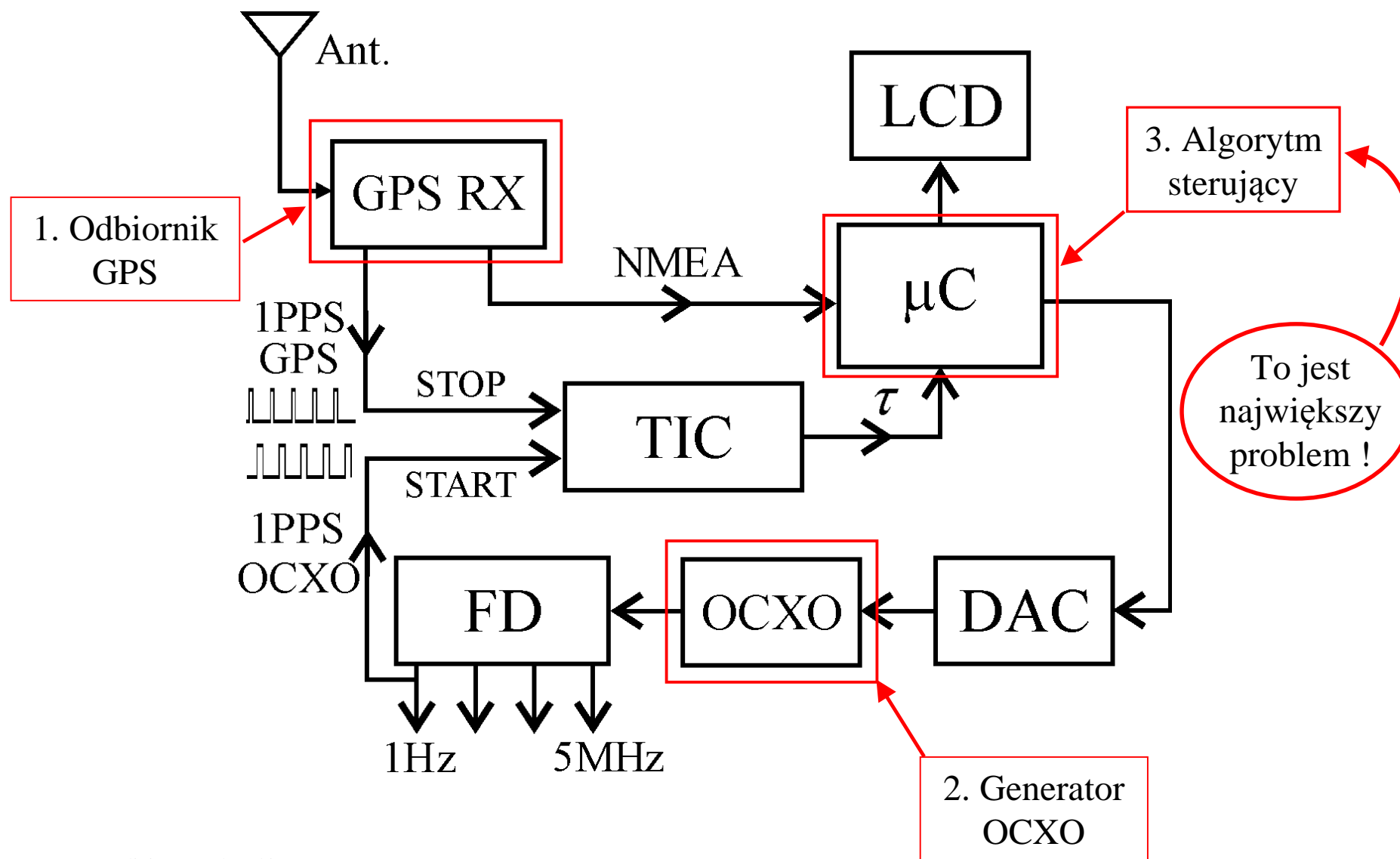
# Wzorce atomowe i system GPS - GPSDO

| Oscillator Type  | Rubidium                                     | Cesium  | <b>GPSDO</b>   |
|--|--|---|--|
| Frequency offset with respect to UTC(NIST) (1 day average)                           | $5 \times 10^{-9}$ to $5 \times 10^{-12}$    | $1 \times 10^{-12}$ to $5 \times 10^{-14}$  | $1 \times 10^{-12}$ to $5 \times 10^{-14}$                               |
| Stability at 1 second  | $5 \times 10^{-11}$ to $5 \times 10^{-12}$   | $5 \times 10^{-11}$ to $5 \times 10^{-12}$  | $1 \times 10^{-10}$ to $1 \times 10^{-12}$                               |
| Stability at 1 day   | $5 \times 10^{-12}$                          | $8 \times 10^{-14}$ to $2 \times 10^{-14}$  | $8 \times 10^{-13}$ to $5 \times 10^{-14}$                               |
| Aging/year   | $< 1 \times 10^{-10}$ to $5 \times 10^{-10}$ | None, by definition. However, the frequency of a cesium oscillator drifts by a small amount (typically by parts in $10^{17}$ over the course of a day). | None, the output is steered to compensate for aging and frequency drift. |
| Phase noise (dbc/Hz, 10 Hz from carrier)   | -90 to -130                                  | -130 to -136  | -90 to -140  |
| Life expectancy  | > 15 years                                   | 5 to 20 years; 10 years is typical  | > 15 years   |
| Produces an ontime pulse without being synchronized to another source?               | No   | No  | Yes  |
| Produce frequency accurate to within $\pm 1 \times 10^{-11}$ for 24 hours or longer? | Yes, with periodic adjustment                | Yes   | Yes  |
| Cost (USD)   | \$2,000 to \$10,000                          | \$30,000 to \$75,000  | \$3,000 to \$15,000  |



