Ekvivalentna frekvenca vzorčenja f_s'

V **pomnilnik prikaza** spravimo Z_m podatkov (**globina pomnilnika** – tipično $Z_m \approx 500$).

- v **pomnilniku vertikalnega kanala** je lahko tudi **več točk** (10000, 1M, ...), kot jih potrebujemo za prikaz.

Širina zaslona $T(\text{zaslona}) = k_t x_m$ **vsebuje** Z_m **intervalov** dolgih: $T_s' = \dfrac{k_t x_m}{Z_m}$ - **ekvivalentni vzorčni čas**

- od tod dobimo **ekvivalentno frekvenco** vzorčenja:

$f_s' = \dfrac{Z_m}{k_t x_m}$ - **večja od maksimalne frekvence** vzorčenja ADP: $f_s' > f_{s,m}$

Primer: $Z_{\mathrm{m}} = 1000; \quad k_t = 50\,\mathrm{ns/d}; \quad x_{\mathrm{m}} = 10\,\mathrm{d}$

$f_{\mathrm{s,m}} = 10\,\mathrm{MHz}$

$$f_{\mathrm{s}}' = \frac{1000}{50\,\mathrm{ns/d}\;10\,\mathrm{d}} = 2\,\mathrm{GHz} \quad \Rightarrow \quad T_{\mathrm{s}}' = 500\,\mathrm{ps}$$

- vzorci se jemljejo vsakih $100\,\mathrm{ns}$,
- ko je vseh 1000 vzorcev zbranih, so prikazani v intervalih $500\,\mathrm{ps}$.

Resnična frekvenca vzorčenja je lahko tudi manjša $f_{\mathrm{s}}' < f_{\mathrm{s,m}}$ (vzorčenje v realnem času):

- pri $k_t = 100\,\mu\mathrm{s/d} \quad \Rightarrow \quad f_{\mathrm{s}} = \dfrac{1000}{100\,\mu\mathrm{s/d}\;10\,\mathrm{d}} = 1\,\mathrm{MHz}$

Dinamične lastnosti DSO

Za **analogni del** (atenuator, ojačevalnik,...) **do ADP** veljajo enake veličine kot za analogne osciloskope.

- **dvižni čas** T_r:
  - odziv na stopnico od 10 % do 90 %
- **mejna frekvenca** f_m: $T_\mathrm{r} = 0{,}35 / f_\mathrm{m}$
  - padec amplitudne karakt. za 3dB ali $1/\sqrt{2}$,
  - ker je spodnja mejna frekvenca 0 Hz (DC vhod) oziroma 10 Hz (AC vhod), je f_m enaka **pasovni širini**: $B = f_\mathrm{m}$

Vzorčenje pri DSO prinese dodatne omejitve, ker **med vzorci nimamo informacije** o signalu.

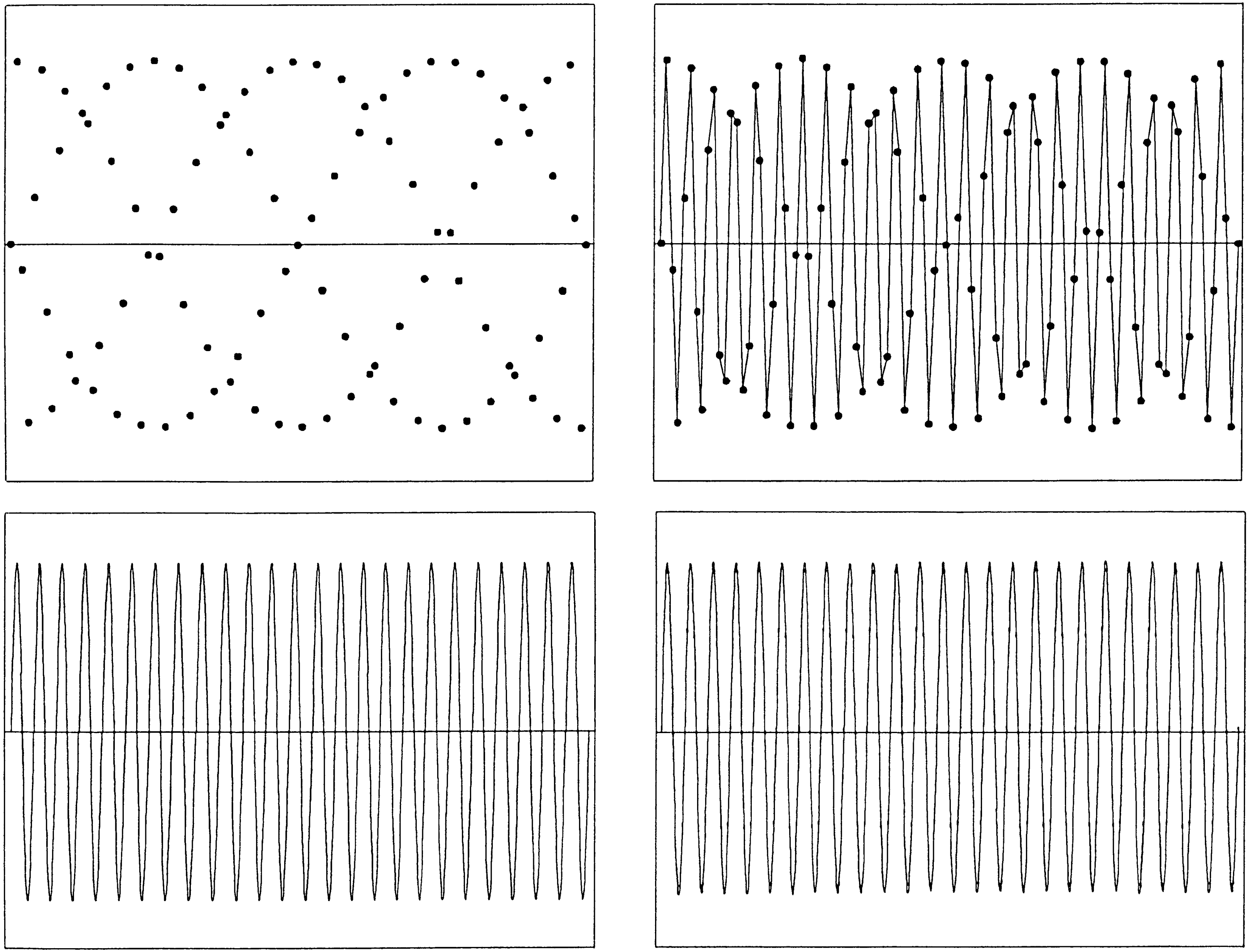
- **'Analogne' definicije** veljajo pri ponavljajočem proženju (vzorčenju **v ekvivalentnem času**).
- Pri **vzorčenju v realnem času** pa so odvisne od **načina prikaza** (točkovna podaja, linearna interpolacija, si-interpolacija, ...),

Uporabna pasovna širina:

- **točkovna podaja**: $B_{\mathrm{pt}} = \dfrac{f_{\mathrm{s}}}{25}$
  - 25 točk na periodo

- **linearna interpolacija**: $B_{\mathrm{lin}} = \dfrac{f_{\mathrm{s}}}{10}$
  - povezava točk z daljicami

- **si-interpolacija**: $B_{\mathrm{si}} = \dfrac{f_{\mathrm{s}}}{2{,}5}$
  - $\mathrm{si}(x) = \sin x / x$



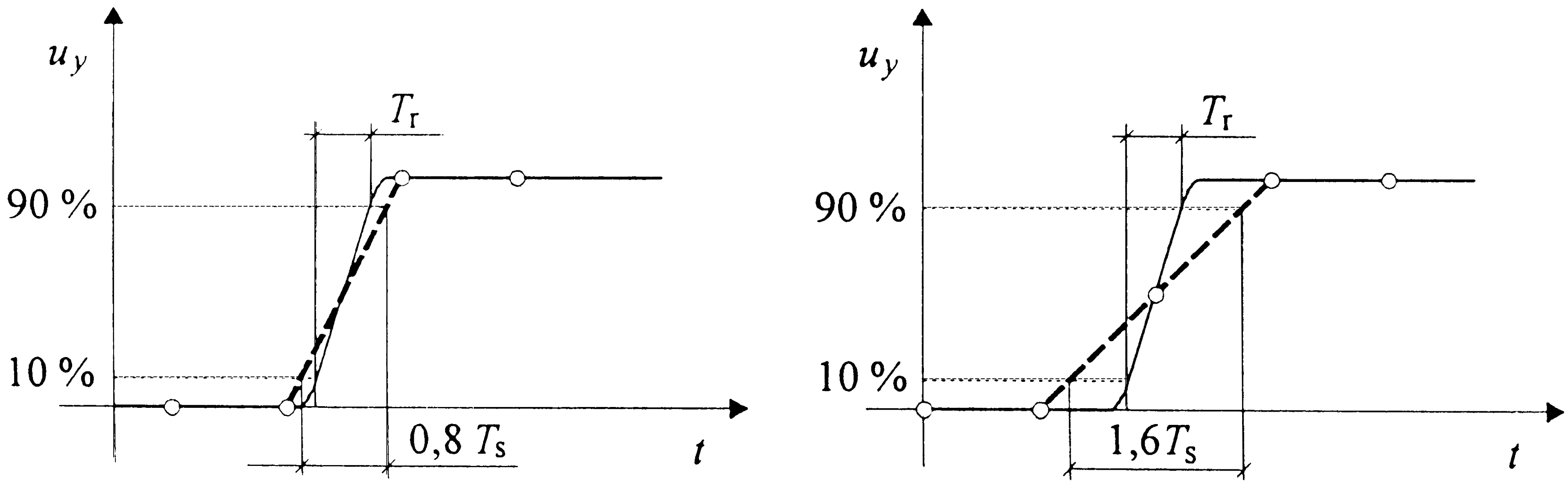
Uporabni dvižni čas:

- če je **dvižni čas signala krajši kot vzorčni** čas T_s, se spreminja med:

$$T_r = 0{,}8\,T_s \quad \text{in} \quad T_{r,\max} = 1{,}6\,T_s$$

$T_r = 1{,}6\,T_s$ **- uporabni dvižni čas**

- velja za točkovno podajo in linearno interpolacijo



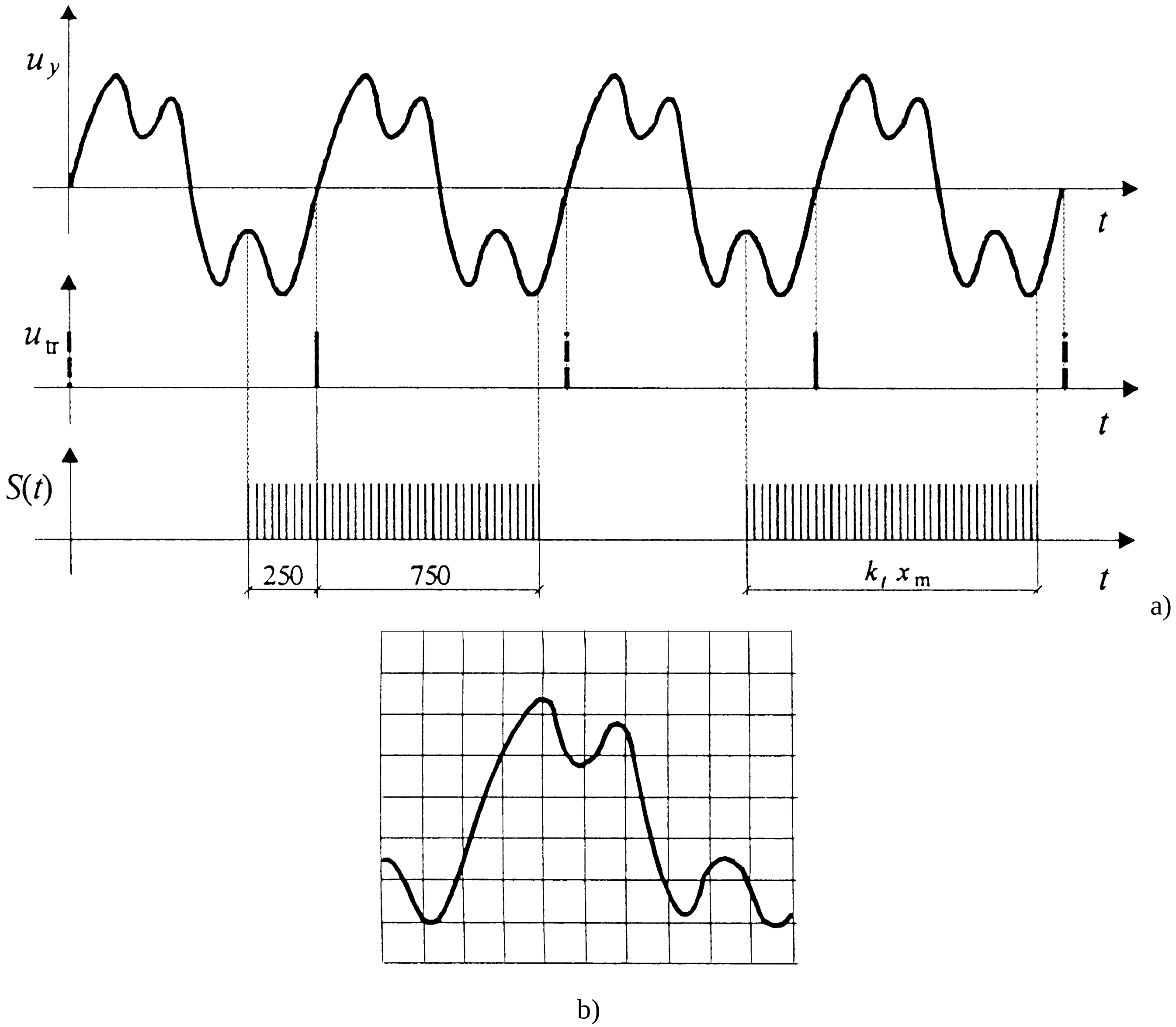
Slika 5.53 Dvižni čas DSO z linearno interpolacijo

Poznamo dva načina **prikazovanja podatkov**:

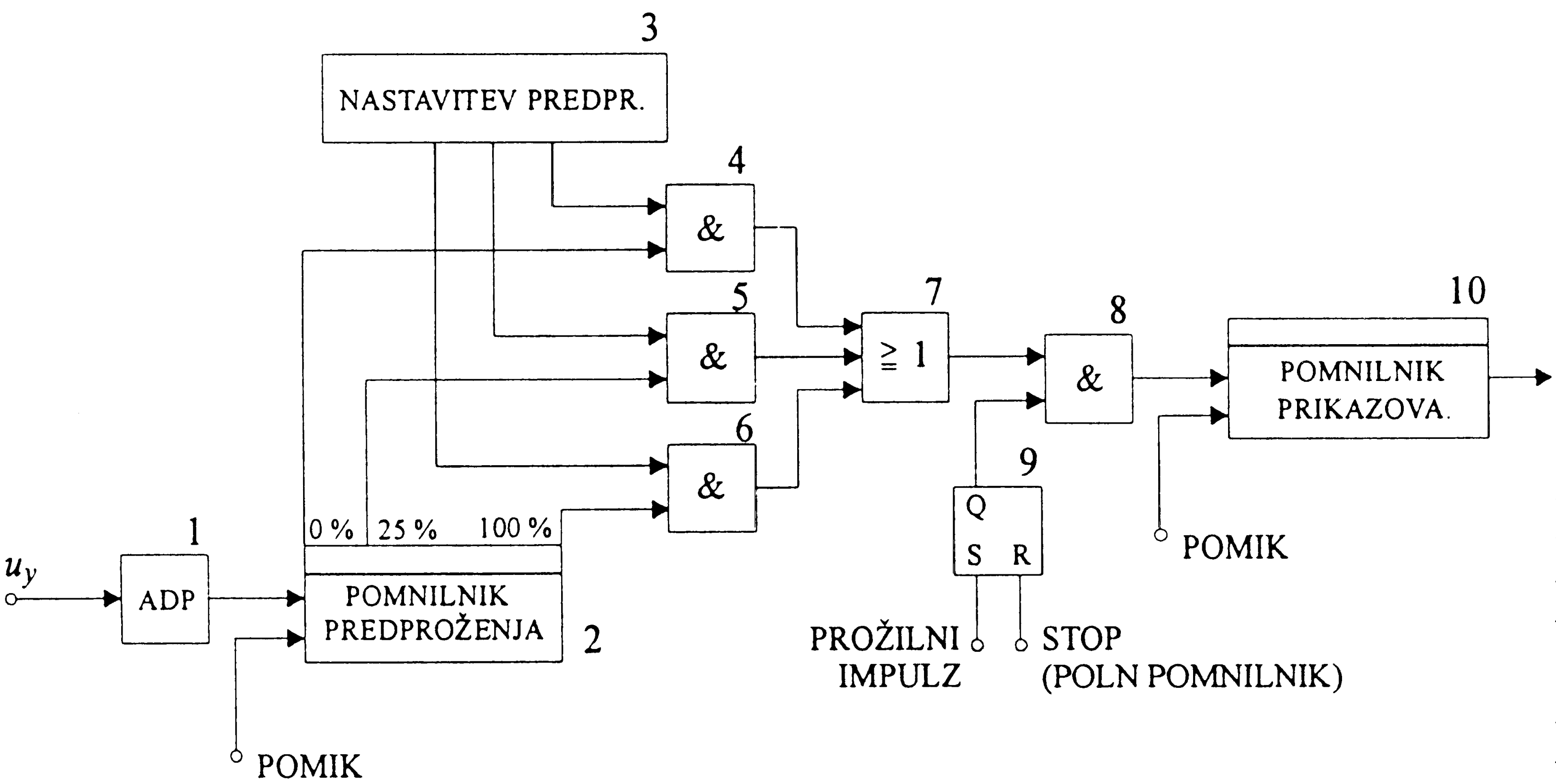
- normalno s proženjem,
    - **posodabljanje slike** ob novih prožilnih dogodkih (**refresh-mode**),
- **počasni signali** brez proženja,
    - podobno odvijanju svitka (**roll-mode**)
        - **najnovejši podatek** se nahaja na začetku pomičnega registra (**skrajno desno na zaslonu**),
        - naslednji podatki povzročijo pomik podatkov v registru za eno mesto,
        - **najstarejši podatek iz levega roba** zaslona izpade iz registra (FIFO – register)
- **primer**: $k_t = 500\,\mathrm{ms}/\mathrm{d}; \quad x_\mathrm{m} = 10\,\mathrm{d}$
    - podatek je na zaslonu prisoten 5s

DSO za razliko od analognega osciloskopa omogoča **opazovanje signala** tudi **pred prožilnim dogodkom**.

- potrebno je **vzorčenje že pred prožilnim impulzom**,
- v **predprožilnem pomnilniku** se neodvisno od prikaza začnejo shranjevati vrednosti,
- na zaslonu pa se te vrednosti prikazujejo glede na položaj prožilnega dogodka.

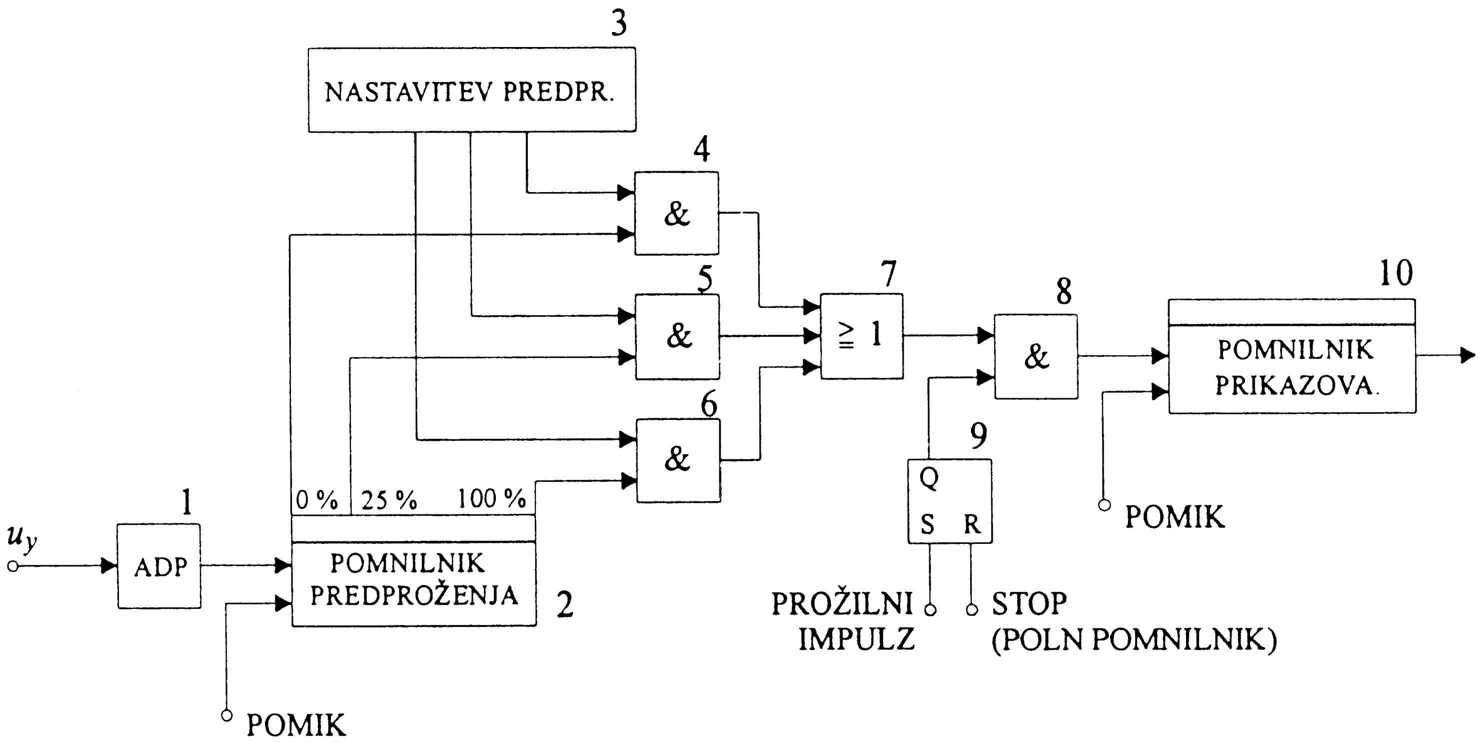


Slika 5.55 Zbiranje vzorcev s predproženjem in slika na zaslonu DSO



Slika 5.54
DSO s prikazovanjem dogodkov pred prožilnim impulzom

- v pomnilnik predproženja (2) pritekajo podatki s frekvenco vzorčenja ADP,
    - ob sinhronizacijskih impulzih (POMIK) **se pomikajo za eno mesto**,



- **pomnilnik prikaza** (10) se napolni ($Z_m = 1000$ točk):
  - z določenim številom vrednosti **pred pojavom prožilnega impulza** iz pomnilnika predproženja (2),
    - npr.: 250 skozi vrata 5
  - in s preostalim številom novih točk z ADP (npr. 750)

Vzorčenje se lahko tudi **zamrzne** (ni prožilnih impulzov) pa se **slika obnavlja** s podatki **pomnilnika prikazovanja**.

