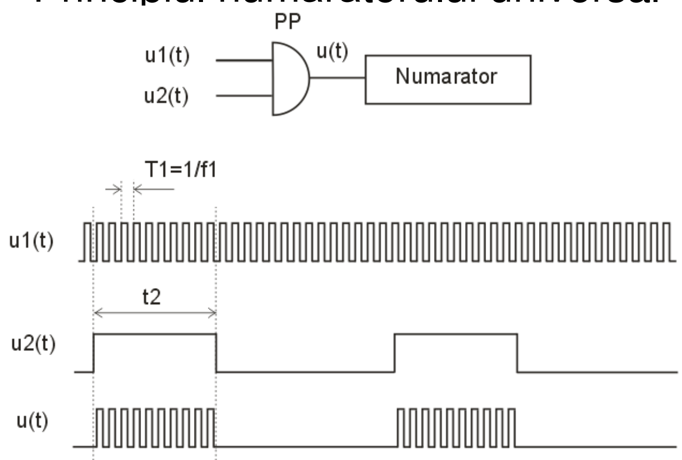
Măsurarea frecvenţelor, perioadelor şi a intervalelor de timp

1

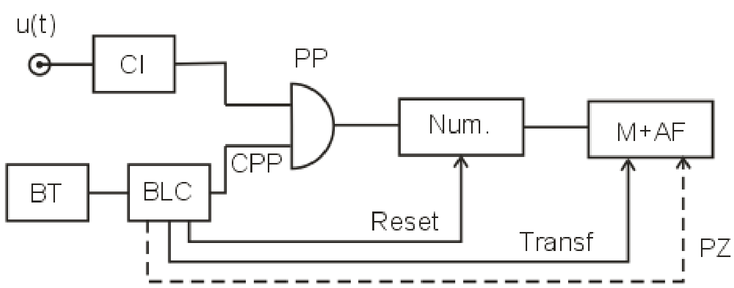
Principiul numărătorului universal



- 2 semnale de intrare:
  - unul necunoscut (f_1 sau T_1 necunoscute)
  - celălalt cunoscut (f_2 sau T_2 cunoscute)
- în numărător: $N = t_{mare}/t_{mic}$ (obligatoriu N > 1)

2

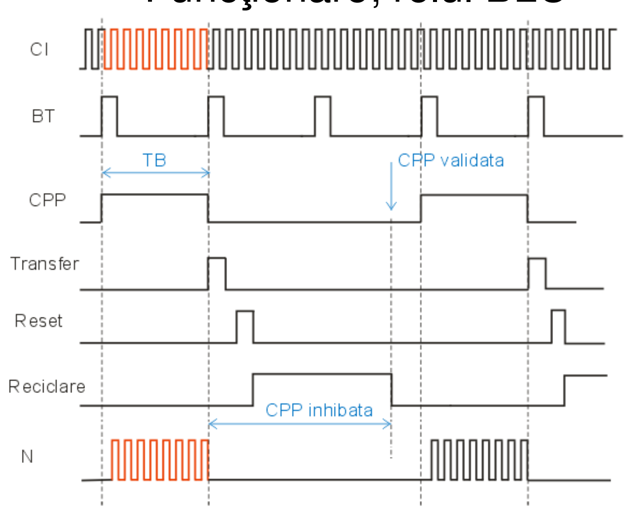
Principiul măsurării frecvenţelor



- s.n. **configuraţia f-metru** a numărătorului universal
- 2 semnale de intrare:
  - u(t) necunoscut
  - BT de perioadă T_B cunoscut
- în numărător: $N = t_{mare}/t_{mic} = T_B / T_x = T_B f_x$

3

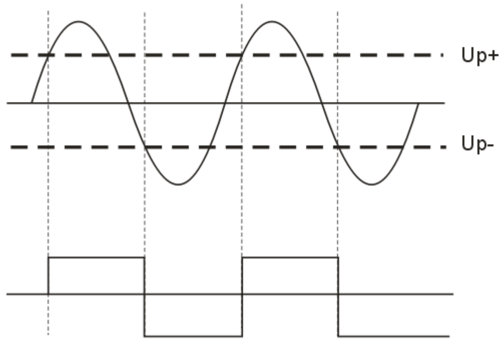
Funcţionare; rolul BLC



- BLC generează $T_{CPP}=T_B$
- BLC generează cele 3 semnale de control
- $T_{reciclare}$ similar $T_{holdoff}$ (osciloscop)

