



Praktyczne aspekty realizacji definicji jednostki miary czasu
– schemat spójności pomiarowej a użytkownicy przyrządów
pomiarowych

dr Albin Czubla, GUM

Sekunda SI - definicja



Obecna definicja

(od 1967 r.)

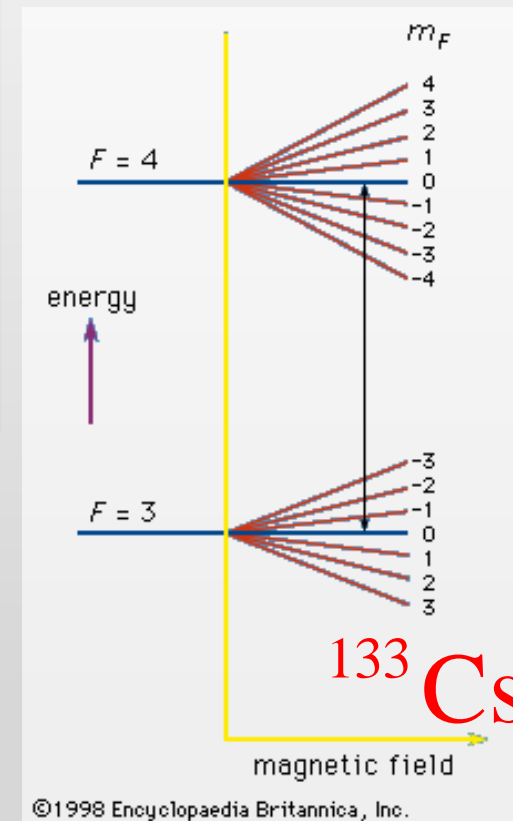
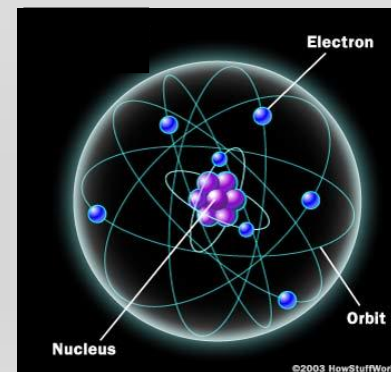
Przedział czasu równy 9 192 631 770 okresom promieniowania odpowiadającego przejściu między dwoma nadsubtelnymi poziomami stanu podstawowego w **atomach cezu 133**.

... w niezaburzonym stanie podstawowym. (od 1997 r.)

Nowa definicja

(od 20.05.2019 r.)

Sekunda jest jednostką czasu zdefiniowaną poprzez przyjęcie ustalonej **wartości liczbowej częstotliwości cezowej $\Delta\nu_{\text{Cs}}$** , to jest częstotliwości nadsubtelnego przejścia w **atomach cezu 133**, w niezaburzonym stanie podstawowym, **wynoszącej 9 192 631 770** i wyrażonej w Hz, który jest równy s^{-1} .



$$E = h \cdot \nu$$

Fizyczne realizacje definicji sekundy SI



$^{133}\text{Cs} \rightarrow 9\,192\,631\,770\text{ Hz}$

$^1\text{H} \rightarrow 1\,420\,405\,751, \dots\text{ Hz}$

$^{87}\text{Rb} \rightarrow 6\,834\,682\,608, \dots\text{ Hz}$

$^{199}\text{Hg}^+ \rightarrow 1,06 \dots\text{ PHz},$

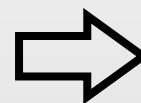
$^{171}\text{Yb}^+ \rightarrow 688, \dots\text{ THz},$



Wierzchołek spójności pomiarowej: Tworzenie międzynarodowych atomowych skal czasu

ALGORYTM
I WYLICZANIE
TAI i UTC

BIPM
(Sekcja Czasu)



