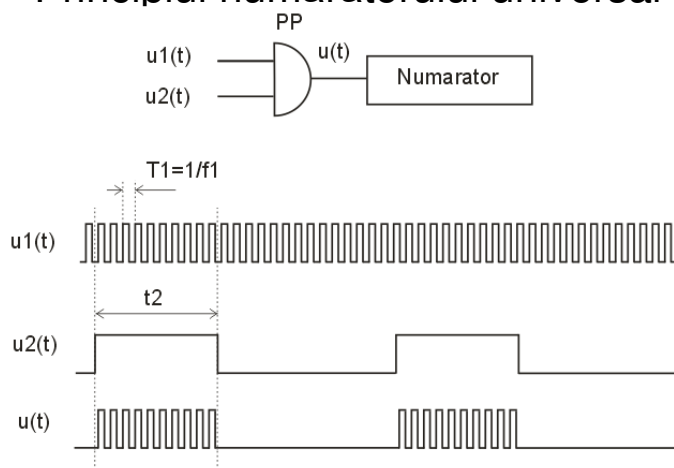


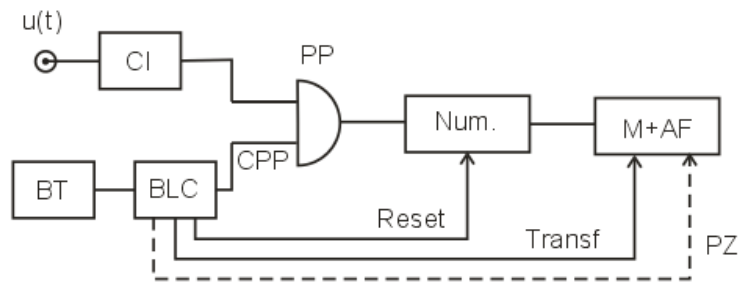
Măsurarea frecvențelor, perioadelor și a intervalelor de timp

Principiul numărătorului universal



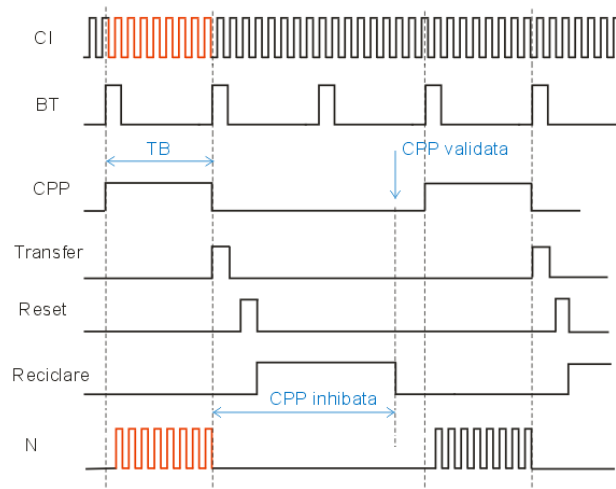
- 2 semnale de intrare:
 - unul necunoscut (f_1 sau T_1 necunoscute)
 - celălalt cunoscut (f_2 sau T_2 cunoscute)
- în numărător: $N = t_{\text{mare}}/t_{\text{mic}}$ (obligatoriu $N > 1$)

Principiul măsurării frecvențelor



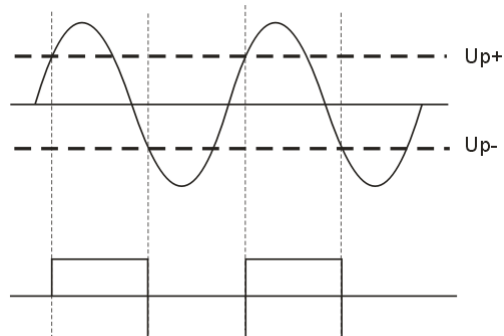
- s.n. **configurația f-metru** a numărătorului universal
- 2 semnale de intrare:
 - $u(t)$ necunoscut
 - BT de perioadă T_B cunoscut
- în numărător: $N = t_{\text{mare}}/t_{\text{mic}} = T_B / T_x = T_B f_x$