4

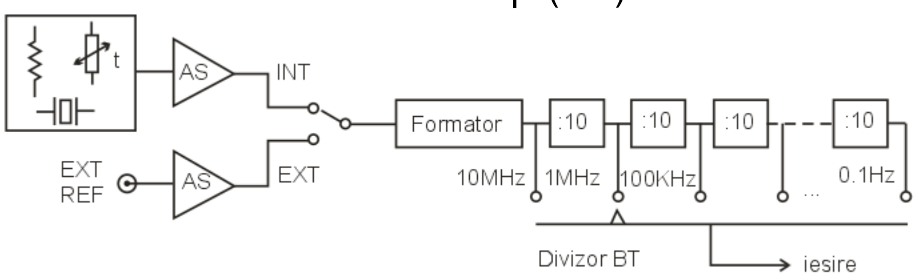
Rolul C.I.



- conversia semnal oarecare → semnal dreptunghiular prin compararea cu nivelul de prag şi frontul dorit
- similar: triggerul de la osciloscop

5

Baza de timp (BT)

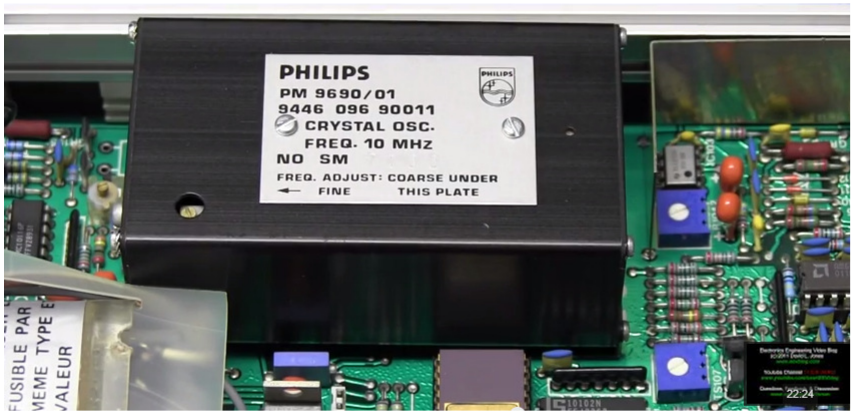


- stabilitatea frecvenţei: $\varepsilon_f = \Delta f/f$
- EXT REF poate fi de la GPS, un rezonator cu rubidiu, etc

1. stabilitate în timp (termen lung):
   XO (10^{-5}) ,TCXO (10^{-6}), OCXO (10^{-7})
2. stabilitate cu temperatura:
   XO (10^{-6}) ,TCXO (10^{-7}), OCXO ($10^{-8..9}$)
3. stabilitate cu tensiunea de alimentare: $10^{-7..-8}$ pt ΔU=10%

6

OCXO



sursa: EEVblog.com

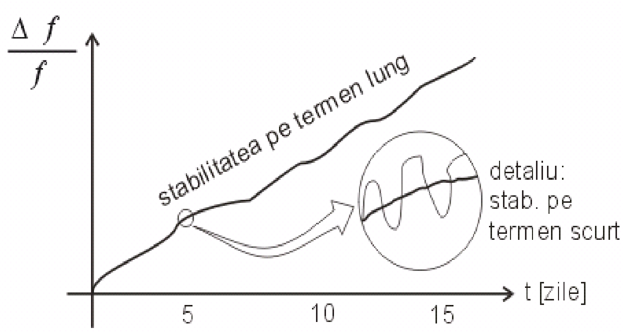
Owen=cuptor (element de încălzire).

OCXO din frecvenţmetrul Philips PM6672

Stabilitate specificată în prospect: 0.1ppm = 10^{-7} /an

7

Stabilitatea BT



stabilitatea în timp (îmbătrînirea)

- pe termen scurt (sec)
- pe termen lung (zile, luni, ani)

8

Semnificaţia N_X la f-metru

numărul din numărător (supraunitar: regula mare/mic):

$$N_x = \frac{T_B}{T_X} = T_B f_x$$

valoarea măsurată: $f_x = \dfrac{N_x}{T_B}$

rezoluţia (pentru N_x=1): $f_{x0} = \dfrac{1}{T_B}$

9

Unitatea de măsură şi PZ

$$f_x = N_x / T_B$$

T_B	Frecventa indicată	Rezolutia (pt. N_x=1)	Pozitia PZ
T_B= 10 s	f_x = 0.1N_x [Hz]	0.1 Hz	xxxxx.x (Hz)
T_B = 1s	f_x = N_x [Hz]	1 Hz	xxxxxx (Hz)
T_B = 0.1s	f_x = 10N_x [Hz] =0.01N_x[KHz]	0.01 KHz	xxxx.xx (KHz)

PZ şi unitatea de măsură sînt aprinse pe afişaj de către BLC în funcţie de rezoluţia din tabel !