TAI, UTC
{UTC – UTC(k)}
{TAI – UTC}

{UTC(k) – Zeg(x)}

> 450 zegarów

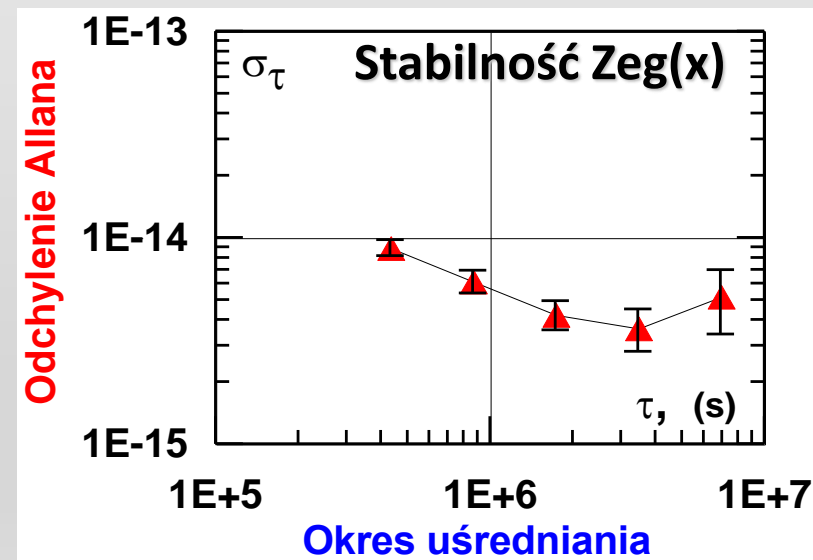
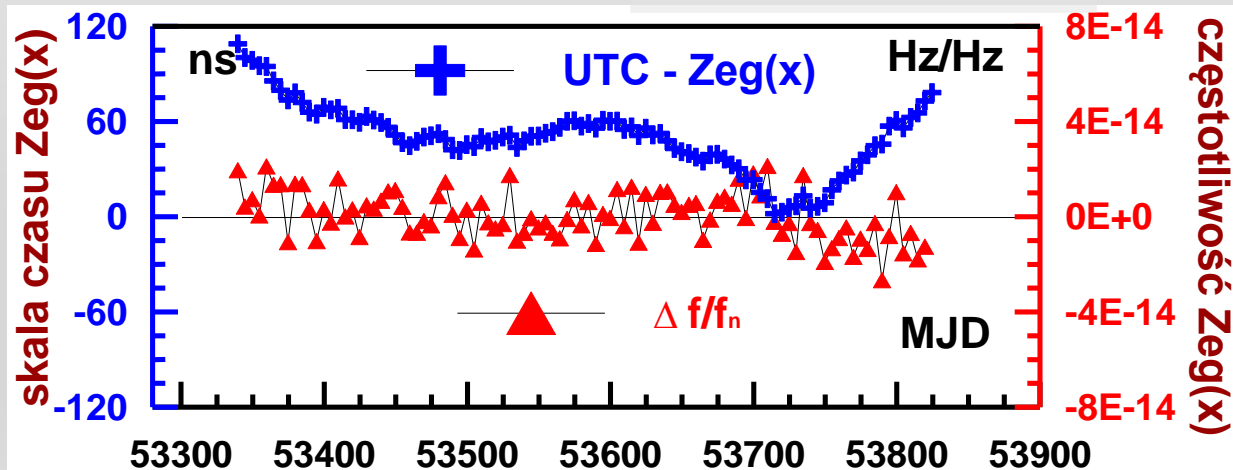
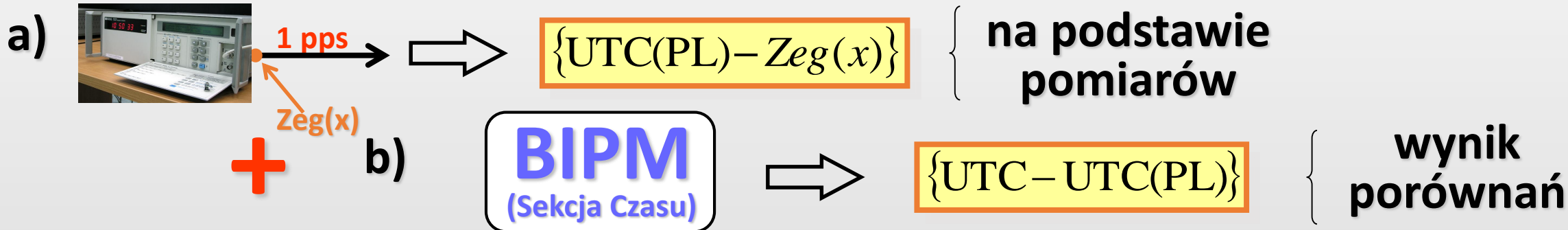
NMI-s

Główne Krajowe Instytuty Metrologiczne
(GUM, PTB, NPL, USNO, ...)