Funcționare; rolul BLC



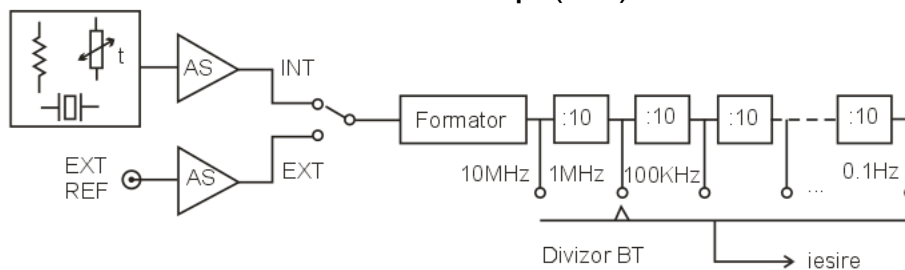
- BLC generează $T_{CPP} = T_B$
- BLC generează cele 3 semnale de control
- $T_{\text{reciclare}}$ similar T_{holdoff} (osciloscop)

Rolul C.I.



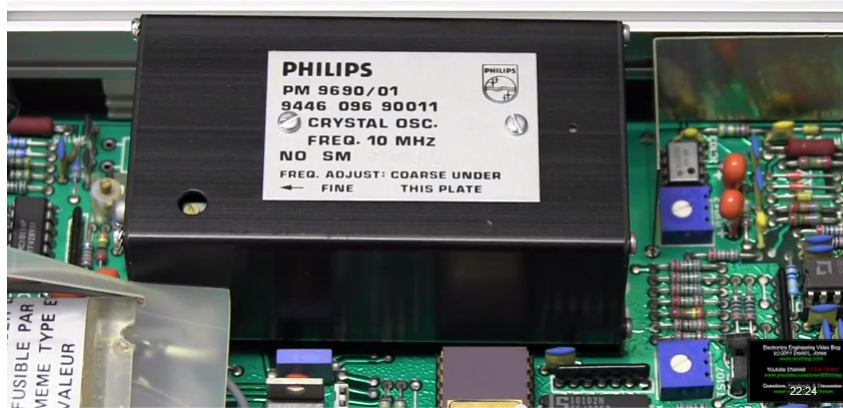
- conversia semnal oarecare $\rightarrow$ semnal dreptunghiular prin compararea cu nivelul de prag și frontul dorit
- similar: triggerul de la osciloscop

Baza de timp (BT)



- stabilitatea frecvenței: $\varepsilon_f = \Delta f/f$
 - 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 $\Delta U=10\%$

OCXO



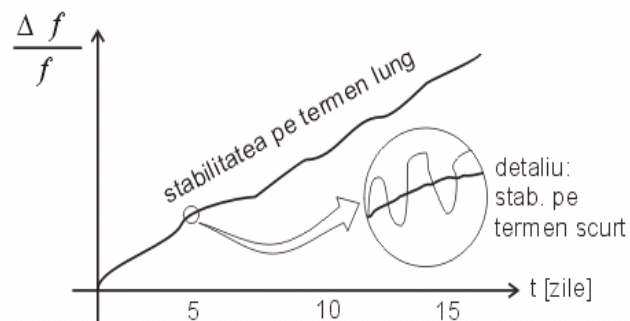
sursa: EEVblog.com

Oven=cuptor (element de încălzire).

OCXO din frecvențmetrul Philips PM6672

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

Stabilitatea BT



stabilitatea în timp (îmbătrânirea)

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

Semnificația 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: $f_x = \frac{N_x}{T_B}$

rezoluția (pentru $N_x=1$): $f_{x0} = \frac{1}{T_B}$

Unitatea de măsură și PZ

$$f_x = N_x / T_B$$

T_B	Frecvența indicată	Rezoluția (pt. $N_x=1$)	Pozitia PZ
$T_B = 10 \text{ s}$	$f_x = 0.1 N_x \text{ [Hz]}$	0.1 Hz	xxxxx.x (Hz)
$T_B = 1 \text{ s}$	$f_x = N_x \text{ [Hz]}$	1 Hz	xxxxxx (Hz)
$T_B = 0.1 \text{ s}$	$f_x = 10 N_x \text{ [Hz]}$ $= 0.01 N_x \text{ [KHz]}$	0.01 KHz	xxxx.xx (KHz)

PZ și unitatea de măsură sînt aprinse pe afișaj de către BLC în funcție de rezoluția din tabel !

OBS: N_x întotdeauna întreg, deci nu are PZ !