OBS: N_x întotdeauna întreg, deci nu are PZ !

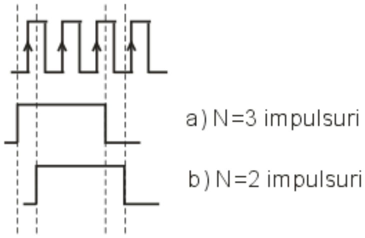
10

Erori în configuraţia f-metru

Surse de eroare:

1. **eroarea cuarţului**: $\varepsilon_Q = \Delta f/f$

2. **eroarea de 1/N:**
   datorată asincronismului dintre semnal şi T_B

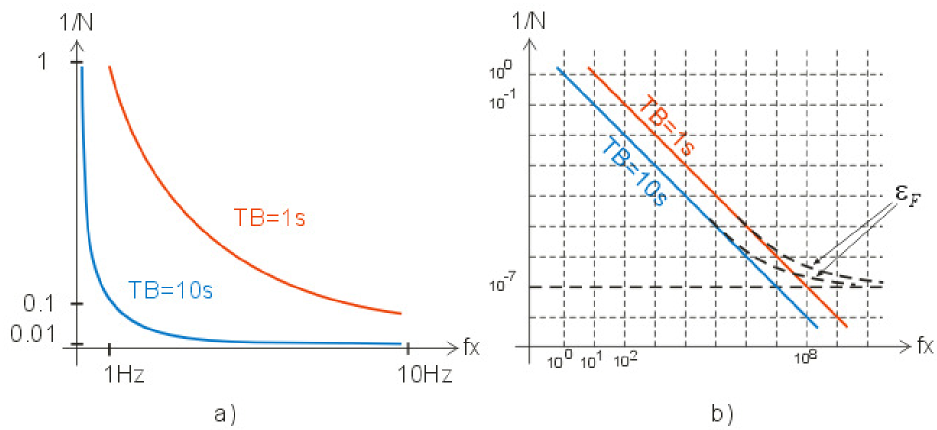


în general $\varepsilon = \Delta N/N$

aici dem. şi notăm $\varepsilon_{1/N} = 1/N = 1/(f_X T_B)$

11

Erori în configuraţia f-metru (cont'd)



reprezentarea $\varepsilon_{1/N}$ se face preferabil logaritmic

În total: eroarea în configuraţie f-metru:

$\varepsilon_F = \varepsilon_Q + \varepsilon_{1/N}$ (reprezentare asimptotică)

Se observă: frecvenţmetrul are **erori mari** la **f mici**

12

Extinderea gamei de frecvențe la f-metru

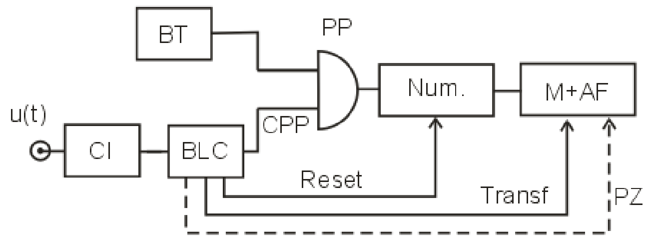
- Circuitele de numărare prezentate au limitări tehnologice → nu pot măsura frecvențe mai mari de cîteva sute de MHz
- Soluție: *prescaler*
- Un prescaler este un divizor de frecvență, fix, proiectat special pt. a funcționa la frecv. foarte mari (uneori GHz)
- Presupunem introducem un prescaler cu 10 după CI, în config. f-metru. Circuitele de după prescaler văd o frecv. de 10 ori mai mică.
- nr de impulsuri numărate N_X ' = N_X /10
- Q: trebuie mutat punctul zecimal ?
- A: Ex: N_X=12345 impulsuri, T_B=1s, f_X=12345 Hz
- după prescaler, N_X' = int(12345/10) = 1234 căci nu se pot număra fracțiuni de impuls
- f_X = 12345Hz; nu putem afișa 1234.5 (acel 0.5 s-a pierdut), avem 2 soluții:
  - afișăm un 0 în plus: 12340 Hz
  - mutăm pct. zecimal: 12.34 KHz
- În ambele cazuri, rezoluția e de *10 ori mai mare (mai proastă)*
- Dar am extins de 10 ori $f_{x\ max,}$, de ex de la 500MHz la 5GHz.