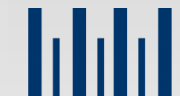
PROWADZENIE
PORÓWNAŃ



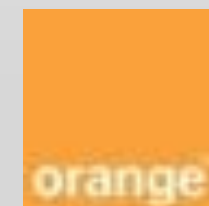
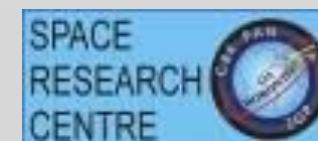
Korzyści z udziału w tworzeniu TAI i UTC



= Bieżąca informacja o jakości pracy posiadanego wzorca



Krajowi uczestnicy porównań



Wzorce pomiarowe z dziedziny czasu i częstotliwości

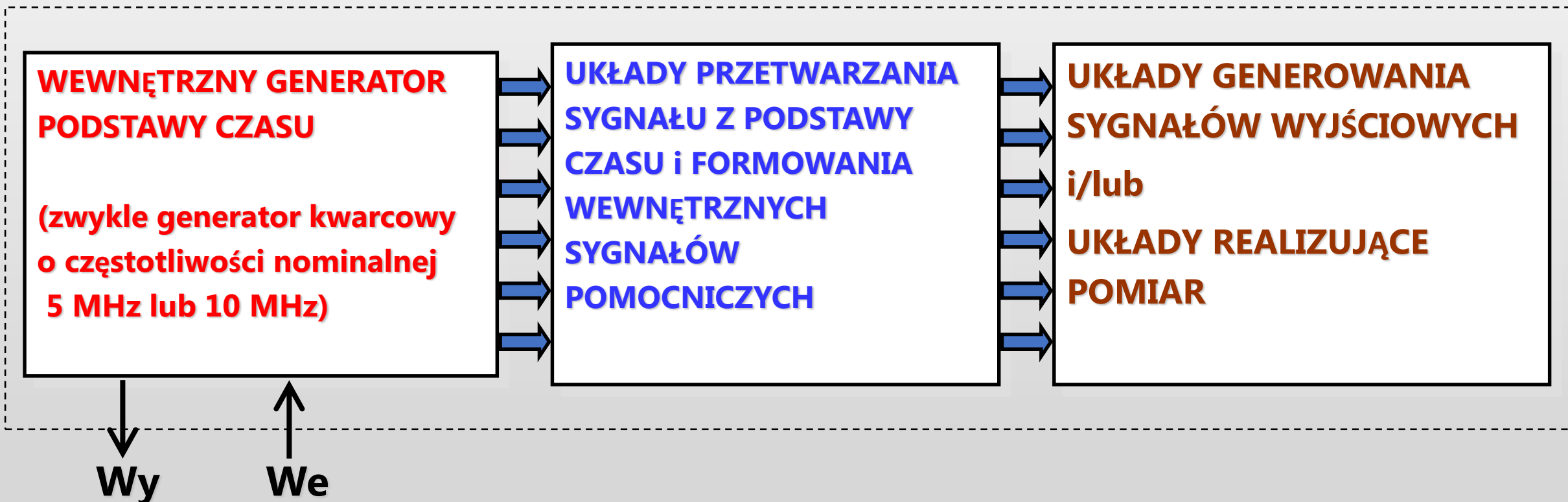


... i inne przyrządy o charakterze użytkowym



PRZYRZĄDY UŻYTKOWE
- włączane i wyłączane w zależności
od potrzeb
- okresowo wzorcowane

Elementy składowe przyrządów z dziedziny TF



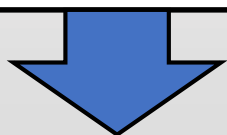
- Możliwość pomiaru/badania sygnału wyjściowego z generatora podstawy czasu
- Możliwość synchronizacji przyrządu sygnałem zewnętrznym

Wpływ podstawy czasu na wynik pomiaru

WEWNĘTRZNY GENERATOR
PODSTAWY CZASU

$$f_n$$

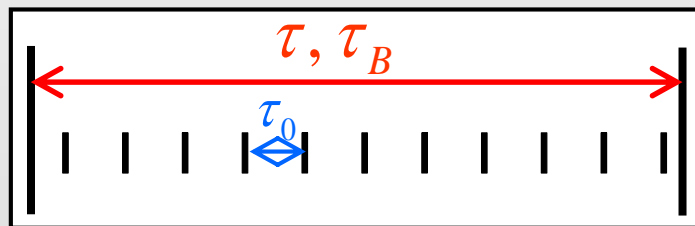
(zwykle 5 MHz lub 10 MHz)



$$f = f_n + \Delta f$$

$$y = \frac{f - f_n}{f_n} = \frac{\Delta f}{f_n}$$

PRZYRZĄD, który **mierzy**



$$\tau_{\text{mierzone}} = \tau + y \cdot \tau$$

$$f_{\text{mierzone}} = f - y \cdot f$$

y – odchylenie względne częstotliwości
generatora podstawy czasu

PRZYRZĄD, który **generuje**

$$\tau_{\text{odtworzane}} = \tau_n - y \cdot \tau_n$$

$$f_{\text{odtworzane}} = f_n + y \cdot f_n$$

Wpływ podstawy czasu: **częst.-czasomierz**

WYNIKI

WZORCOWANIA

OCXO

$$y = \frac{f_k - f_n}{f_n}$$

1. Parametry podstawy czasu po okresie 2 godz. nagrzewania:

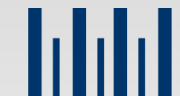
- odchylenie względne częstotliwości (o.w.cz.): **$(-1,20 \pm 0,03) \cdot 10^{-8}$**
- zakres zmian o.w.cz. w czasie 6 h : **$(0,15 \pm 0,04) \cdot 10^{-8}$**