5.3 Univerzalni elektronski števec

Omogoča zelo točno merjenje:

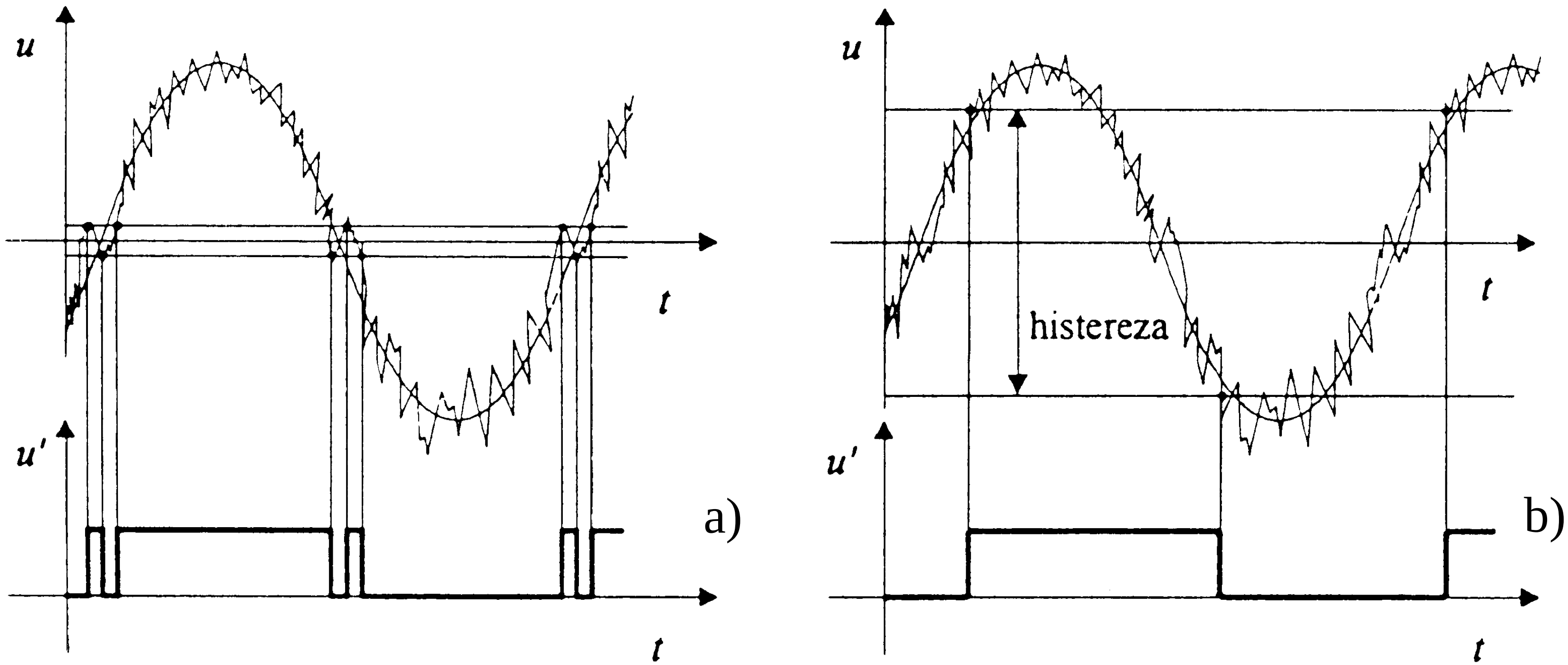
- frekvence,
- periode,
- časovnih intervalov,
- razmerja frekvenc,
- štetje dogodkov itn.

Ločimo dva **merilna principa**:

- štetje impulzov (counter),
- merjenje časa (timer).

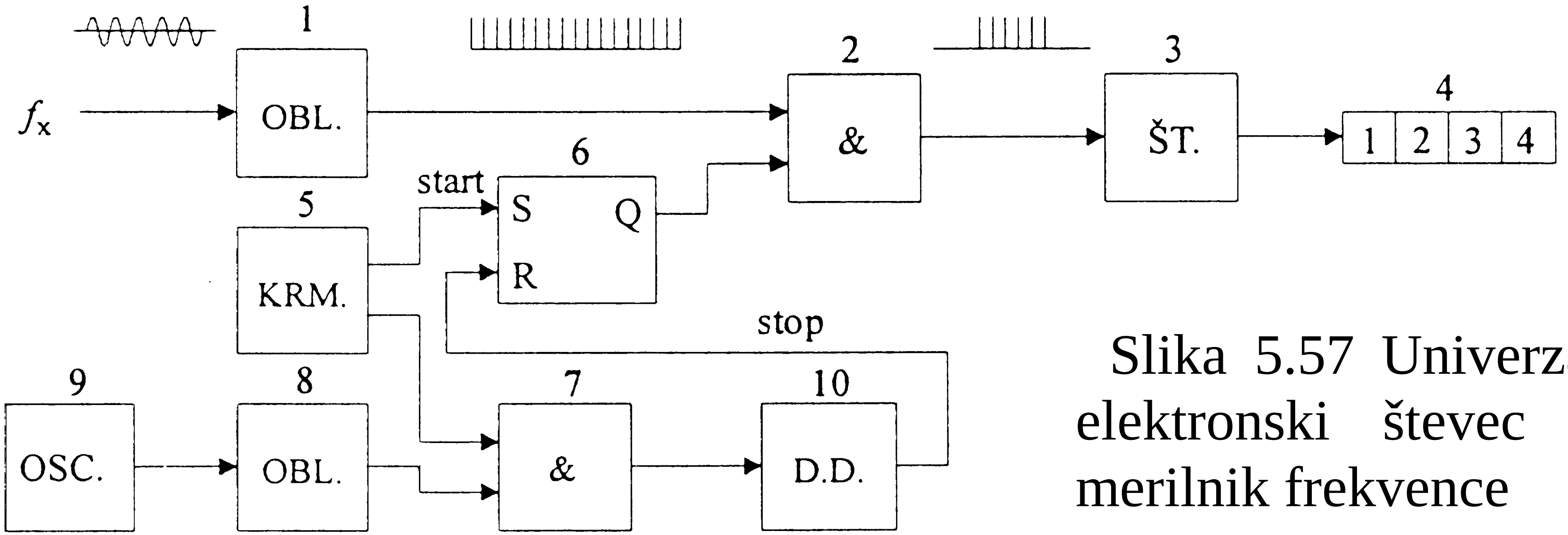
Vhodna stopnja preoblikuje merjeni signal v impulze za nadaljno obdelavo.

- Schmittov prožilnik (**prožilnik s histerezo**) zmanjša vpliv dodanega šuma signalu.
  - z večjo histerezo se onemogoči šumno preklaplanje



Slika 5.56 Vpliv histereze prožilnika na izločanje šuma

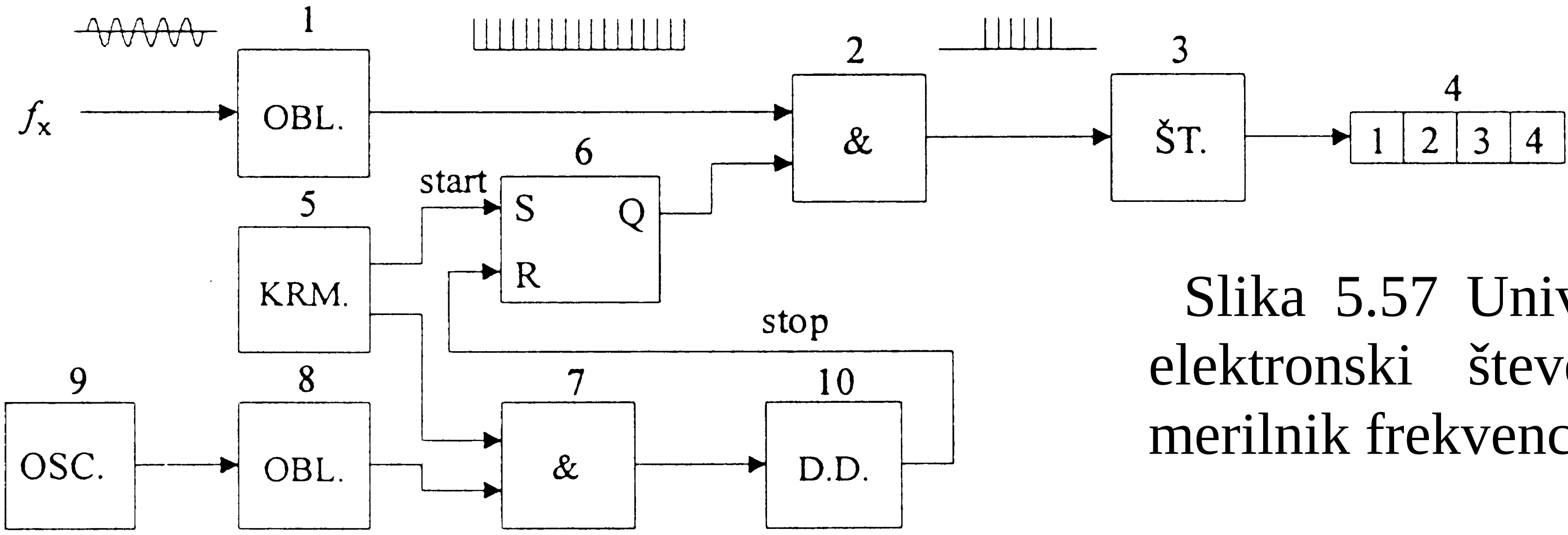
Merjenje frekvence



Slika 5.57 Univerzalni elektronski števec kot merilnik frekvence

Osnovni elementi števca:

- kvarčni **oscilator** (9), ki proizvaja frekvenčno stabilen impulzni signal (**referenčni signal**),
- skupaj z dekadnim delilnikom (7 in 10) sestavlja **časovno bazo**,
- **elektronska vrata** (2), ki se odpirajo v taktu časovne baze,
- **števec** električnih impulzov (3).