13

Măsurarea perioadelor și intervalelor de timp

14

Măsurarea perioadelor



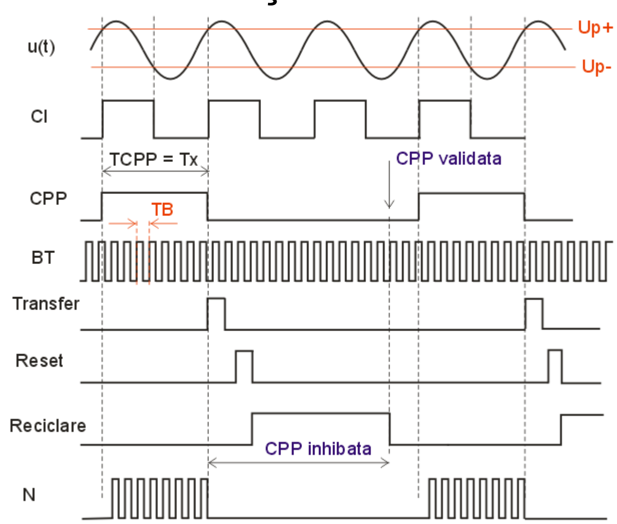
Se inversează CI cu BT

Scop: măsurarea precisă a frecvenţelor mici ↔ perioadelor mari (unde "suferă" f-metrul)

- s.n. **configuraţia T-metru** a numărătorului universal
- 2 semnale de intrare:
  - u(t) necunoscut
  - BT de perioadă T_B cunoscut
- în numărător: $N = t_{mare}/t_{mic} = T_X / T_B$

15

Funcţionarea BLC



- BLC funcţionează similar
- Se inversează rolurile semnalelor BT şi CI
- T_{CPP} este în continuare cea mai mare dintre cele disponibile

16

Numărul din numărător la T-metru

În numărător N_X= mare/mic:

$$N_x = \frac{T_x}{T_B} \Rightarrow T_x = T_B N_x$$

Observăm că **citim direct** T_X şi putem, opţional, **calcula** $f_X=1/T_X$ (la T-metru măsurarea frecvenţei este indirectă)

17

Unitatea de măsură şi PZ

$T_X = T_B N_X$

rezoluţia: $N_X=1$

T_B	Perioada indicată	Rezolutia	Pozitia PZ
T_B= 0.1 μs	T_X =0.1N_X [μs]	0.1 μs	xxxxx.x (μs)
T_B =1 μs	T_X =N_X [μs]	1 μs	xxxxxx (μs)
T_B = 10 μs	T_X =10N_X [μs] = 0.01N_X [ms]	0.01 ms	xxxx.xx (ms)

18

Erori în configuraţia T-metru

Surse de eroare:

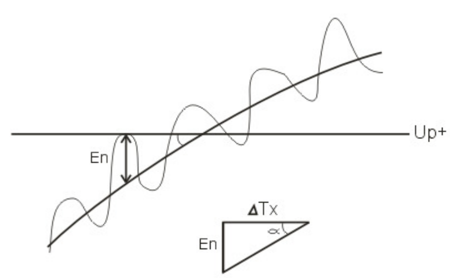
1. **eroarea cuarţului**: $\varepsilon_Q = \Delta f/f$

2. **eroarea de 1/N:**
   $\varepsilon_{1/N} = 1/N_X = T_B/T_X = T_B f_X$

3. o eroare suplimentară → **eroarea de conversie** ε_c

19

Eroarea de conversie



- Apare la CI; există şi la f-metru dar nu e cuantificabilă
- E_n zgomot *(noise)*
- calculăm: $\varepsilon_c = \Delta T_x/T_x = 2E_n / (T_x \, tg\alpha)$
- Definiţie: Raportul Semnal-Zgomot RSZ = U/E_n
  SNR = Signal to Noise Ratio
- demonstrăm că pentru semnal sinusoidal: $\varepsilon_c = 1/(\pi \cdot RSZ)$