2. Błędy pomiaru wartości średniej częstotliwości:

$$\Delta f \approx -y \cdot f_n$$

częstotliwość, Hz	0,1	1	10	1000	100 000
błąd pomiaru (sinus), mHz	1 ± 4	5 ± 12	-0,8 ± 1,3	13 ± 6	1110 ± 12
błąd pomiaru (prostokąt), mHz	0,0011 ± 0,0001	0,0113 ± 0,0001	0,112 ± 0,001	11,1 ± 0,1	1112 ± 4

O.w.cz. generatora podstawy czasu jest to różnica między wartością (umownie) prawdziwą częstotliwości sygnału wyjściowego tego generatora a jej wartością nominalną, podzielona przez tę wartość nominalną.



Wpływ podstawy czasu: generator

WYNIKI

WZORCOWANIA

OCXO/TCXO

$$y = \frac{f_k - f_n}{f_n}$$

1. Parametry podstawy czasu po okresie 2 godz. nagrzewania:

- odchylenie względne częstotliwości (o.w.cz.): $(-1,65 \pm 0,01) \cdot 10^{-7}$
- zakres zmian o.w.cz. w czasie 6 h : $(4,08 \pm 0,01) \cdot 10^{-7}$

2. Błędy odtwarzania częstotliwości:

$$\Delta f \approx +y \cdot f_n$$

częstotliwość, Hz	1	10	100	1000	10 000
błąd odtwarzania (prostokąt), mHz	$-0,2 \pm 0,3$	-7 ± 30	-20 ± 4	-261 ± 3	-2682 ± 5

Błąd odtwarzania jest różnicą między wartością (umownie) prawdziwą odtwarzanej wielkości a jej wartością nominalną.

Źródła niestabilności podstawy czasu

NIESTABILNOŚĆ TEMPERATURY - zmiany temperaturowe układu drgającego i układów wspomagających.

NIESTABILNOŚĆ POZIOMU NAPIĘCIA ZASILANIA (i poboru mocy) - wpływ na sygnały wyjściowe i na sterowanie układem drgającym.

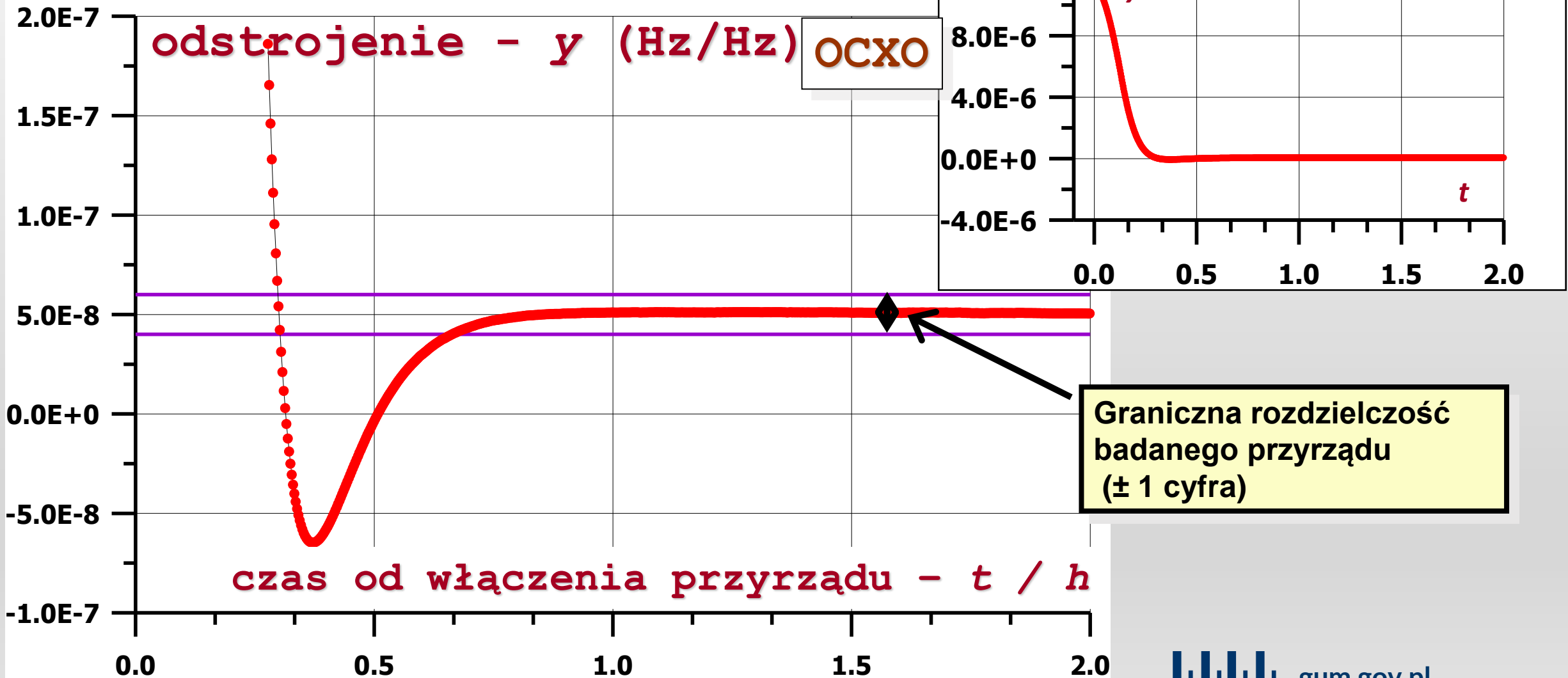
DYNAMIKA PROCESÓW OSCYLACYJNYCH - powolne dochodzenie do stanu równowagi po włączeniu zasilania.