Slika 5.57 Univerzalni elektronski števec kot merilnik frekvence

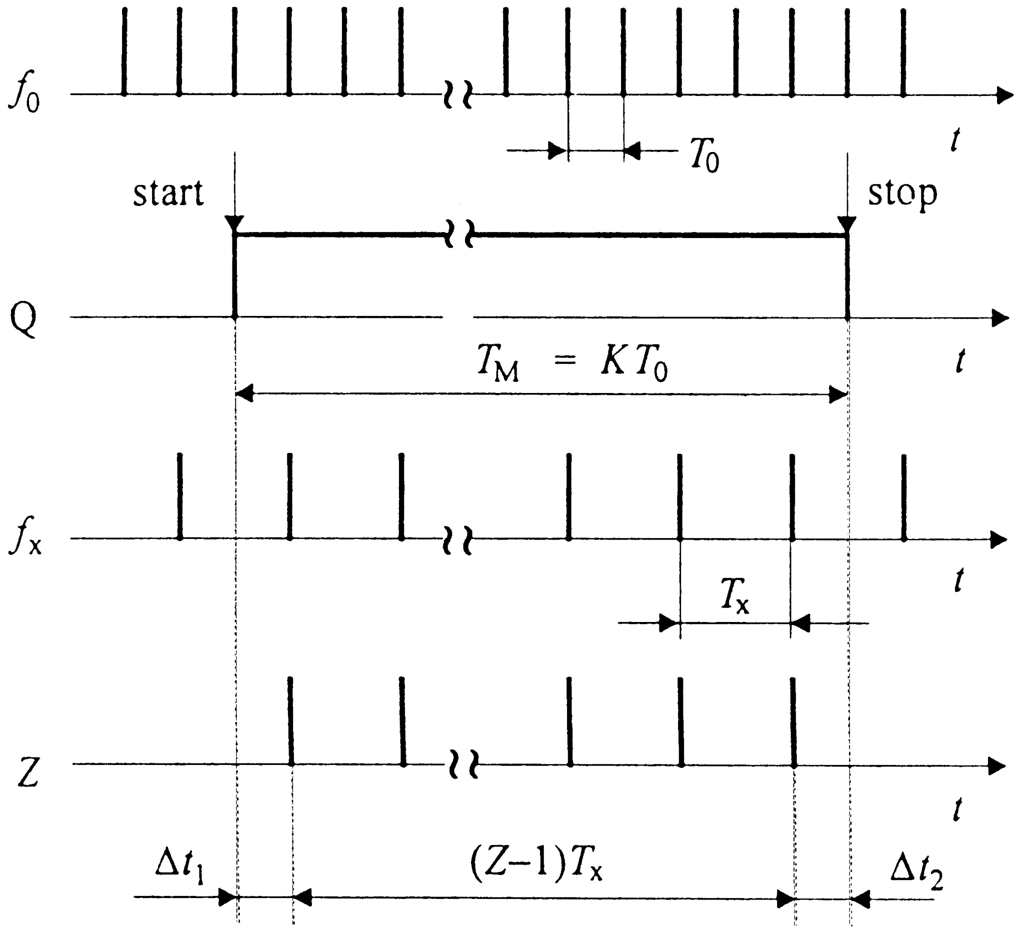
Čas odprtja vrat (2) določa delilno razmerje dekadnega delilnika *K* (10),

- $K = 10^n \;;\quad n = 0, 1, 2, 3, \ldots$
- **po *K*-tem impulzu** se stanje na izhodu delilnika spremeni in RS-multivibrator (6) se resetira – **meritev se ustavi**.
- **čas merjenja** je enak: $T_M = KT_0$
    - T_0 perioda oscilatorja $1/f_0$

V tem času $T_{\mathrm{M}} = KT_0$ **števec našteje** povprečno:

$$\overline{Z} = f_{\mathrm{x}} T_{\mathrm{M}} = f_{\mathrm{x}} K T_0 \text{ impulzov neznane frekvence}$$

- **primer**: $f_0 = 10\,\mathrm{MHz} \quad \rightarrow \quad T_0 = 100\,\mathrm{ns};$
  $K = 10^7; \quad f_x = 123{,}4\,\mathrm{Hz}$
  - čas merjenja: $T_{\mathrm{M}} = KT_0 = \dfrac{K}{f_0} = \dfrac{10^7}{10\,\mathrm{MHz}} = 1\,\mathrm{s}$
  - števec našteje: $\overline{Z} = f_{\mathrm{x}} T_{\mathrm{M}} = 123{,}4\,\mathrm{Hz} \cdot 1\,\mathrm{s} = 123{,}4$
    - ker prešteje vedno celo število impulzov, število niha med 123 in 124!



Ker **meritev** (T_M) **ni sinhrona z merjenim signalom**, imamo pogrešek ločljivosti enega impulza - **kvantizacijski pogrešek !**

Slika 5.58 Kvantizacijski pogrešek pri merjenju frekvence

- za čas T_M velja: $T_M = \Delta t_1 + (Z-1)T_x + \Delta t_2$
  - časa **nesinhronizacije** sta: $0 \leq \Delta t_1 \leq T_x; \quad 0 \leq \Delta t_2 \leq T_x$

Časa **nesinhronizacije**: $0 \le \Delta t_1 \le T_\mathrm{x}; \quad 0 \le \Delta t_2 \le T_\mathrm{x}$

- če sta oba **na spodnji meji** $\Delta t_1 = \Delta t_2 = 0$, velja:

$$T_\mathrm{M} = (Z-1)T_\mathrm{x}^{'} \quad \Rightarrow \quad Z = f_\mathrm{x}^{'} T_\mathrm{M} + 1$$

- če sta oba **na zgornji meji** $\Delta t_1 = \Delta t_2 = T_\mathrm{x}^{''}$, velja:

$$T_\mathrm{M} = (Z+1)T_\mathrm{x}^{''} \quad \Rightarrow \quad Z = f_\mathrm{x}^{''} T_\mathrm{M} - 1$$

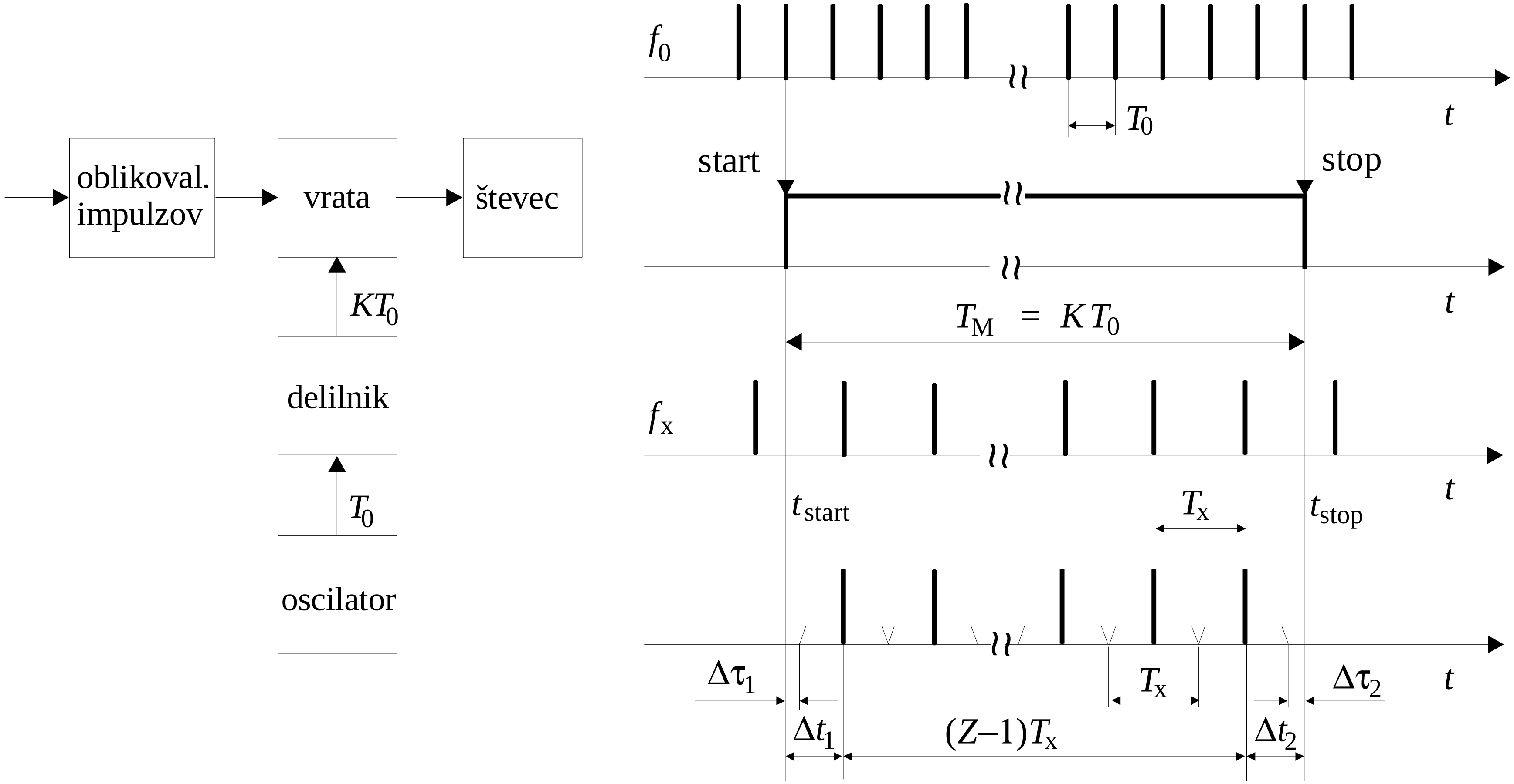
Največji **mejni pogrešek** je ± 1 **impulz**!

Največji **mejni pogrešek** je ± 1 **impulz**!

- izrazimo ga v enoti merjene veličine: $$f_{\mathrm{x}} = \frac{Z}{T_{\mathrm{M}}} \pm \frac{1}{T_{\mathrm{M}}}$$
- absolutni **mejni kvantizacijski pogrešek**: $$E_f = \pm \frac{1}{T_{\mathrm{M}}} = \pm \frac{1}{KT_0}$$
- in v **relativni obliki**: $$e_f = \frac{E_f}{f_{\mathrm{x}}} = \pm \frac{1}{f_{\mathrm{x}} T_{\mathrm{M}}} = \pm \frac{1}{Z}$$
  - z manjšanjem frekvence se poveča,
- primer: $f_0 = 10\,\mathrm{MHz}$; $K = 10^8$; $f_x = 10\,\mathrm{Hz}$