20

Erori în cele 2 configuraţii

Eroarea totală în config. T-metru:

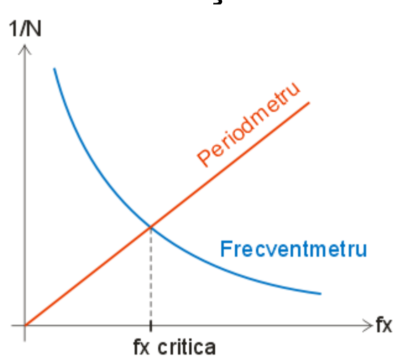
$$\varepsilon_T = \varepsilon_Q + \varepsilon_{1/N} + \varepsilon_c$$

Faţă de config. f-metru:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_Q + \varepsilon_{1/N}$$

21

Frecvenţa critică



impunem $\varepsilon_{1/N}$ egală la f-metru şi T-metru:

$$1/(T_{BF}f_x) = T_{BF}f_x \rightarrow f_x = f_{x\,critic}$$

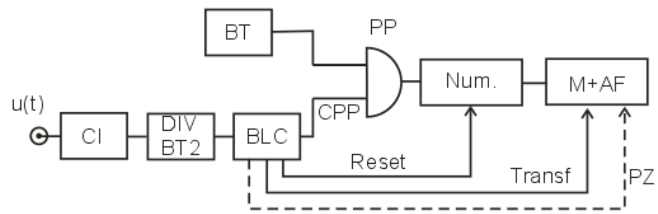
Q: cum se aleg T_{BF}, T_{BT} ?

$f_x < f_{x\,crit} \rightarrow$ alegem T-metru; $f_x > f_{x\,crit} \rightarrow$ alegem f-metru

Aplicaţie: f-metrul reciproc (*reciprocal counter):* măsoară în config f-metru și o obține o primă valoare f_X; dacă $f_X > f_{x\,crit} \rightarrow$ rămâne așa; dacă $f_X < f_{x\,crit} \rightarrow$ mai măsoară o dată în config. T-metru și calculează $f_X=1/T_X$

22

Măsurarea perioadelor multiple



- similar T-metru + divizorul BT2
- creşte timpul de masură de 10^K ori (k=2..3)

- $T'_{CPP}=10^K T_X$
- N_X' = mare/mic = $10^K T_x/T_B = 10^K N_x$ (N$_x$ de la T-metru)
- creşte N_X' faţă de N_X → scade eroarea de $1/N_X$'
- Pe global: reducerea erorilor cu factorul 10^{-K} :

  $\varepsilon_{Tmult} = \varepsilon_Q + 10^{-K} (\varepsilon_{1/N} + \varepsilon_c)$

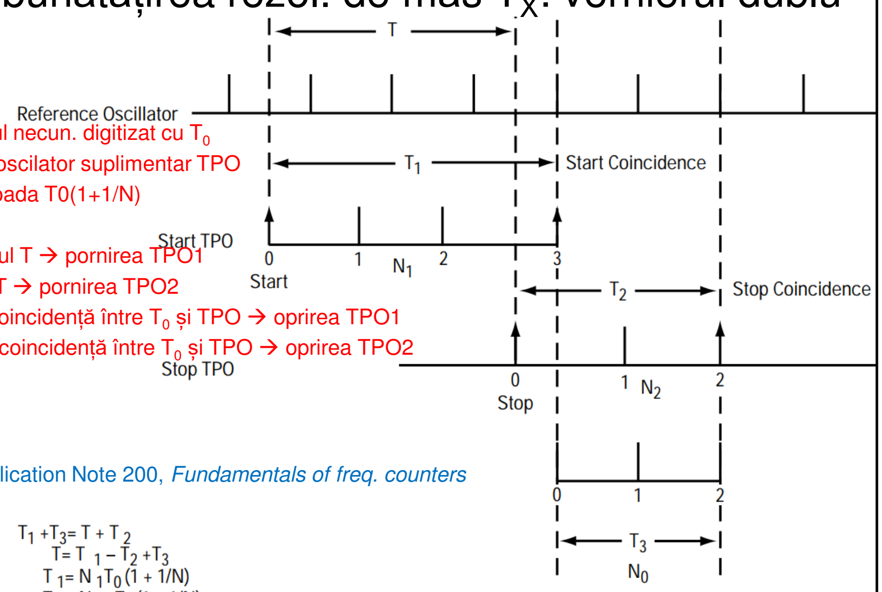
  Q: de ce scade și eroarea de conversie? Justificare !