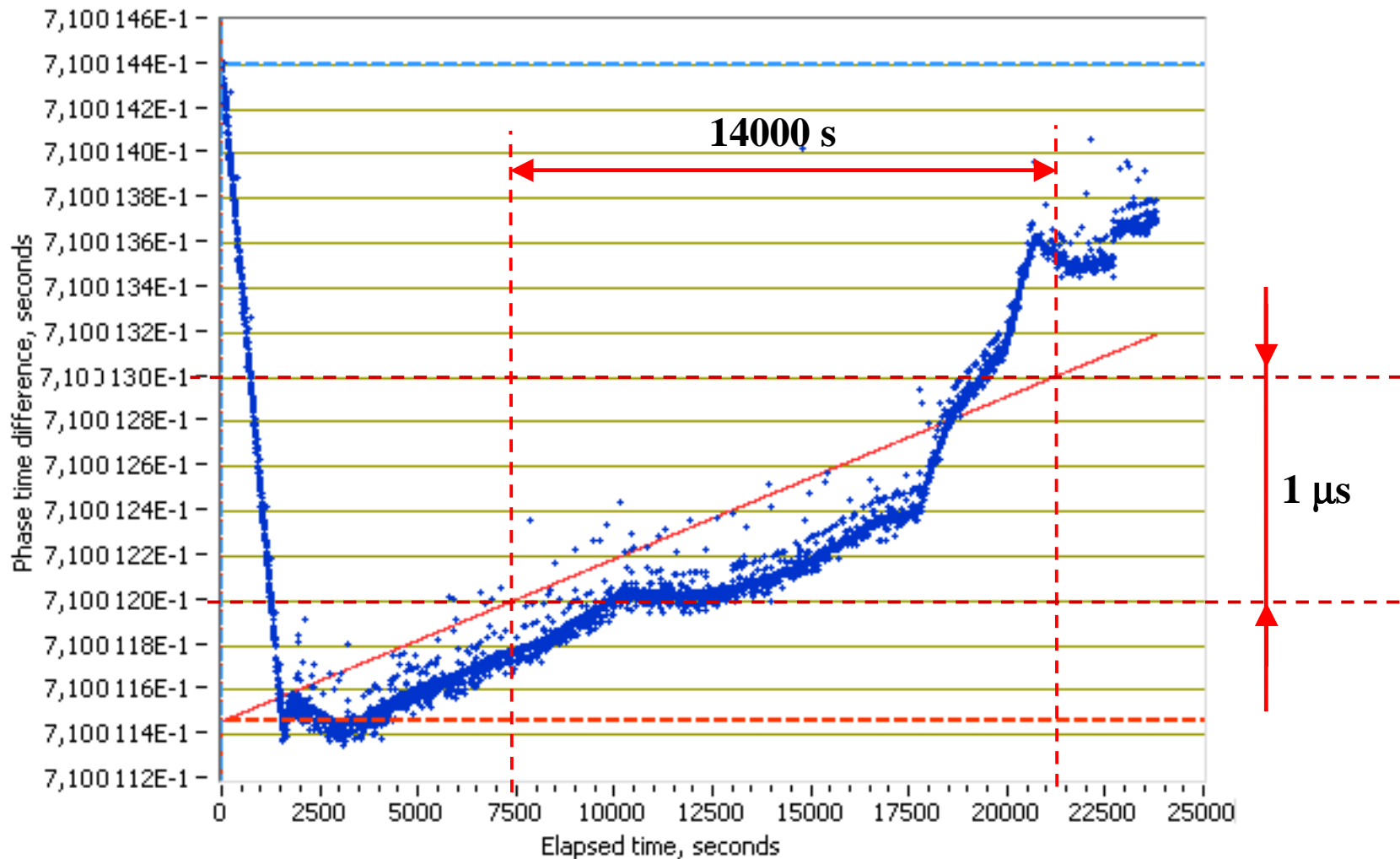
**GPS Disciplined Oscillator**

# Schemat blokowy GPSDO – trzy kluczowe elementy





## Nagrzany OCXO –synchronizacja



Przyrost czasu fazowego  $1 \mu\text{s}/14000\text{s}$