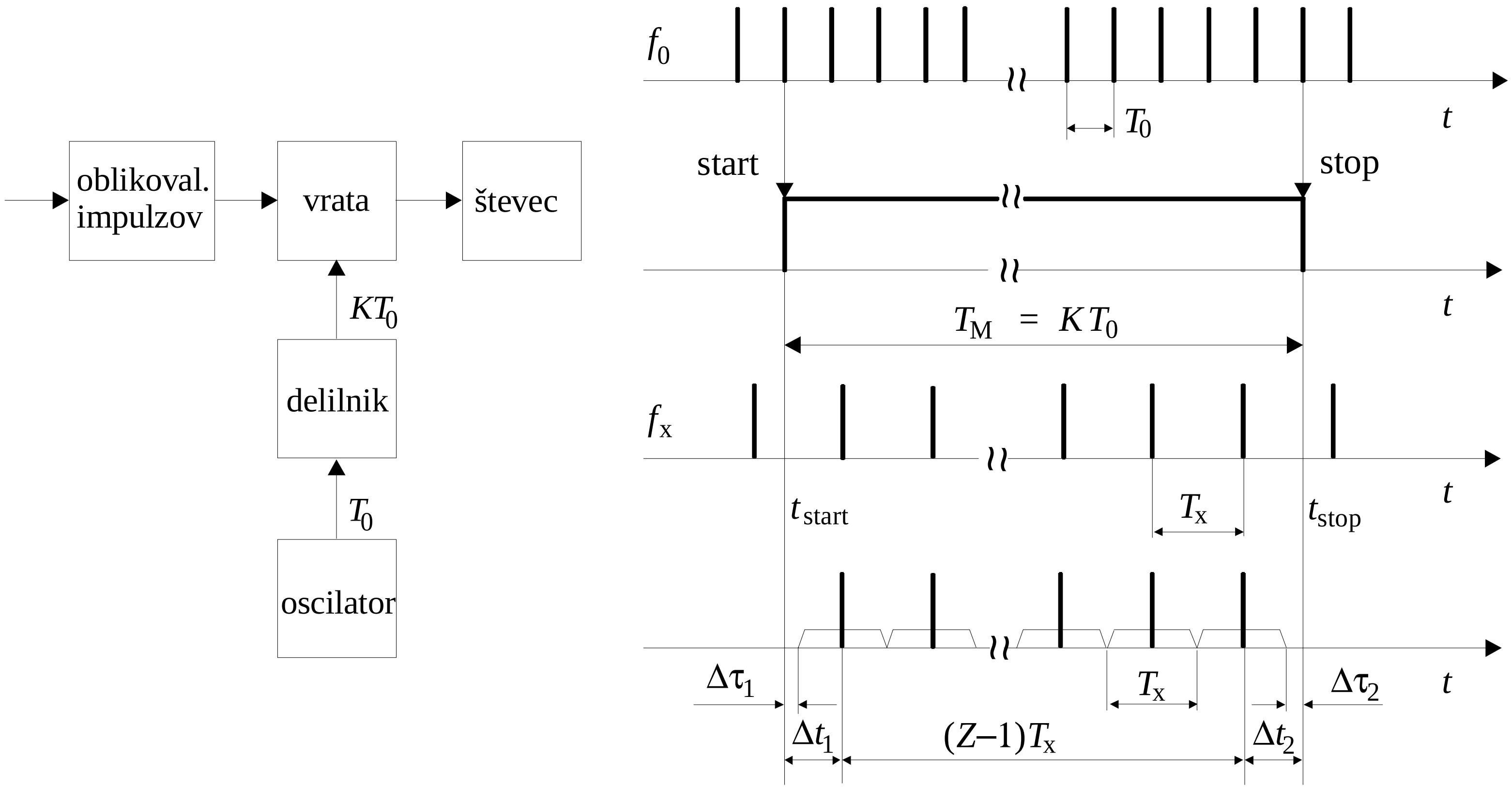
$$e_f = \pm \frac{1}{f_{\mathrm{x}} T_{\mathrm{M}}} = \pm \frac{1}{f_{\mathrm{x}} K T_0} = \pm \frac{10\,\mathrm{MHz}}{10\,\mathrm{Hz} \cdot 10^8} = \pm 10^{-2} = \pm 1\%$$

Merjenje frekvence f_x - negotovost



Čas merjenja zapišemo:

$$T_M = (Z-1)\,T_x + \Delta t_1 + \Delta t_2 \qquad 0 \le \Delta t_1 \le T_x \quad \text{in} \quad 0 \le \Delta t_2 \le T_x$$



Zapišemo ga lahko tudi takole:

$$T_M = Z\,T_x + \Delta\tau_1 + \Delta\tau_2$$

- kjer velja:

$$-T_x/2 \le \Delta\tau_1 \le +T_x/2 \quad \text{in} \quad -T_x/2 \le \Delta\tau_2 \le +T_x/2.$$

Ločljivost instrumenta **pri merjenju frekvence** Q_f je **odvisna od časa merjenja**.

- **izhodna veličina** je število impulzov **Z**,
- **vhodna veličina** merjena **frekvenca** f_x, zato je **občutljivost**:

$$Z = f_x T_M \quad \Rightarrow \quad S = \frac{dZ}{df_x} = T_M$$

- iz tega sledi, da **enemu impulzu ustreza frekvenca**:

$$(\Delta f)_q = Q_f = \frac{(\Delta Z)_q}{S} = \frac{1}{T_M}.$$

Števec prešteje Z impulzov, vsakemu impulzu pripada kvant Q_f

Izmerjena frekvenca:

$$f_\mathrm{i} = Z \cdot Q_f = \frac{Z}{T_\mathrm{M}}.$$

Neznana frekvenca je:

$$f_\mathrm{x} = \frac{1}{T_\mathrm{x}} = \frac{Z}{T_\mathrm{M} - \Delta\tau_1 - \Delta\tau_2} = f_\mathrm{i} \frac{1}{1 - (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2)/T_\mathrm{M}}$$

Relativni kvantizacijski pogrešek pri merjenju frekvence

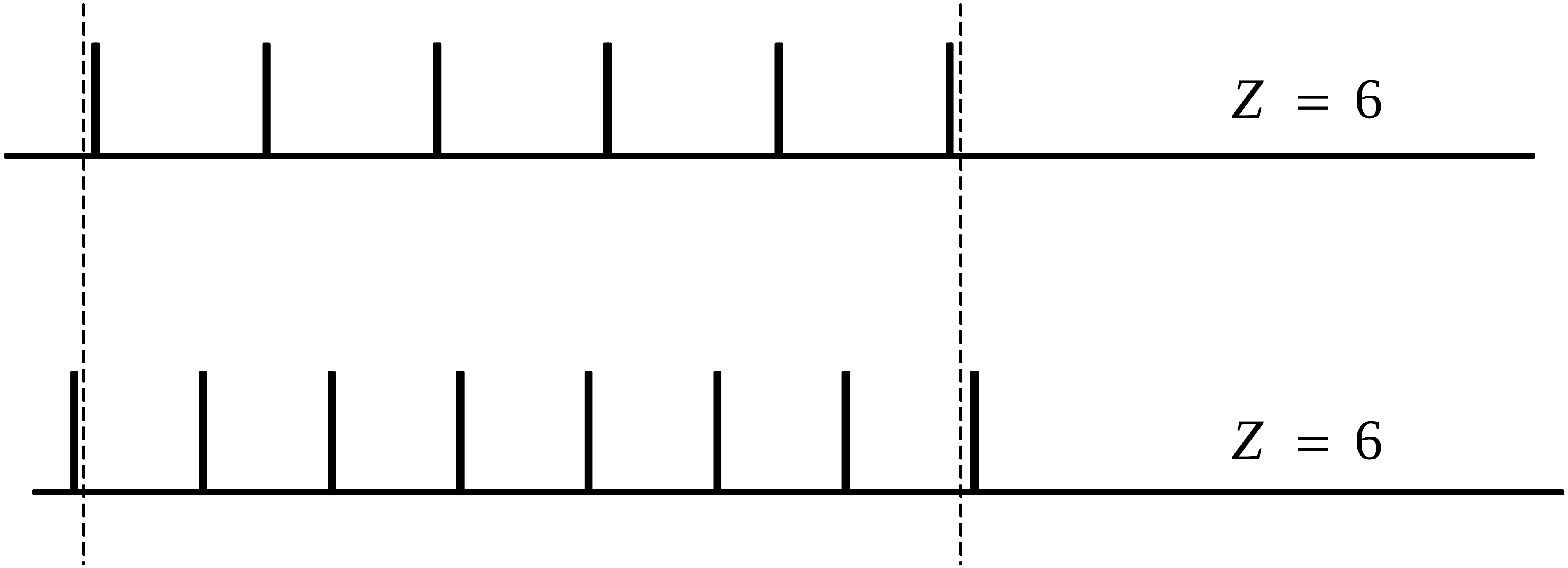
$$e_f = \frac{f_\mathrm{i} - f_\mathrm{x}}{f_\mathrm{x}} = \frac{f_\mathrm{i}}{f_\mathrm{x}} - 1 = -\frac{\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2}{T_\mathrm{M}}$$

- če upoštevamo **mejni vrednosti** za $\Delta\tau_1$ in $\Delta\tau_2$:

$$m_f = \pm\frac{T_\mathrm{x}}{T_\mathrm{M}} = \pm\frac{1}{T_\mathrm{M} f_\mathrm{x}} = \pm\frac{1}{K T_0 f_\mathrm{x}} = \pm\frac{1}{Z}$$

- **absolutna meja** pogreška pa je:

$$M_f = m_f f_x = \pm\frac{1}{T_M} = \pm\frac{1}{KT_0} = \pm Q_f .$$



Univerzalni digitalni števec:

- čas merjenja lahko **izberemo**:

$$T_M = 10\ \mathrm{s},\quad 1\ \mathrm{s},\quad 0{,}1\ \mathrm{s},\quad 0{,}01\mathrm{s},\ldots,$$

Mejni pogrešek pri merjenju odvisen tudi od uporabnika.

Standardna negotovost pri merjenju frekvence je predvsem **odvisna od pogreška zaradi neusklajenosti in neujemanja**,

$$f_\mathrm{x} = \frac{Z}{T_\mathrm{M} - \Delta\tau_1 - \Delta\tau_2} \quad \Rightarrow \quad u_1(f) = \left|\frac{\partial f_\mathrm{x}}{\partial \Delta\tau_1}\right| u(\Delta\tau_1) \approx \frac{Z}{T_\mathrm{M}^2}\frac{T_\mathrm{x}/2}{\sqrt{3}} = \frac{Q_f}{2\sqrt{3}},$$

$$u_2(f) = \left|\frac{\partial f_\mathrm{x}}{\partial \Delta\tau_2}\right| u(\Delta\tau_2) \approx \frac{Z}{T_\mathrm{M}^2}\frac{T_\mathrm{x}}{2\sqrt{3}} = \frac{Q_f}{2\sqrt{3}},$$

Standardna negotovost:

$$u(f) = \sqrt{u_1^2(f) + u_2^2(f)} = \frac{1}{T_\mathrm{M}}\frac{1}{\sqrt{6}} = \frac{Q_f}{\sqrt{6}} = \frac{M_f}{\sqrt{6}}$$

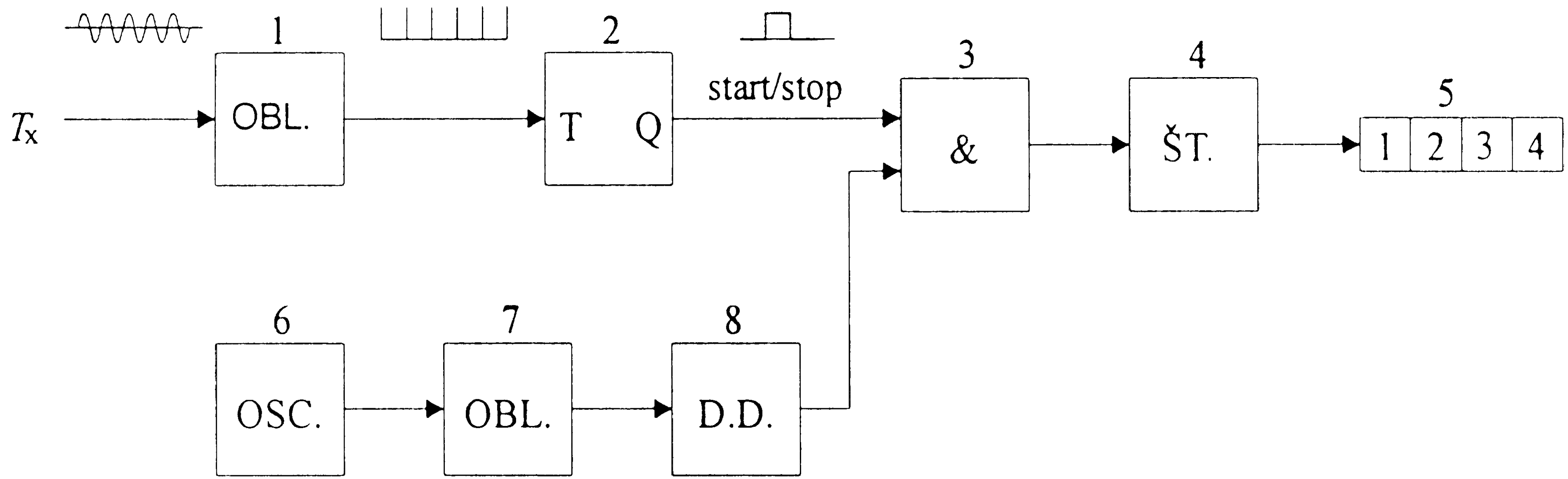
- mejna vrednost je $M_f = Q_f$,
- **porazdelitev pa trikotna**.