23

Îmbunătățirea rezol. de măs T_X: vernierul dublu

T: timpul necun. digitizat cu T_0
T1,T2: oscilator suplimentar TPO cu perioada T0(1+1/N)

începutul T → pornirea TPO1
sfîșitul T → pornirea TPO2
prima coincidență între T_0 și TPO → oprirea TPO1
a doua coincidență între T_0 și TPO → oprirea TPO2



Sursa:
HP Application Note 200, *Fundamentals of freq. counters*

$T_1 + T_3 = T + T_2$
$T = T_1 - T_2 + T_3$
$T_1 = N_1 T_0 (1 + 1/N)$
$T_2 = N_2 \cdot T_0 (1 + 1/N)$
$T_3 = N_0 \cdot T_0 \cdot$

Time Interval Measured, $T = T_0 [N_0 + (1 + 1/N)(N_1 - N_2)]$

24

Vernierul dublu

Întrucît cele 2 coincidențe care duc la oprirea celor 2 oscilatoare corespund atît pasului T_0 cît și pasului TPO, putem nota T_3 timpul între ele, scris ca multiplu de oricare dintre ele. Alegem să scriem $T_3=N_0T_0$

Obs pe figură că $T+T_2=T_1+T_3$

de unde $T = T_1-T_2+T_3$ și prin înlocuire obținem:

$$\mathbf{T} = \mathbf{T_0}\left[\mathbf{N_0} + \frac{(\mathbf{N}+1)}{\mathbf{N}}(\mathbf{N_1} - \mathbf{N_2})\right]$$

- rezoluția originală era $\Delta T = T_0$ (baza de timp)
- rezoluția finală $\Delta T'$ este T_0 (rezoluția originală) înmulțită cu un factor ce conține N la numitor, deci noua rezoluție echivalentă este

$$\Delta T' = \Delta T / N$$

- introd. N la numitor → scăderea rezol. → îmbunătățire (mai mic=mai bun)

25

Vernierul dublu

Exemplu: pt f_{BT}=200MHz, $T_0=T_{BT}$=5ns deci ΔT=5ns

dacă N=256, obținem $\Delta T' = \Delta T/N$= 20ps (picosecunde)

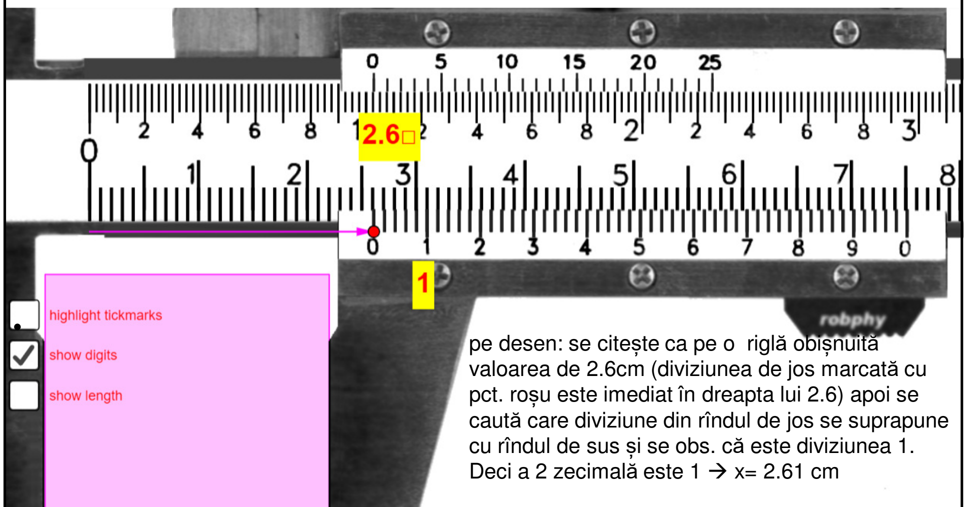
OBS: în mod normal, o rezoluție ΔT înseamnă că se poate măsura orice număr multiplu de ΔT. De ex pt ΔT =0.01s ne așteptăm la orice rezultat: 0.01s, 0.02s, 0.03s ... 0.98s, 0.99s. În cazul nostru, în formula $\Delta T'$ factorul care îl înmulțește pe 1/N nu poate fi oricît (depinde de N_0, N_1, N_2)

Posibil să mai fi văzut dispozitive care afișează cu zecimale, dar doar un număr de valori fixate, de ex un termometru afișează 20.14 ºC, următoarea valoare posiblă este 20.31 ºC etc. E oricum o rezoluție mai mică decît dacă valoarea era fără zecimale, de ex. 20 ºC

26

Vernierul dublu

- Analogie: *șublerul* care permite citirea cu rezoluții de 0.1mm avînd diviziunile distanțate la 1mm. Mai există un rînd gradat cu pas diferit) numit și *vernier*. Citirea se face identificînd care diviziune din vernier se suprapune cu una din primul rînd.