Średnie odchylenie częstotliwości  $\delta f_{\text{gen}} = 7,1 \times 10^{-11} \text{ Hz/Hz}$  (ok. 1 s / 500 lat)

# Wykorzystanie sygnałów radiowych

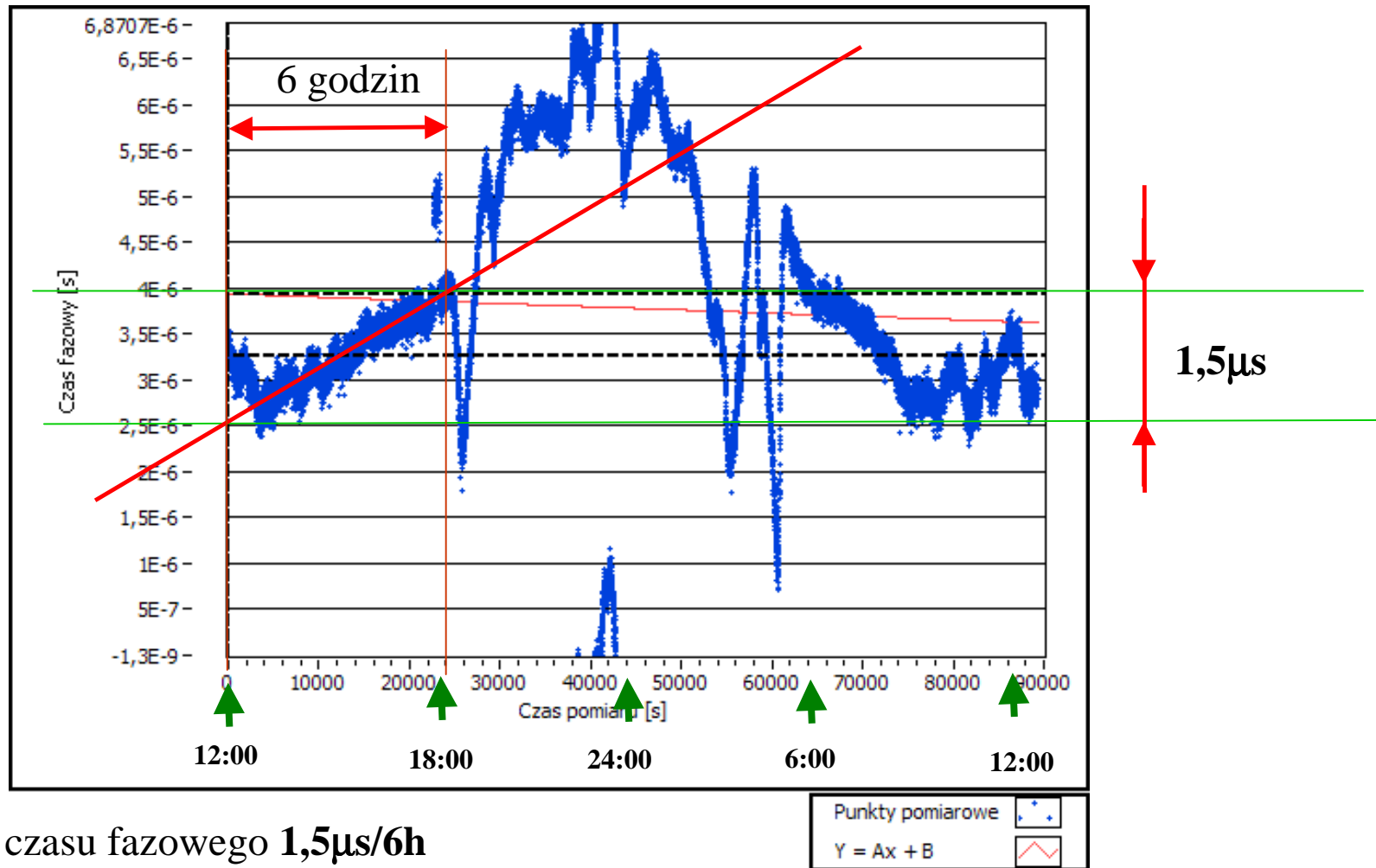
Stacje nadające częstotliwości wzorcowe i sygnały czasu