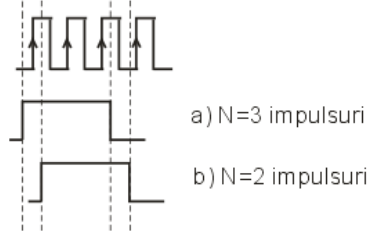
Erori în configurația f-metru

Surse de eroare:

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

2. **eroarea de 1/N:**

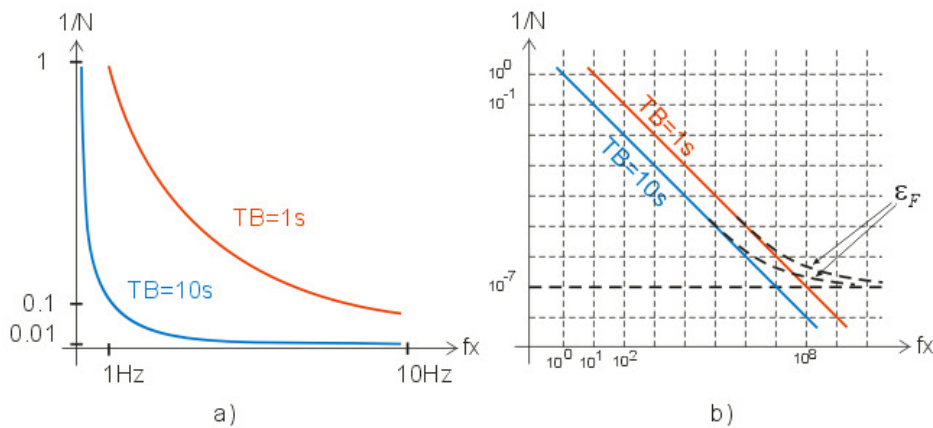
datorată asincronismului dintre semnal și T_B



în general $\varepsilon = \Delta N/N$

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

Erori în configurația f-metru (cont'd)



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

În total: eroarea în configurație f-metru:

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

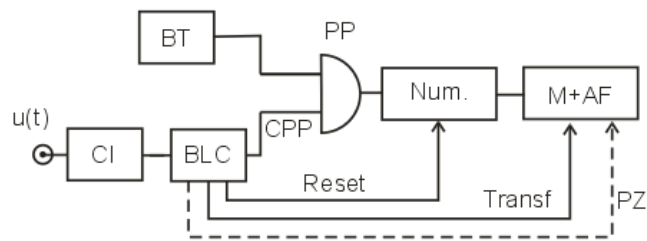
Se observă: frecvențmetrul are erori mari la f mici

Extinderea gamei de frecvențe la f-metru

- Circuitele de numărare prezentate au limitări tehnologice → nu pot măsura frecvențe mai mari de câteva 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, $N_X' = \text{int}(12345/10) = 1234$ căci nu se pot număra fracțiuni de impuls
- $f_X = 12345\text{Hz}$; 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.

Măsurarea perioadelor și intervalelor de timp

Măsurarea perioadelor

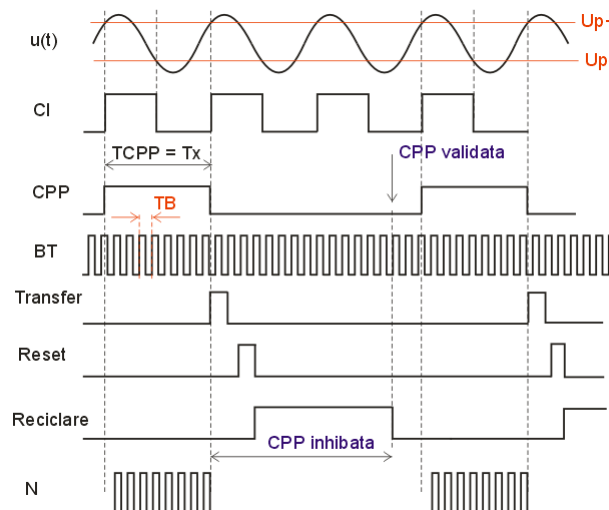


Se inversează CI cu BT

Scop: măsurarea precisă a frecvențelor mici ↔ perioadelor mari (unde “suferă” f-metrul)

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

Funcționarea BLC



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

Numărul din numărător la T-metru

În numărător $N_x = \text{mare/mic}$:

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

Observăm că **citim direct** T_x și putem, opțional, **calcula** $f_x = 1/T_x$ (la T-metru măsurarea frecvenței este indirectă)

Unitatea de măsură și PZ

$$T_x = T_B N_x$$

rezoluția: $N_x = 1$

T_B	Perioada indicată	Rezoluția	Pozitia PZ
$T_B = 0.1 \mu s$	$T_x = 0.1 N_x [\mu s]$	$0.1 \mu s$	xxxxx.x (μs)
$T_B = 1 \mu s$	$T_x = N_x [\mu s]$	$1 \mu s$	xxxxxx (μs)
$T_B = 10 \mu s$	$T_x = 10 N_x [\mu s]$ $= 0.01 N_x [ms]$	$0.01 ms$	xxxx.xx (ms)

Erori în configurația T-metru

Surse de eroare:

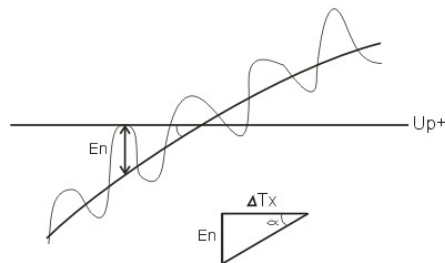
1. **eroarea cuarțului:** $\varepsilon_Q = \Delta f/f$

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

Eroarea de conversie



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

Erori în cele 2 configurații

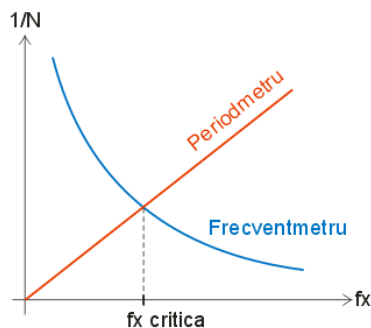
Eroarea totală în config. T-metru:

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

Față de config. f-metru:

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

Frecvența critică



este frecvența la care $\varepsilon_{1/N}$ egală la f-metru și T-metru:

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

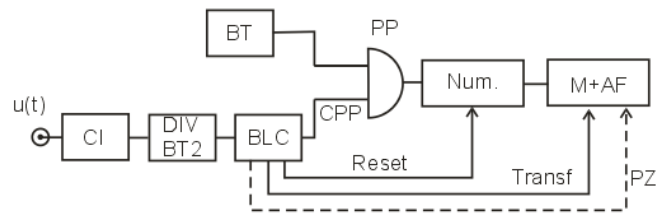
Q: cum se aleg T_{BF} , T_{BT} ?

A: pe fig. BT, obs că selectorul ia valori în dreapta pt T_{BF} mari (10s, 1s,...), respectiv T_{BT} sînt valori mici (coresp. f_{BT} mari $\rightarrow$ max 10MHz/0.1us pe figură)

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

Aplicație: f-metrul reciproc (reciprocal counter): măsoară în config f-metru și o obține o primă valoare f_x ; dacă $f_x > f_{x \text{ crit}}$ $\rightarrow$ rămîne așa; dacă $f_x < f_{x \text{ crit}}$ $\rightarrow$ mai măsoară o dată în config. T-metru și calculează $f_x = 1/T_x$. Necesită uP pt calcul. Schema simplă de T-metru nu poate afișa decît T_x .

Măsurarea perioadelor multiple



- similar T-metru + divizorul BT2
- crește timpul de măsură de 10^K ori ($k=2..3$)
- $T'_{CPP} = 10^K T_X$
- $N'_X = \text{mare/mic} = 10^K T_X / T_B = 10^K N_X$ (N_X de la T-metru)
- crește N'_X față de $N_X \rightarrow$ scade eroarea de $1/N'_X$
- Pe global: reducerea erorilor cu factorul 10^{-K} :
 $\epsilon_{Tmult} = \epsilon_Q + 10^{-K} (\epsilon_{1/N} + \epsilon_c)$
Q: de ce scade și eroarea de conversie? Justificare !