Merjenje časa

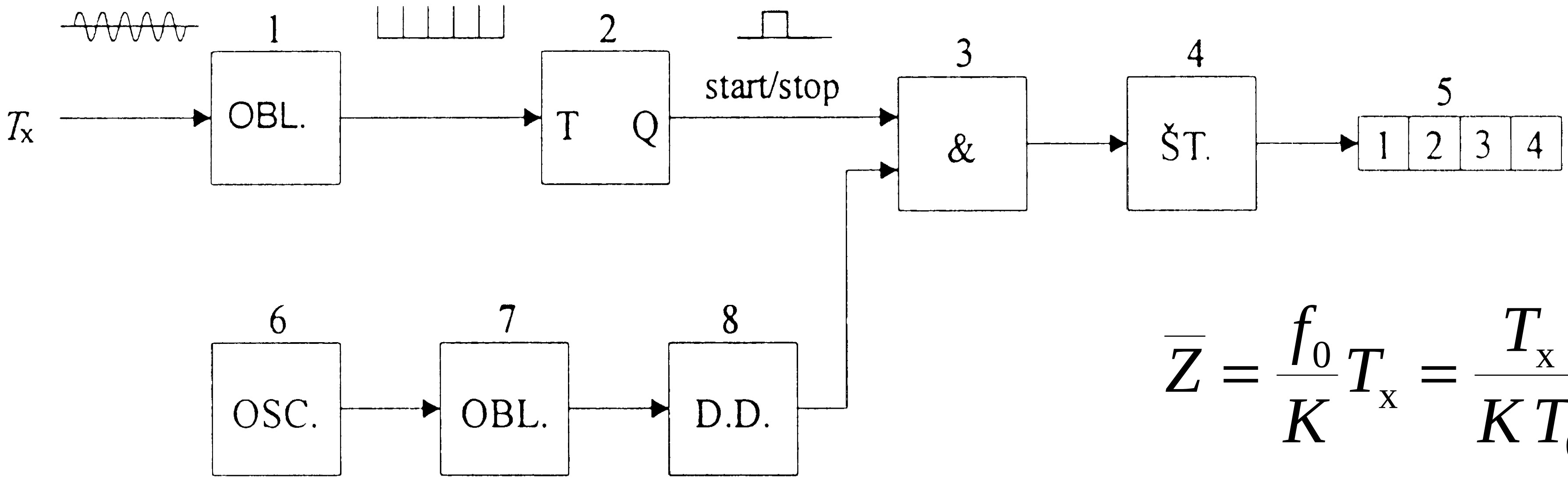
Poznamo:

- merjenje **periode**,
- merjenje **časovnega intervala**.

Merjenje periode:

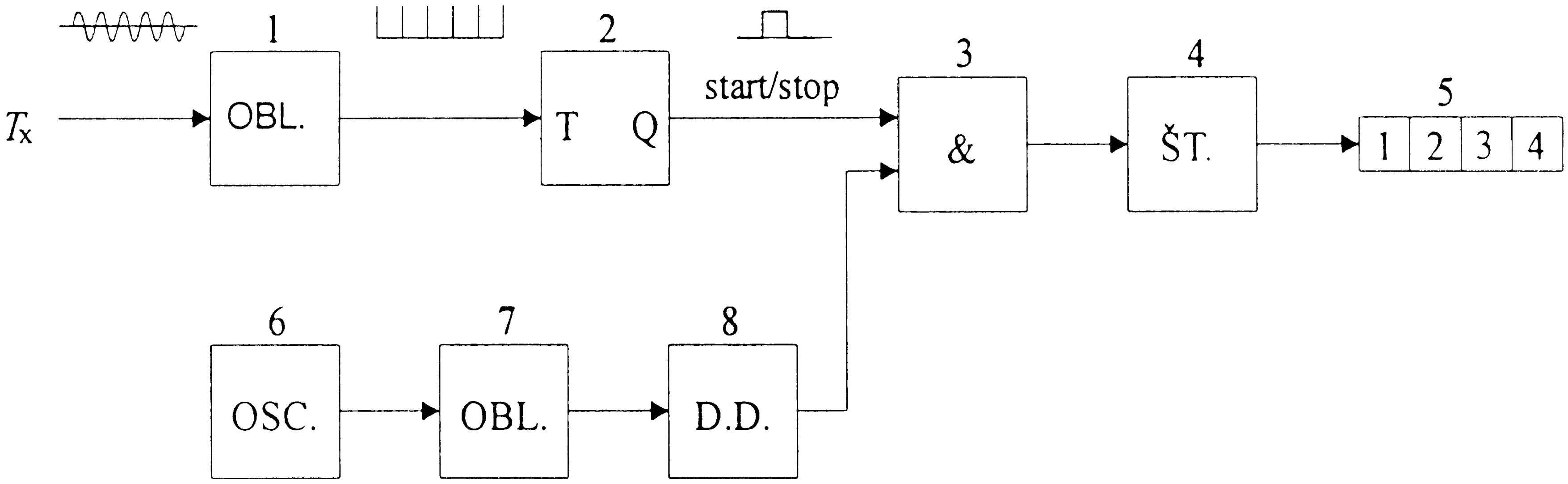


Slika 5.59 Univerzalni elektronski števec kot merilnik periode



$$\overline{Z} = \frac{f_0}{K} T_x = \frac{T_x}{K\,T_0}$$

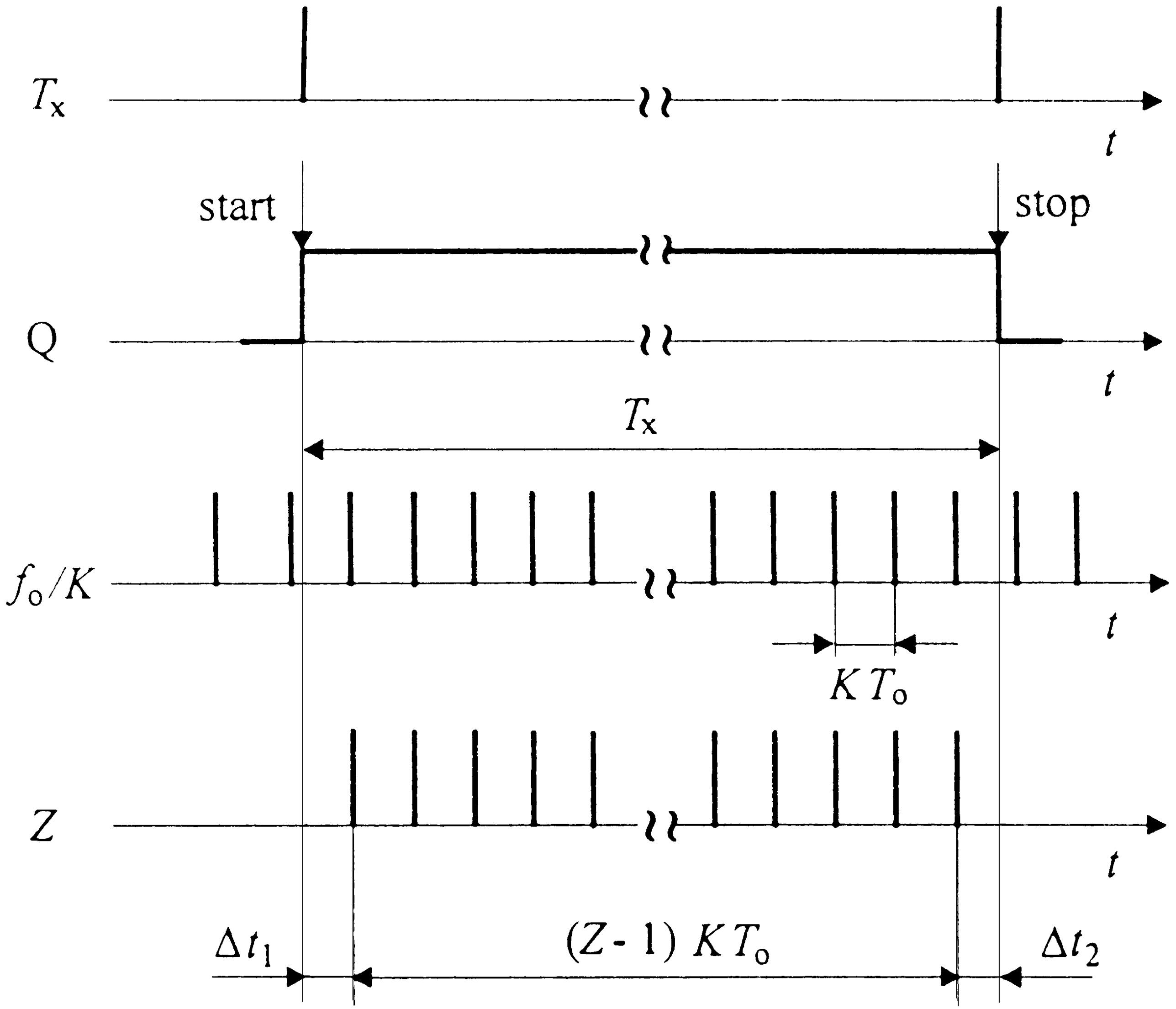
- elektronska **vrata krmili merjeni signal**:
  - bistabilni T-multivibrator se preklopi ob vsakem drugem impulzu,
    - vrata so odprta **eno periodo**: $T_M = T_x$
- v tem času **šteje števec** impulze **referenčne** frekvence,
  - frekvenco lahko zmanjšamo z delilnikom K



- primer: $f_0 = 10\,\text{MHz}; \quad K = 100; \quad T_x = 5{,}678\,\text{ms}$
  - števec našteje v povprečju:

$$\overline{Z} = \frac{f_0}{K} T_{\mathrm{x}} = \frac{10\,\text{MHz}}{100} 5{,}678\,\text{ms} = 567{,}8$$

Števec lahko kaže **en impulz premalo ali preveč**:



Slika 5.51 Kvantizacijski pogrešek pri merjenju periode

Celotni čas je enak:

$$T_{\mathrm{x}} = T_{\mathrm{M}} = \Delta t_1 + (Z-1)KT_0 + \Delta t_2$$

- časa **nesinhronizacije** sta:

$$0 \le \Delta t_1 \le KT_0 \ ; \qquad 0 \le \Delta t_2 \le KT_0$$

- če sta oba **na spodnji meji** $\Delta t_1 = \Delta t_2 = 0$, velja:

$$T_{\mathrm{x}}^{'} = (Z-1)KT_0 \quad \Rightarrow \quad Z = T_{\mathrm{x}}^{'} \big/ KT_0 + 1$$

- če sta oba **na zgornji meji** $\Delta t_1 = \Delta t_2 = KT_0$, velja:

$$T_{\mathrm{x}}^{''} = (Z+1)KT_0 \quad \Rightarrow \quad Z = T_{\mathrm{x}}^{''} \big/ KT_0 - 1$$

Največji **mejni pogrešek** je ± 1 **impulz**.