| Symbol stacji | Przybliżone położenie  | Niepewność                |
|---------------|------------------------|---------------------------|
| DCF 77        | Mainflingen, Niemcy    | $2 \cdot 10^{-12}$        |
| OMA           | Praga, Czechy          | $\pm 1000 \cdot 10^{-12}$ |
| MSF           | Rugby, Wielka Brytania | $\pm 2 \cdot 10^{-12}$    |
| WRC           | Solec Kujawski, Polska | $4 \cdot 10^{-12}$        |

Radio Controlled Clock

Radiowa częstotliwość wzorcowa WRC 225 kHz jest kontrolowana przez GUM z niepewnością na poziomie  $0,02 \cdot 10^{-10}$  Hz/Hz

# Czas fazowy – DCF względem GPS NovAtel PPS



Przyrost czasu fazowego  $1,5\mu\text{s}/6\text{h}$

Odchylenie częstotliwości  $\delta f_g = 7 \times 10^{-11} \text{ Hz/Hz}$  (ale tylko w czasie dnia !!!)

## Dodatkowa literatura do GPS, wzorców czasu i częstotliwości

1. Pawłowski E.: Porównywanie częstotliwości wzorcowych w środowisku LabVIEW, Zeszyty Naukowe WEiA PG, Nr 34/2013, str. 53-56.
2. Pawłowski E.: An experimental investigation into the positioning accuracy of low-cost GPS receivers in LabVIEW environment, Zeszyty Naukowe WEiA PG, nr 47 /2015, s. 139-142.
3. Pawłowski E.: An algorithm for synchronizing a local reference generator to A1 PPS GPS signal, Proceedings of Metrology Commission of Katowice Branch of Polish Academy of Sciences, PPM 2015, s. 150-153.
4. Pawłowski E.: Experimental study of a positioning accuracy with GPS receiver, 12th Conference WZEE 2015, s. 278-283.
5. Pawłowski E., Referowski L., Świsulski D.: Sprawdzanie częstościomierzy cyfrowych w układzie z odbiornikiem częstotliwości wzorcowej DCF77, Przegląd Elektrotechniczny, nr 5s/2002, vol. 78, str. 163-167.
6. Pawłowski E.: Wspomagane komputerowo sprawdzanie generatorów częstotliwości wzorcowych, MWK ' 2001, WAT, ISBN 83-913409-1-0.
7. Pawłowski E.: "Odbiór radiowych sygnałów częstotliwości wzorcowych i ich zastosowania", XXXII MKM 2000, wyd. Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów-wrzesień 2000, tom2, str. 479-486.

# Podsumowanie

1. Rozróżniamy wzorce jednostki miary zwane etalonami i wzorce robocze
2. Etalony są to wzorce wykorzystywane wyłącznie do porównań z innymi wzorcami, nie wykorzystuje się ich w pomiarach
3. Wszystkie wzorce są ze sobą powiązane łańcuchem spójności pomiarowej tworząc piramidę wzorów, na szczycie której znajduje się etalon pierwotny
4. Wzorce służą do wzorcowania
5. Spośród wielkości elektrycznych najczęściej wykorzystywane są wzorce: napięcia, prądu, rezystancji, pojemności, indukcyjności oraz czasu i częstotliwości
6. Do najdokładniejszych obecnie stosowanych wzorców należą wzorce czasu i częstotliwości (fontanny cezowe) o niepewności odtwarzania wartości wzorcowej  $2,3 \cdot 10^{-16}$  ( $2,3 \cdot 10^{-10}$  ppm) czyli 1 sekunda na 138 mln lat



<http://www.nist.gov/pml/div688/grp50/primary-frequency-standards.cfm>