NIESTABILNOŚĆ GEOMETRII - procesy tzw. „starzenia się”, efekt powolnych zmian struktury wewnętrznej i na powierzchni układu drgającego.

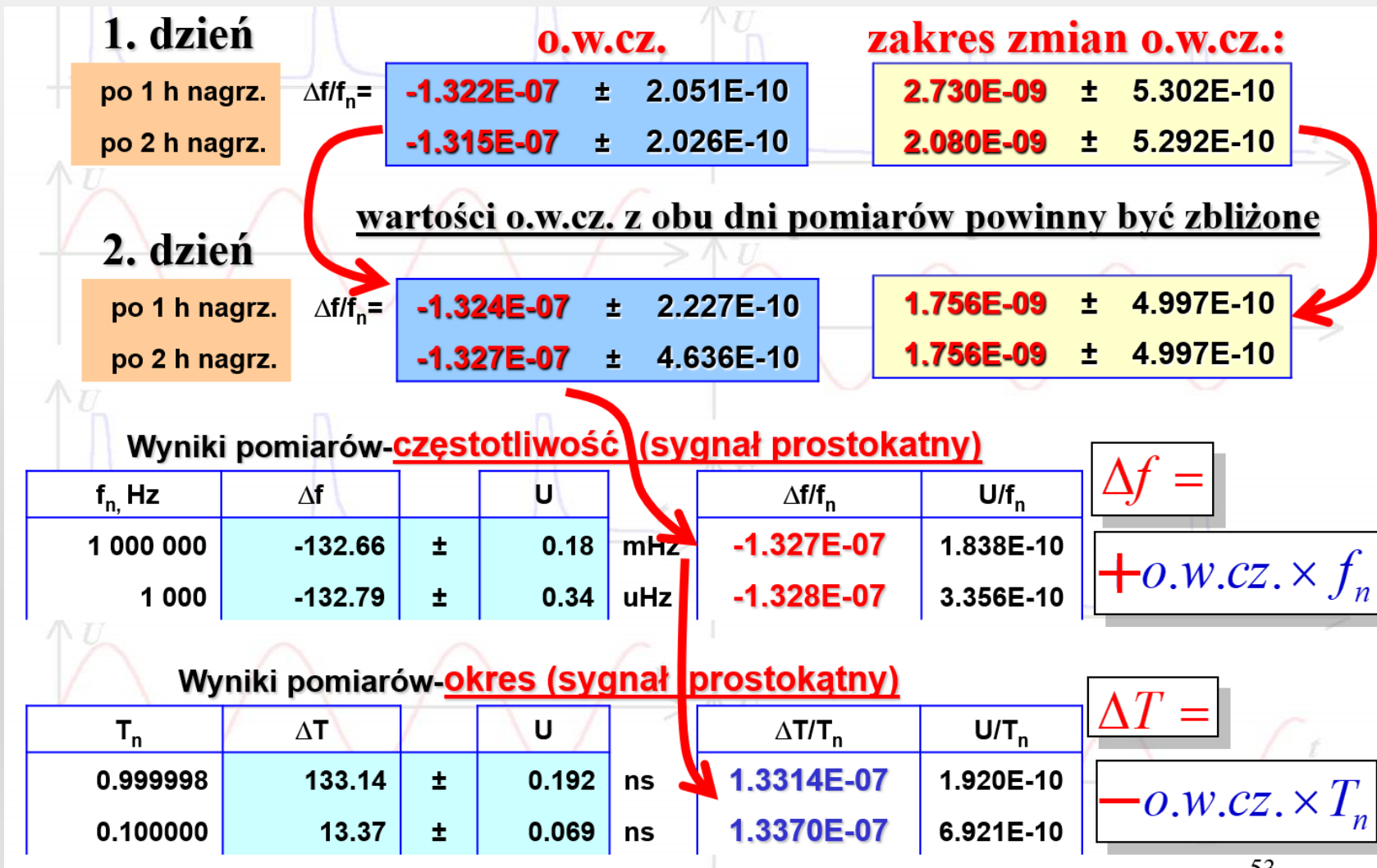
Typowe parametry generatorów podstawy czasu