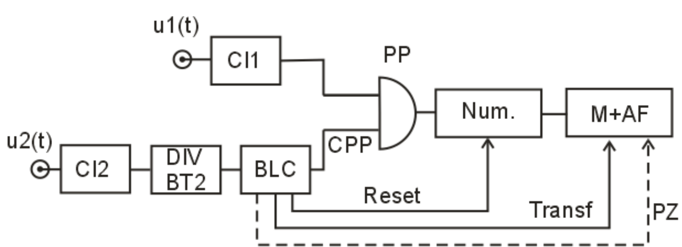


pe desen: se citește ca pe o riglă obișnuită valoarea de 2.6cm (diviziunea de jos marcată cu pct. roșu este imediat în dreapta lui 2.6) apoi se caută care diviziune din rîndul de jos se suprapune cu rîndul de sus și se obs. că este diviziunea 1. Deci a 2 zecimală este 1 → x= 2.61 cm

- exemplu de măsurare cu șublerul: https://www.youtube.com/watch?v=vkPlzmalvN4

27

Măsurarea raportului de frecvenţe



BT scos din circuit (similar cu modul XY al osciloscopului)

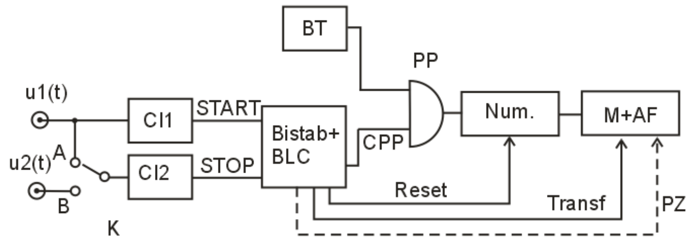
pp. u_2 semnalul mai lent ($f_2 < f_1$)

N=mare/mic = $10^K T_2/T_1 = 10^K f_1/f_2$

$$\left(\frac{f_1}{f_2}\right) = 10^{-k} N_x$$ (rezoluţia este 10^{-K})

28

Măsurarea intervalelor de timp

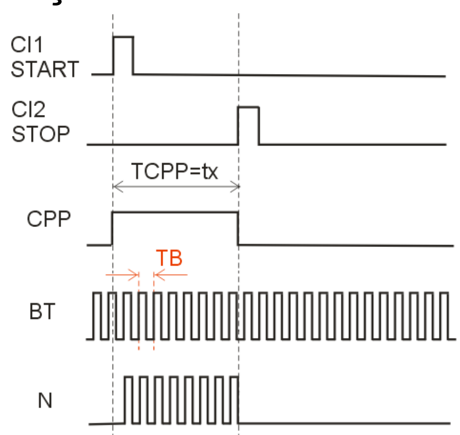


- K=A → măsurări asupra unui singur semnal
- K=B → 2 semnale

- BT: frecvenţe mari (idem periodmetru)
- Q: de ce frecvenţe mari ?