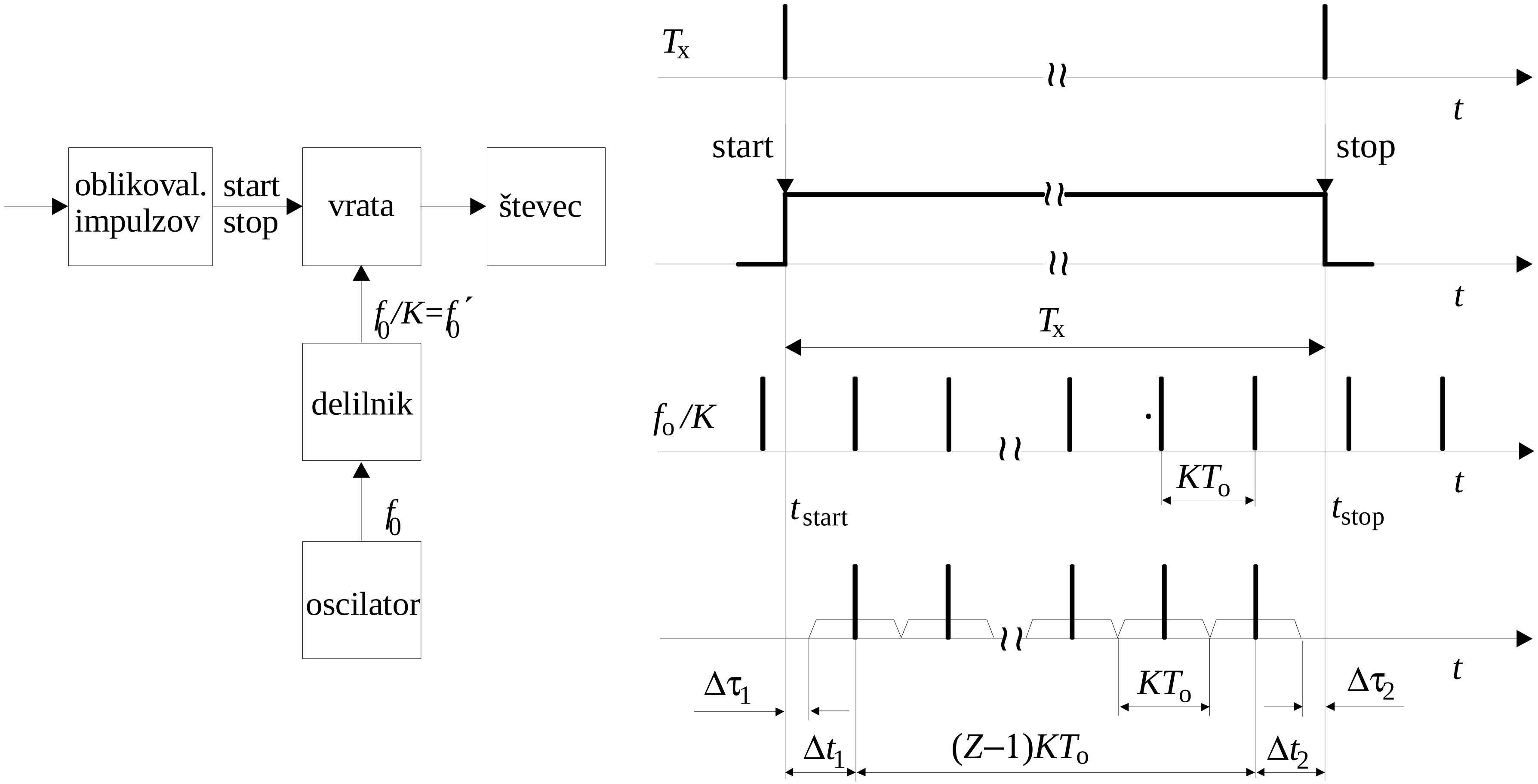
Največji **mejni pogrešek** je ± 1 **impulz**.

- Izražen **v enoti merjene veličine**: $T_{\mathrm{x}} = ZKT_0 \pm KT_0$
- absolutni **mejni kvantizacijski pogrešek**: $E_T = \pm KT_0$
- in v **relativni obliki**: $e_T = \frac{E_T}{T_{\mathrm{x}}} = \pm \frac{KT_0}{T_{\mathrm{x}}} = \pm \frac{1}{Z}$
  - daljša je perioda, manjši je pogrešek!

- primer: $f_0 = 10\,\mathrm{MHz}$; $K = 1$; $f_x = 10\,\mathrm{Hz} \Rightarrow T_x = 100\,\mathrm{ms}$

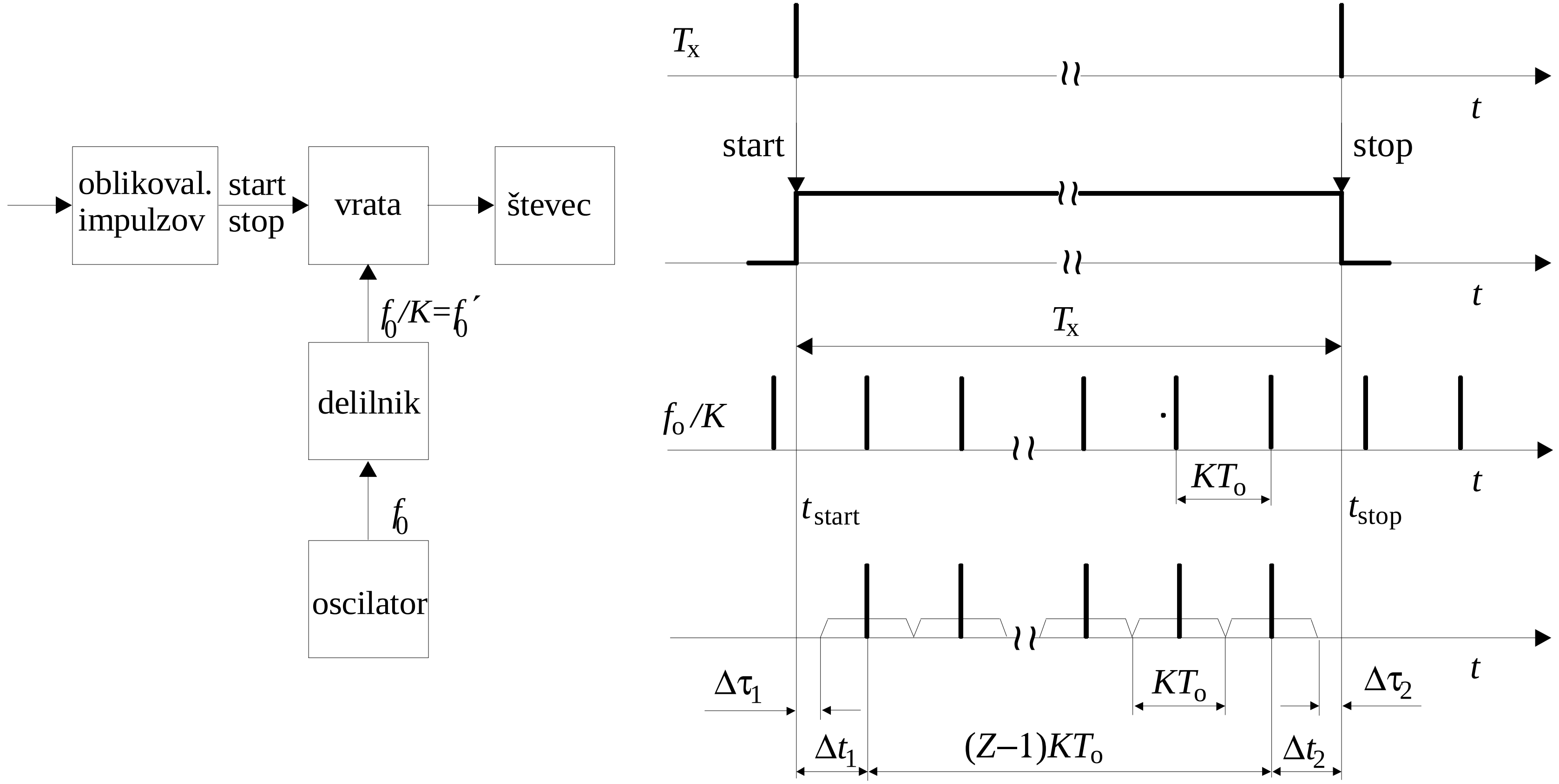
$$e_T = \pm \frac{KT_0}{T_{\mathrm{x}}} = \pm \frac{1 \cdot 100\,\mathrm{ns}}{100\,\mathrm{ms}} = \pm 10^{-6} = \pm 10^{-4}\,\%$$

Merjenje periode T_x - negotovost



Za neznano periodo zapišemo:

$$T_x = (Z-1)\,KT_0 + \Delta t_1 + \Delta t_2 \quad 0 \le \Delta t_1 \le KT_0 \quad \text{in} \quad 0 \le \Delta t_0 \le KT_0$$



Podobno, kot pri merjenju frekvence lahko zapišemo:

$$T_x = Z\ KT_0 + \Delta\tau_1 + \Delta\tau_2$$

$$-KT_0/2 \leq \Delta\tau_1 \leq +K\,T_0/2, \quad -KT_0/2 \leq \Delta\tau_2 \leq +K\,T_0/2$$

Ločljivost instrumenta **pri merjenju periode** Q_T je **odvisna od časa** $\boldsymbol{KT_0}$.