Îmbunătățirea rezol. de măsură T_X : vernierul dublu

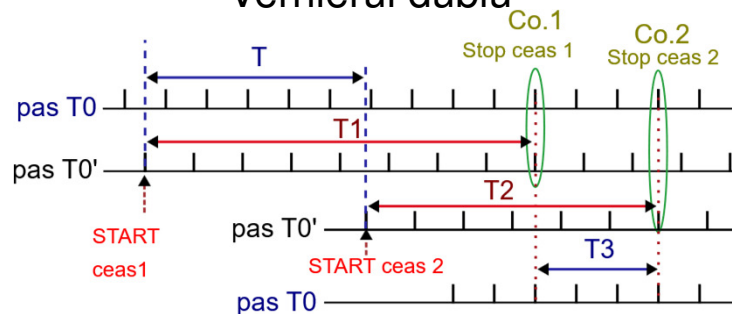


- Scop: dorim să măsurăm (să digitizăm) un timp necunoscut T folosind un ceas T_0 (echiv. cu rigla cu pasul T_0 de pe fig.) deci rezoluția de măsură T_0
- Obs că începutul și sfârșitul T **nu se suprapun** perfect cu diviziunile T_0
- Dorim să obținem o rezoluție echiv. mai mică, de tipul T_0/N , echiv. cu a avea diviziuni de N ori mai dese
- Introducem două ceasuri suplimentare cu perioada $T_0' = T_0(1+1/N)$

Începutul T duce la **pornirea** ceasului suplimentar 1 cu T_0'
 sfârșitul T duce la **pornirea** ceasului suplimentar 2 cu T_0'

Q: Când se opresc aceste 2 ceasuri suplimentare?

Vernierul dublu



$T_0' = T_0(1+1/N)$ deci diviziunile cu pașii T_0 și T_0' în general sînt diferite, dar apar suprapuneri periodice numite coincidențe: Co1 și Co2

- **oprirea** ceasului supl. 1 se face la prima coincidență între T_0 și ceasul 1 cu T_0' (Co1); timpul între pornirea și oprirea acestui ceas va fi T_1
- **oprirea** ceasului supl. 2 se face la prima coincidență între T_0 și ceasul 2 cu T_0' (Co2); timpul între pornirea și oprirea acestui ceas va fi T_2

Notăm T_3 timpul dintre Co1 și Co2. Datorită coincidențelor dintre ceasuri, acest timp poate fi măsurat atît cu ceasul T_0 cît și T_0' .

Obs pe fig: $T+T_2=T_1+T_3$

Vernierul dublu

- T și T_3 fiind măsurate cu ceasul T_0 se scriu ca multipli de T_0
- T_1 și T_2 fiind măsurate cu ceasul T_0' se scriu ca multipli de acesta, de ex. $T_1=N_1T_0'$, $T_2=N_2T_0'$

- $T_0' = T_0(1+1/N)$

$$\begin{aligned} T_1 + T_3 &= T + T_2 \\ T &= T_1 - T_2 + T_3 \\ T_1 &= N_1 T_0' (1 + 1/N) \\ T_2 &= N_2 \cdot T_0' (1 + 1/N) \\ T_3 &= N_0 \cdot T_0 \end{aligned}$$

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

OBS: se numește *vernier dublu* căci ceasurile cu $T_0' > T_0$ sînt echivalente cu 2 *vernieri* (identice) din cadrul unui șubler.

Sursa: HP Application Note 200, *Fundamentals of frequency counters*

Vernierul dublu

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

- rezoluția originală era $\Delta T = T_0$
- 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 $\rightarrow$ scăderea rezol. $\rightarrow$ îmbunătățire (mai mic=mai bun)

Vernierul dublu

Exemplu: pt un ceas (bază de timp) $f_{BT}=200\text{MHz}$, $T_0=T_{BT}=5\text{ns}$ deci $\Delta T=5\text{ns}$
dacă $N=256$, obținem $\Delta T' = \Delta T/N = 20\text{ps}$ (picosecunde)

OBS: în mod normal, o rezoluție ΔT înseamnă că se poate măsura orice număr multiplu de ΔT . De ex pt $\Delta T = 0.01\text{s}$ ne așteptăm la orice rezultat dintre 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 oricât (depinde de N_0 , N_1 , N_2). Prin urmare rezoluția va fi mai mare, dar totuși mai mică decât cea originală.

Posibil să mai fi văzut dispozitive care afișează cu zecimale, dar doar un număr de valori fixate, de ex un termometru afișează 20.14°C , următoarea valoare posibilă este 20.31°C etc. E oricum o rezoluție mai mică decât dacă valoarea era fără zecimale, de ex. 20°C urmat de 21°C . Sau cursorul de la osciloscop are un pas > 1 .