29

Funcţionarea BLC cu 2 intrări



BLC cu intrări start-stop
Echivalent cu un *circuit bistabil*

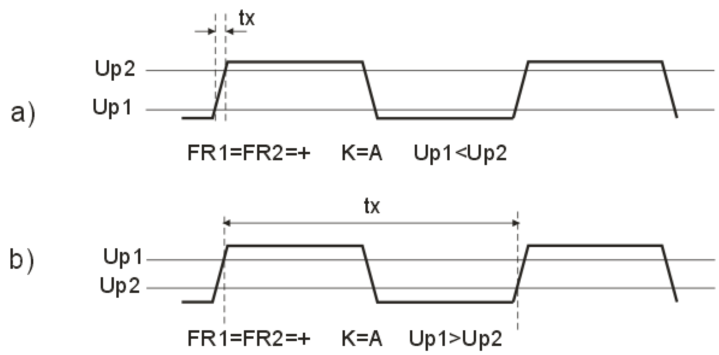
N_X = mare/mic = T_{CPP}/T_B

Q. Cine e t_X ?

A. Posibilităţi multiple de alegere t_x

30

Măsurări posibile

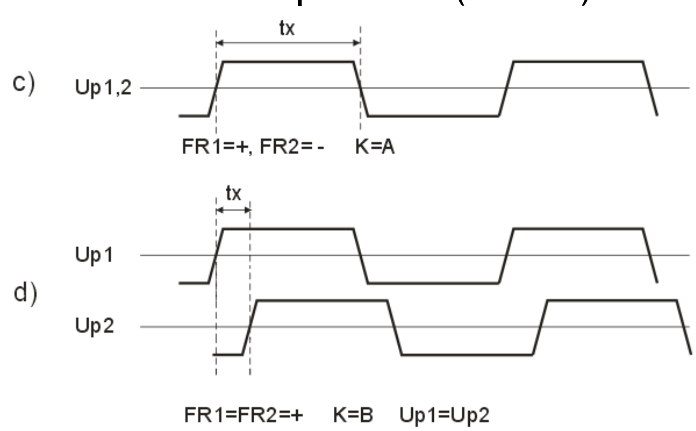


a) durata frontului unui semnal
$U_{P1/2}$= 10% şi 90%

b) perioada unui semnal

31

Măsurări posibile (cont'd)

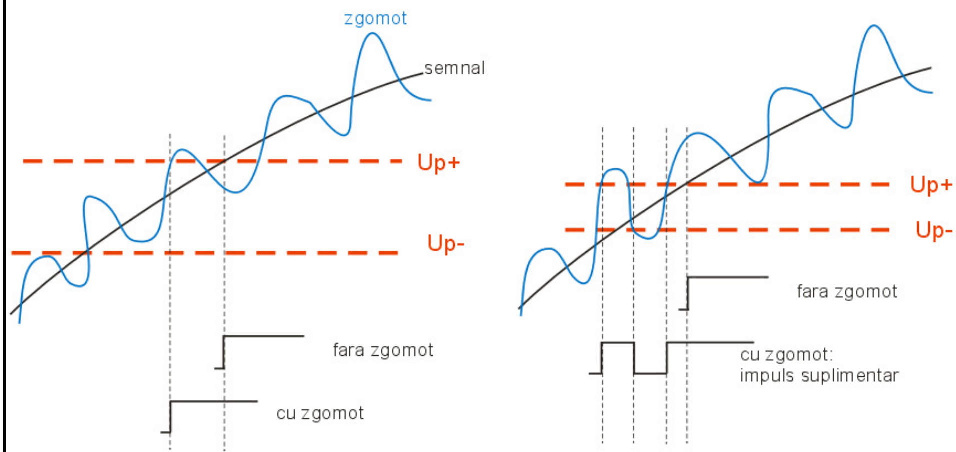


c) durata unui impuls

d) întîrzierea $t_x = \Delta t$ dintre 2 semnale
OBS: defazajul $\varphi = \Delta t/T$ deci combinaţie b) cu d)

32

Efectul zgomotului

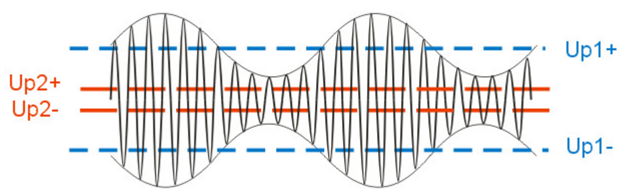


Ex1: situaţie în care pragurile trebuie să fie *depărtate*

Q: care e efectul zgomotului în configuraţiile f-metru / T-metru ?

33

Efectul zgomotului (cont'd)



Ex2 : Situaţie în care pragurile trebuie să fie *apropiate*
(semnal modulat în amplidudine)

şi aici există zgomot dar...
pragurile prea îndepărtate → indicaţie stabilă, dar eronată (cazul Up1)

34

Bibliografie obligatorie:

http://ham.elcom.pub.ro/metc/doc/cap5.pdf

Bibliografie opțională:

https://www.changpuak.ch/electronics/downloads/HP_AN200-Fundamentals_of_Frequency_Counters.pdf

(document de referință HP, devenit Agilent, devenit Keysight)

35