Typ oscylatora	Standard UCXO	TCXO	OCXO	Rb
Efekt starzenia się: na miesiąc – na rok –	$<5 \times 10^{-7}$ $<5 \times 10^{-6}$	$<1 \times 10^{-7}$ $<1 \times 10^{-6}$	$<1 \times 10^{-8}$ $<7.5 \times 10^{-8}$	$<2 \times 10^{-11}$ $<2 \times 10^{-10}$
Wpływ temperatury: 20°C -26°C – 0°C -50°C –	$<3 \times 10^{-6}$ $<1 \times 10^{-5}$	$<7 \times 10^{-7}$ $<1 \times 10^{-6}$	$<6 \times 10^{-10}$ $<5 \times 10^{-9}$	$<2 \times 10^{-11}$ $<3 \times 10^{-10}$
Zmiany napięcia zasilającego: ±10%	$<1 \times 10^{-8}$	$<1 \times 10^{-8}$	$<5 \times 10^{-10}$	$<1 \times 10^{-11}$
<u>Zmiany łączne</u> <u>długoterminowe:</u> rok po wzorcowaniu– dwa lata po wzorc. –	$<7 \times 10^{-6}$ $<1.2 \times 10^{-5}$	$<1.5 \times 10^{-6}$ $<2.5 \times 10^{-6}$	$<1 \times 10^{-7}$ $<2 \times 10^{-7}$	$<2.5 \times 10^{-10}$ $<5 \times 10^{-10}$

Wpływ czasu wygrzewania



Analiza spójności wyników wzorcowania – 1



Analiza spójności wyników wzorcowania – 2

2. dzień

po 1 h nagr.
po 2 h nagr.

$\Delta f/f_n =$

-1.324E-07 ± 2.227E-10
-1.327E-07 ± 4.636E-10

o.w.cz.

zakres zmian o.w.cz.:

1.756E-09 ± 4.997E-10
1.756E-09 ± 4.997E-10

Wyniki pomiarów-**przedział czasu**

	τ_n	$\Delta\tau$		U		$\Delta\tau/\tau_n$	U/τ_n	$\frac{\Delta\tau - \Delta\tau_1}{\tau_n - \tau_1}$
półkres dodatni	0.000080	-61.8	±	1.03	ns	-7.7250E-04	1.287E-05	
	0.000500	-61.3	±	1.00	ns	-1.2264E-04	2.004E-06	1.143E-06
	0.005000	-61.2	±	1.00	ns	-1.2230E-05	1.999E-07	1.321E-07
	0.050000	-54.9	±	1.02	ns	-1.0976E-06	2.049E-08	1.386E-07
	0.4999990	4.7	±	1.06	ns	9.4000E-09	2.125E-09	1.330E-07
półkres ujemny	0.000080	61.5	±	0.99	ns	7.6925E-04	1.242E-05	
	0.000500	60.5	±	1.26	ns	1.2104E-04	2.529E-06	-2.429E-06
	0.005000	61.5	±	1.02	ns	1.2310E-05	2.030E-07	2.033E-09
	0.050000	67.7	±	1.01	ns	1.3548E-06	2.026E-08	1.242E-07
	0.4999990	127.3	±	1.00	ns	2.5452E-07	1.995E-09	1.315E-07

$$\Delta\tau = \Delta\tau_1 - o.w.cz. \times \tau$$

Analiza spójności wyników wzorcowania – 3

o.w.cz. **zakres zmian o.w.cz.:**

po 1 h nagr.	$\Delta f/f_n =$	7.131E-08 ± 2.926E-10	5.631E-08 ± 4.138E-10
po 2 h nagr.		8.022E-08 ± 2.469E-10	4.740E-08 ± 3.829E-10