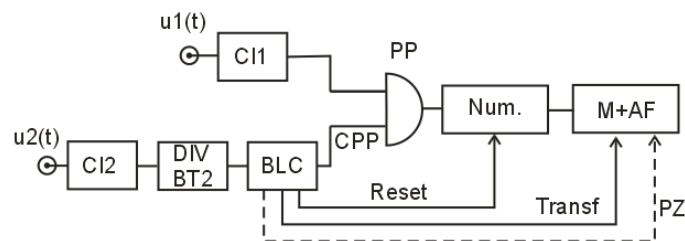
Analogie vernier dublu: măș. cu sublerul

- Analogie: *șublerul* care permite citirea lungimilor cu rezoluții de 0.1mm deși are diviziunile distanțate la 1mm (echiv. T_0 precedent). Mai există rîndul de jos gradat cu pas mai mare, echiv. T_0' , numit **vernier**.
- marcajul „0” din rîndul de jos (pct. roșu●) este reperul folosit pt. citirea pe diviziunile gradate la 1 mm. În cazul nostru se vede că „0” este imediat în dreapta lui 5.5 deci X e în intervalul 5.5...5.6 cm



- Se caută coincidența dintre diviziunile de pe vernier și cele la 1mm. Se observă de ex că „1” pe vernier cade între celelalte div. Cea mai bună suprapunere (coincidența) este la diviziunea 7 de pe vernier (vîrfurile pixelului) deci zecimala este 7: $X = 5.57$ cm
- exemplu de măsurare cu șublerul: <https://www.youtube.com/watch?v=s-5kGzDHpPo>

Măsurarea raportului de frecvențe

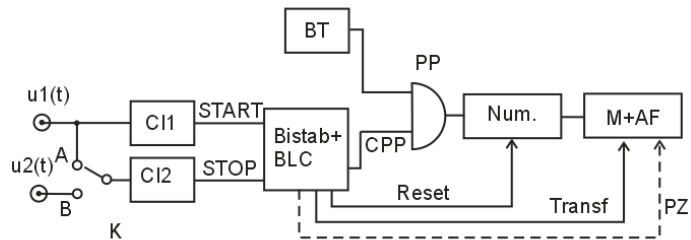


- configurație a num. universal în care **BT este scoasă din circuit** (similar cu modul XY al osciloscopului)
- pp. u_1 semnalul mai rapid și u_2 mai lent ($f_2 < f_1$)

$$N = \text{mare/mic} = 10^K T_2 / T_1 = 10^K f_1 / f_2$$

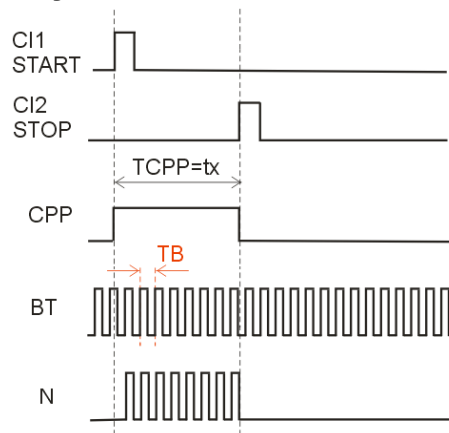
$$\left(\frac{f_1}{f_2} \right) = 10^{-k} N_x \quad (\text{rezoluția este } 10^{-K})$$

Măsurarea intervalelor de timp



- $K=A \rightarrow$ măsurări asupra unui singur semnal
- $K=B \rightarrow$ 2 semnale
- BT: frecvențe mari (idem periodmetru)
- Q: de ce frecvențe mari ?