- **izhodna veličina** je število impulzov $\boldsymbol{Z}$,
- **vhodna veličina** merjena **perioda** $\boldsymbol{T_x}$, zato je **občutljivost**:

$$Z = \frac{f_0}{K} T_x \qquad \Rightarrow \qquad S = \frac{\mathrm{d}Z}{\mathrm{d}T_x} = \frac{f_0}{K}$$

- **enemu impulzu ustreza čas**:

$$(\Delta T)_\mathrm{q} = Q_T = \frac{(\Delta Z)_\mathrm{q}}{S} = \frac{K}{f_0} = KT_0$$

Števec prešteje Z impulzov in vsakemu impulzu pripada kvant Q_T **- izmerjena perioda:**

$$T_\mathrm{i} = Z \cdot Q_T = ZKT_0$$

Absolutni kvantizacijski pogrešek **pri merjenju periode**

$$E_T = T_\mathrm{i} - T_\mathrm{x} = ZKT_0 - \left(Z\ KT_0 + \Delta\tau_1 + \Delta\tau_2\right) = -\left(\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2\right)$$

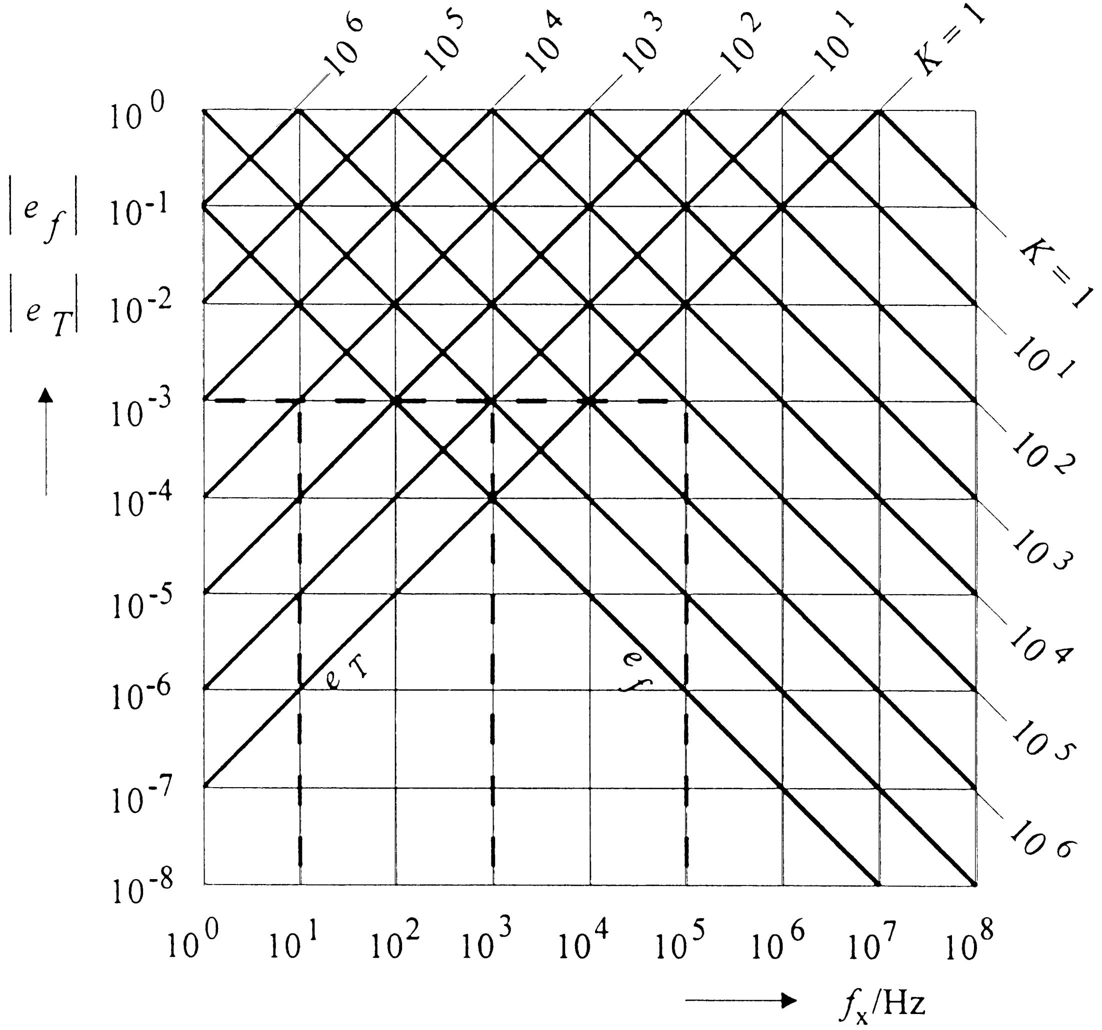
- če upoštevamo obe **mejni vrednosti**:

$$M_T = \pm KT_0 = \pm Q_T,$$

Relativna meja pogreška: $m_T = \dfrac{M_T}{T_\mathrm{x}} = \pm\dfrac{KT_0}{T_\mathrm{x}} = \pm KT_0 f_\mathrm{x}.$

Standardna negotovost: $u(T) = \sqrt{u_1^2(T) + u_2^2(T)} = \dfrac{Q_T}{\sqrt{6}} = \dfrac{M_T}{\sqrt{6}}.$

Mejna pogreška kvantizacije v odvisnosti od **frekvence**:



$$e_f = \pm \frac{1}{KT_0 f_x}$$

$$e_T = \pm KT_0 f_x$$

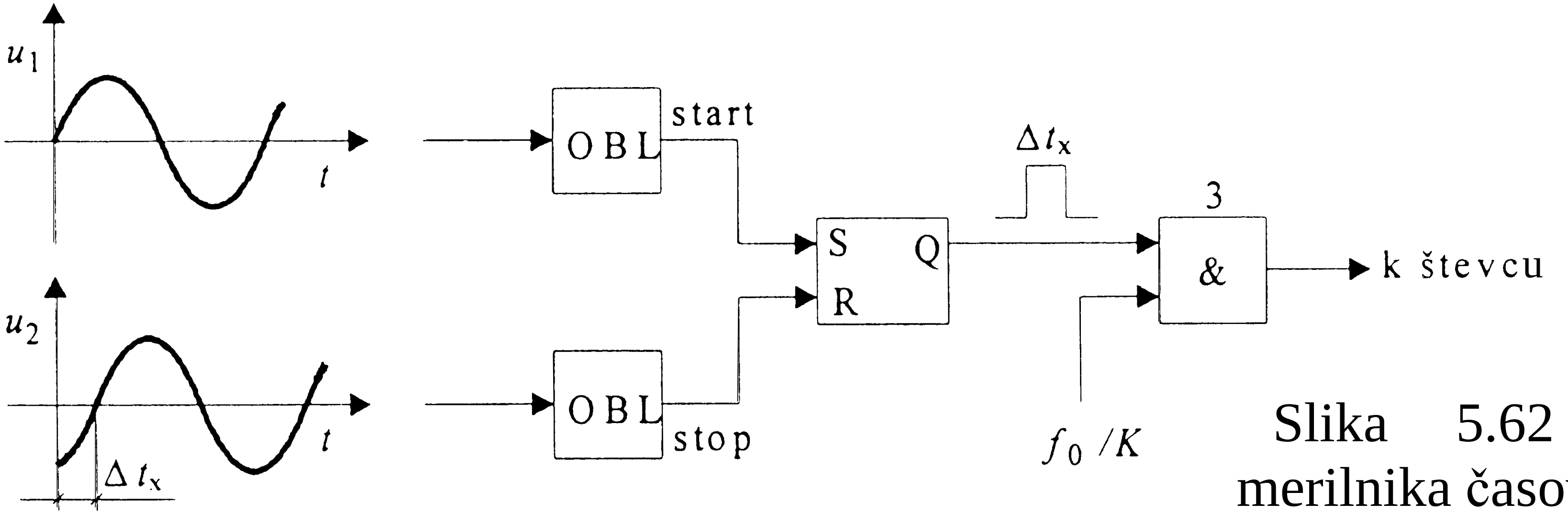
Pri **nizkih frekvencah** je bolje **meriti periodo**!

Pri **visokih frekvencah** je bolje **meriti frekvenco**!

- K je spremenljiv: $K = 1, 10^1, 10^2, 10^3, ...$
- $T_0 = 100$ ns ($f_0 = 10$ MHz) - tipično

Slika 5.61 Mejna kvantizacijska pogreška e_f in e_T v odvisnosti od frekvence

Merjenje časovnega intervala



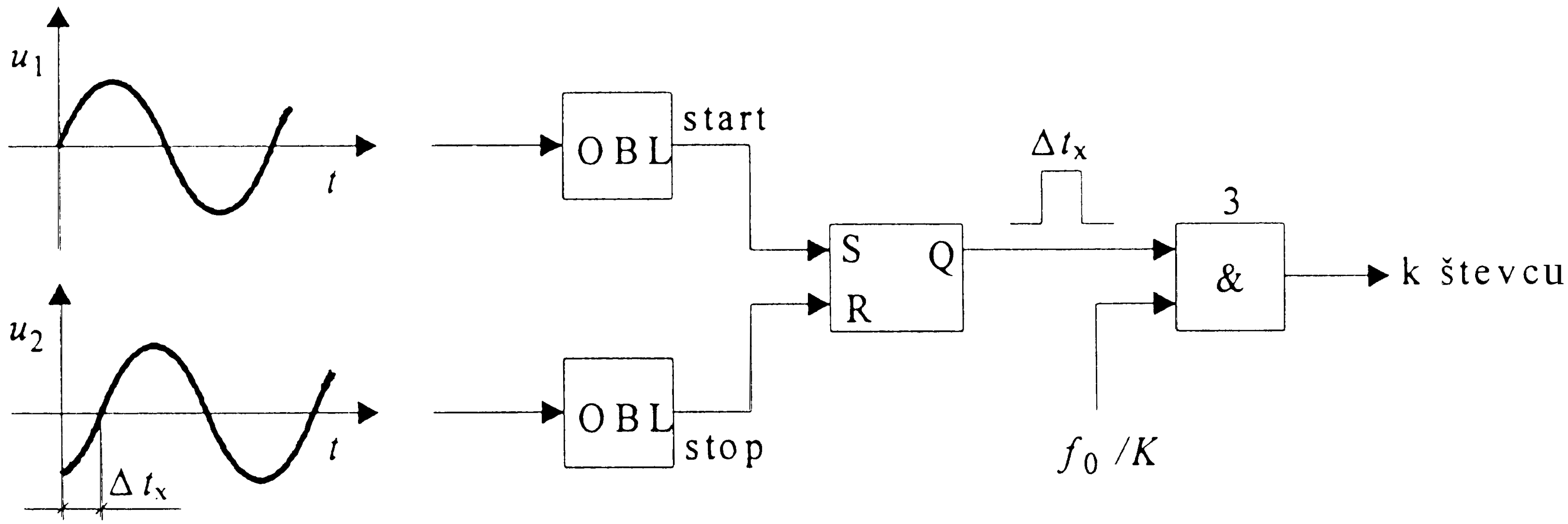
Slika 5.62 Vhodni del merilnika časovnega intervala

Časovni interval Δt_x pogosto ustreza **fazni razliki** med dvema sinusoma.

Na vrata pripeljemo **impulz dolžine** Δt_x,

- oblikujeta ga **prožilna pulza** preko RS bistabilnega multivibratorja

Števec prešteje **v povprečju**: $\overline{Z} = \frac{f_0}{K} \Delta t_x$ impulzov



Za fazni zamik potrebujemo še **krožo frekvenco**:

$$\varphi_x = \omega \Delta t_x$$

- meriti moramo še **periodo**: $\varphi_x = 2\pi \dfrac{\Delta t_x}{T_x} = 360^\circ \dfrac{\Delta t_x}{T_x}$
- ali frekvenco: $\varphi_x = 2\pi\, f_x\, \Delta t_x = 360^\circ\, f_x\, \Delta t_x$