Wyniki pomiarów-częstotliwość

	f_n	Δf	U		$\Delta f/f_n$	U/f_n
sinus	1 000 000.0	9.6900E+01 ±	3.27E-01 mHz		9.690E-08	3.270E-10
sinus	100 000.0	9.3030E+00 ±	2.90E-02 mHz		9.303E-08	2.904E-10
sinus	10 000.0	9.6500E-01 ±	1.91E-02 mHz		9.650E-08	1.910E-09
sinus	1 000.0	9.6420E-02 ±	5.67E-02 mHz		9.642E-08	5.674E-08
sinus	100.0	-4.0500E-02 ±	1.87E-01 mHz		-4.050E-07	1.874E-06
sinus	10.0	-2.8058E-02 ±	5.68E-01 mHz		-2.806E-06	5.682E-05
sinus	1.0	3.0559E-02 ±	7.02E-02 mHz		3.056E-05	7.016E-05
sinus	0.1	5.0830E-05 ±	5.65E-03 mHz		5.083E-07	5.652E-05
sinus	123 456.8	1.1417E+01 ±	3.37E-02 mHz		9.248E-08	2.726E-10
prostokąt	10 000.0	9.3720E+02 ±	2.51E+00 uHz		9.372E-08	2.509E-10
prostokąt	10.0	9.6900E+02 ±	1.43E+01 nHz		9.690E-08	1.431E-09
prostokąt	1.0	9.7530E+01 ±	7.71E-01 nHz		9.753E-08	7.714E-10

błędy wyzwiania – sygnał sinusoidalny

Analiza spójności wyników wzorcowania – 4

O.W.CZ. (po 1 h nagr.)

$$\Delta f/f_n = -3.408E-06 \pm 2.75E-06$$

niestabilność częst.:

15 min
3 h

$$\Delta f/f_n = 3.168E-06 \pm 4.00E-06$$

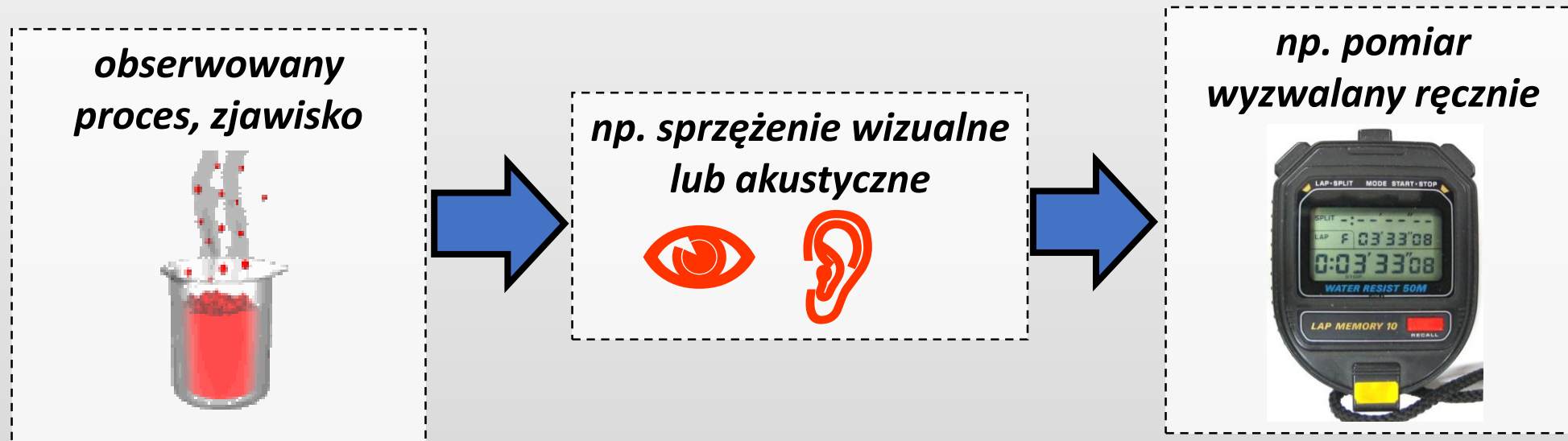
$$4.492E-06 \pm 4.44E-06$$

Wyniki pomiarów-**częstotliwość**

	f_n	Δf		U		$\Delta f/f_n$	U/f_n
prostokąt	1 000 000	-2.66E+00	±	1.53E+00	Hz	-2.663E-06	1.531E-06
prostokąt	100 000	-4.15E-01	±	1.01E-01	Hz	-4.147E-06	1.012E-06
prostokąt	10 000	1.95E-02	±	1.52E-02	Hz	1.947E-06	1.518E-06
prostokąt	1 000	-1.17E-03	±	4.79E-03	Hz	-1.172E-06	4.788E-06
prostokąt	100	-1.16E-03	±	6.45E-04	Hz	-1.164E-05	6.451E-06
prostokąt	10	-2.33E+00	±	9.99E-02	mHz	-2.331E-04	9.993E-06
prostokąt	1	-3.46E+00	±	7.14E-03	mHz	-3.462E-03	7.140E-06
prostokąt	0.1	2.18E+00	±	2.05E-03	mHz	2.177E-02	2.049E-05
prostokąt	0.01	8.81E-02	±	6.32E-04	mHz	8.810E-03	6.325E-05

Nastawa jest cyfrowa, powtarzalna i stała w czasie, ale występują wewnętrzne błędy generacji sygnałów wyjściowych

Rodzaj sprzężenia z mierzonym procesem



Uwaga, należy mieć świadomość:

- bezwładności mierzonego procesu/zjawiska,
- błędu związanego z czasem reakcji osoby wykonującej pomiary.