Funcționarea BLC cu 2 intrări



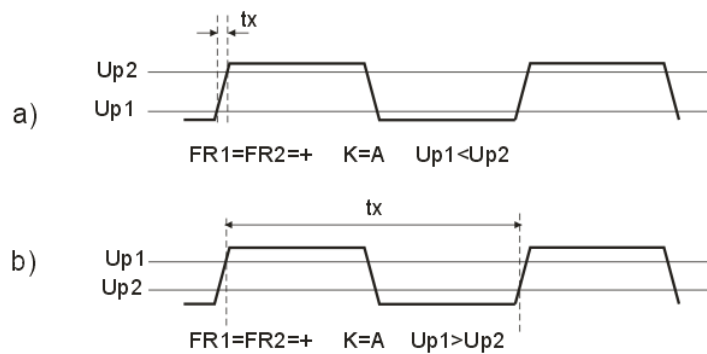
BLC cu intrări start-stop
Echivalent cu un *circuit bistabil*

$$N_x = \frac{\text{mare/mic}}{T_B} = T_{CPP}/T_B$$

Q. Cine e t_x ?

A. Posibilități multiple de alegere t_x

Măsurări posibile

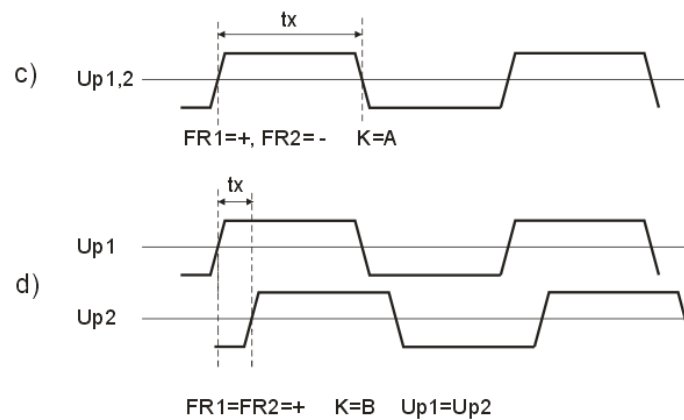


a) durata frontului unui semnal

$U_{P1/2} = 10\%$ și 90%

b) perioada unui semnal

Măsurări posibile (cont'd)

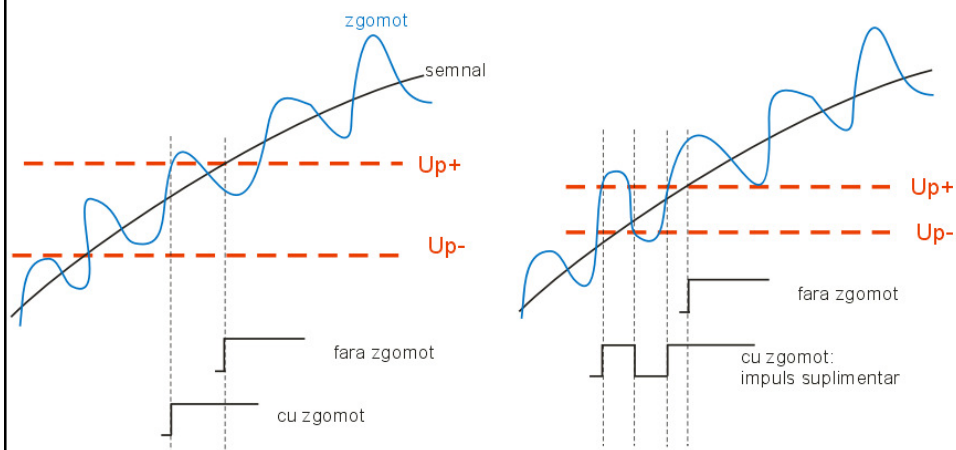


c) durata unui impuls

d) întârzierea $t_x = \Delta t$ dintre 2 semnale

OBS: defazajul $\varphi = \Delta t/T$ deci combinație b) cu d)

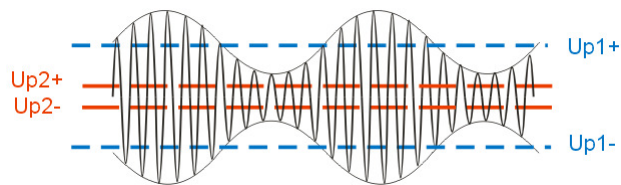
Efectul zgomotului



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

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

Efectul zgomotului (cont'd)



Ex2 : Situație în care pragurile trebuie să fie *aproprate*
(semnal modulat în amplitudine)

și aici există zgomot dar...

pragurile prea îndepărtate → indicație stabilă, dar eronată (cazul Up1)

Bibliografie obligatorie:

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

Bibliografie opțională:

http://ham.elcom.pub.ro/metc/files/an_200.pdf

(document de referință HP → Agilent → Keysight)