Świadomość potrzeb, możliwości i ograniczeń

CO JEST MIERZONE?

CZY MIERZONY PROCES JEST STABILNY, POWTARZALNY?

CZY MA PRECYZYJNIE OKREŚLONE GRANICE CZASOWE?

JAKI JEST POZIOM NIEPEWNOŚCI WYNIKAJĄCY Z NATURY PROCESU I WPŁYWU WARUNKÓW ZEWNĘTRZNYCH?

CZY SĄ NARZUCONE „Z GÓRY” WYMAGANIA NA DOKŁADNOŚĆ POMIARU?

JAKI JEST WYMAGANY (AKCEPTOWALNY) POZIOM NIEPEWNOŚCI POMIARU?

JAKIE SĄ WARUNKI POMIARU?

CZY SĄ PRZYRZĄDY SPECJALNIE PRZYSTOSOWANE DO TEGO TYPU POMIARU?

JAKA JEST OPTYMALNA (AKCEPTOWALNA) METODA POMIARU?

W JAKI SPOSÓB JEST / MOŻE BYĆ WYZWALANY POMIAR?

Gwarancja rzetelności pomiarów

KONIECZNOŚĆ REGULARNEGO WZORCOWANIA I / LUB SPRAWDZANIA PRZYRZĄDU / PRZYRZĄDÓW

weryfikacja nie tylko pracy generatora podstawy czasu, ale i działania przyrządu jako całości –
wyniki poddawane analizie

ODPOWIEDNIA CZĘSTOŚĆ WZORCOWANIA I / LUB SPRAWDZEŃ KONTROLNYCH

w zależności od wielkości udziału przyrządu w budżecie niepewności (biorąc pod uwagę zmiany długoterminowe), od jakości sprawdzeń kontrolnych między wzorcowaniami, itp.

ŚWIADOMOŚĆ TEGO, CO JEST MIERZONE, CO CHCEMY UZYSKAĆ ORAZ JAK I CZYM JEST WYKONYWANY POMIAR

dopasowanie i realizacja metody pomiaru, wybór przyrządów pomiarowych stosownie do warunków, potrzeb i możliwości, ocena i analiza parametrów, kompletny budżet niepewności



Świadomość wielorodności źródeł błędów

- **niedoskonałość podstawy czasu,**
- **niedoskonałość działania układów wejściowych i wyjściowych przetwarzających i generujących sygnały oraz realizujących pomiar,**
- **zmiennność układów wewnętrznych przy zmianie zakresu pomiarowego,**
- **niestałość w czasie parametrów wewnętrznych i zewnętrznych,**
- **niedoskonałość sprzężenia pomiaru z mierzonym/badany zjawiskiem,**
- **właściwości/niedoskonałości mierzonego obiektu / zjawiska.**



KONIECZNOŚĆ STOSOWANIA KOMPLETEGO BUDŻETU NIEPEWNOŚCI
uwzględniającego wszystkie czynniki mające wpływ na wynik pomiaru

Stosowanie kompletnego budżetu niepewności

$$U = 2 \times \sqrt{u_0^2 + u_k^2 + \frac{a_{st}^2 + a_T^2}{3} + u_{wew}^2 + u_{met}^2 + u_{std}^2}$$

GENERATOR PODSTAWY CZASU:

u_0 - odstrojenie początkowe

u_k - niestabilność krótkoterminowa

a_{st} - procesy starzenia się

a_T - niestabilność temperaturowa

REALIZACJA POMIARU:

u_{wew} - rozdzielczość (wewnętrzna/ odczytu), błędy wewnętrzne (systematyczny, wyzwiania/syntezy)

u_{met} - metoda pomiaru (rodzaj sprzężenia / sposób doprowadzenia sygnałów na wejścia pomiarowe)

WIELKOŚĆ MIERZONA:

u_{std} - szum pomiaru i zmiany wartości wielkości mierzonej (rozrzut wyników pomiaru)





Główny
Urząd
Miar

Samodzielne Laboratorium Czasu i Częstotliwości



Dziękuję za uwagę

2018

dr Albin Czubla, GUM