



5. ELEKTRONSKI MERILNI INSTRUMENTI

Elektronski (izhaja iz besede **elektronka** – prvotni osnovni sestavni del) merilni instrumenti so sestavljeni **iz dveh delov**:

- **pretvornika**
 - pretvorimo **električne** (napetost, tok, upornost...) in **neelektrične veličine** (tlak, temperauro, ...) v **enosmerno napetost**.
- **indikatorja**
 - **kazanje** dobljene vrednosti.





Pri pretvornikih uporabljamo elektronske sestavne dele:

- ojačevalniki,
- filtri,
- modulatorji,
- oscilatorji,
- integrirana vezja itd.

Indikatorji:

- številski (digitalni) prikazovalnik,
- rasterski prikazovalnik,
- instrument z vrtljivo tuljavico,
- Braunova elektronka.





Lastnosti:

- Za delovanje potrebuje instrument **pomožni vir električne energije**,
 - **vpliv priključitve instrumenta** na merilni objekt je **manjši** kot pri električnem instrumentu.
- Ojačevalniki in atenuatorji **povečajo območje** merilne veličine.
- S filtri zajamemo samo **del frekvenčnega prostora** in zmanjšamo vpliv motenj.
- Visoka frekvenčna meja ($\approx \times 10\text{GHz}$).





- Z **digitalizacijo** pa dobimo tudi možnost **obdelave, pomnenja in prenosa** izmerjenih vrednosti.
- Vključitev **mikroprocesorja** omogoča **programirljivost**:
 - nadzor merilnega postopka,
 - spreminjanje območij,
 - izbor vrste merilne veličine itn.

Raznovrstnost elektronskih merilnih instrumentov je velika:

- elektronski voltmetri,
- elektronski osciloskopi,
- univerzalni elektronski števec, itn.





5.1 Elektronski voltmetri

Delitev na:

- **analogne,**
 - odklon kazalca je **análogon** merjene veličine.
 - **kvantizacijo** dobimo z **odčitanjem** – določitvijo položaja kazalca na skali.
- **digitalne.**
 - prikazuje vrednost v **številski obliki.**
 - Obe vrsti imata v pretvorniku podobne sestavne dele, ki proizvajajo **enosmerni signal** proporcionalen merjeni veličini.

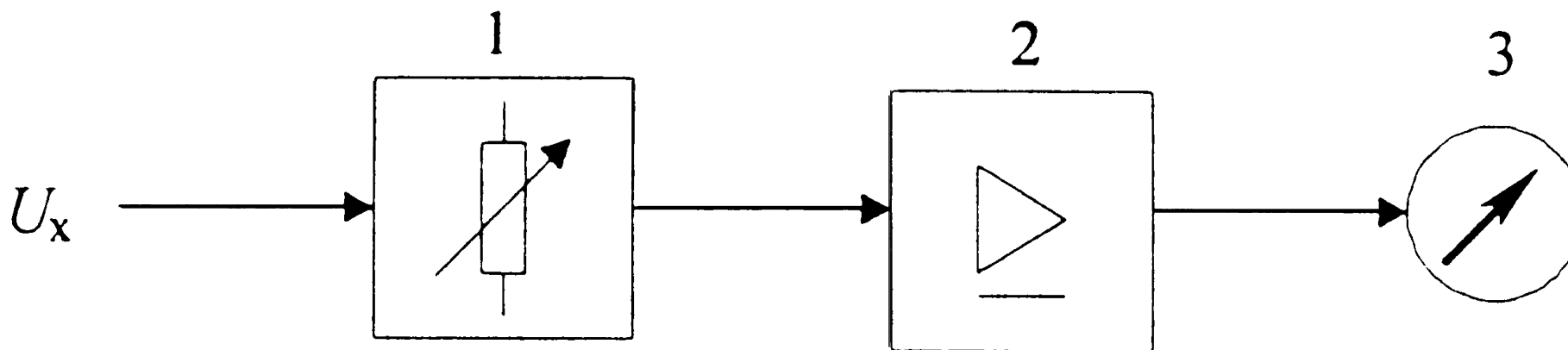
ali delitev na:

- **enosmerne in izmenične.**





Analogni elektronski voltmeter

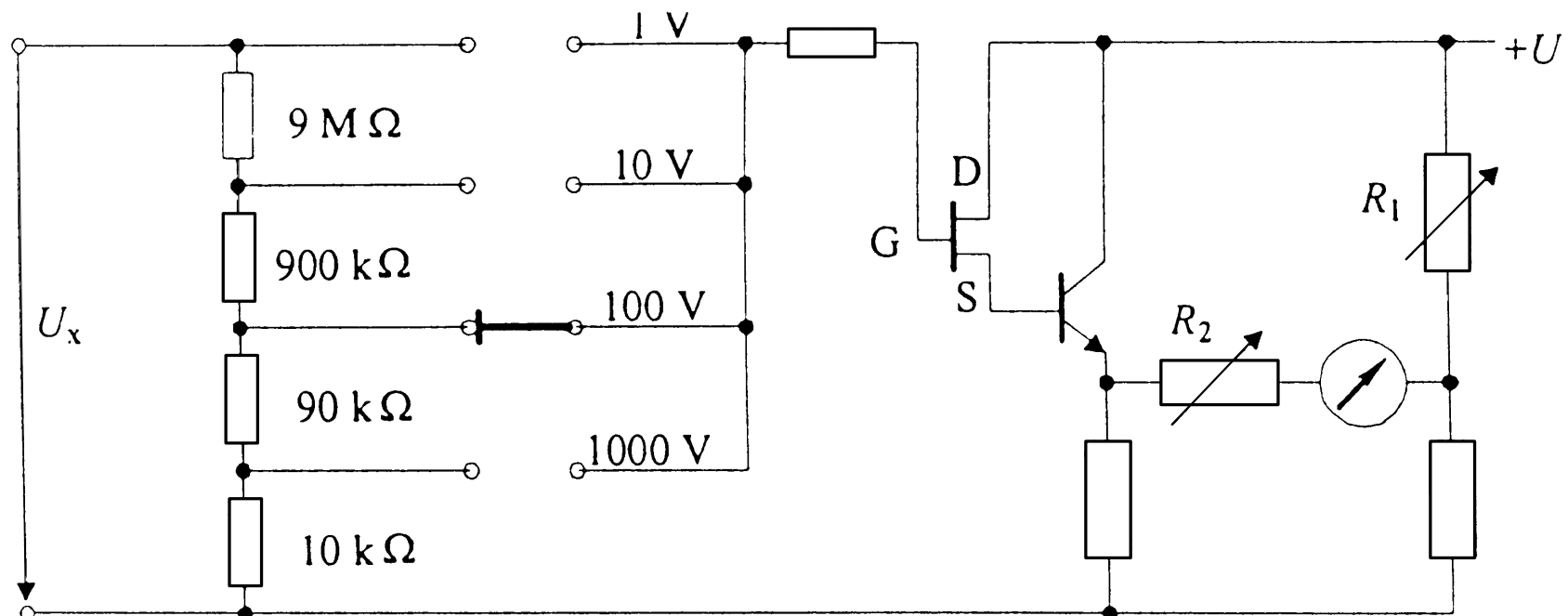


Slika 5.1 Blokovna shema voltmetra za merjenje enosmerne napetosti

Osnovna shema je sestavljena iz:

- vhodnega atenuatorja,
- ojačevalnika,
- prikazovalnika (npr. instrument z vrtljivo tuljavico).





Slika 5.2 Preprost enosmerni analogni elektronski voltmetar

Lastnosti:

- **Vhodna upornost** je odvisna od uporovne verige (tipično $10\text{ M}\Omega$) in **neodvisna od območja**.
 - atenuator je praktično **neobremenjen** (FET tranzistor)
- R_1 in R_2 služita za **nastavitev ničle** in polnega **odklona** (občutljivosti).





Takšen voltmeter **ni primeren** za merjenje **zelo nizkih enosmernih napetosti**.

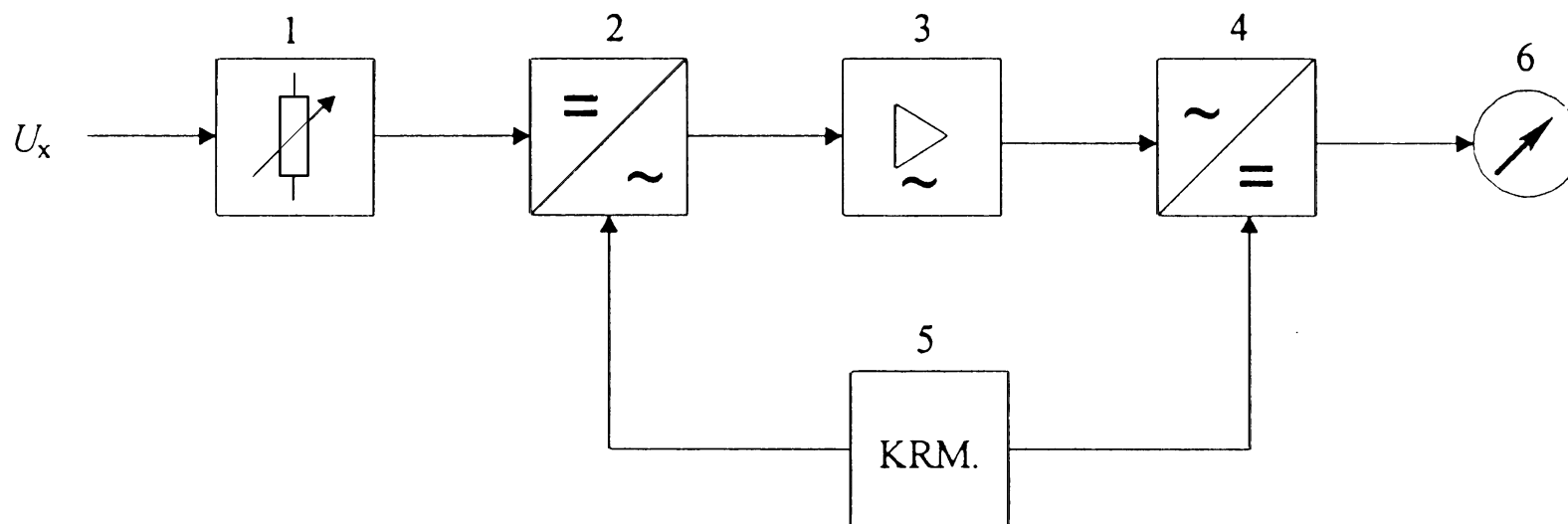
- ker se spreminja ničelna točka – imamo **lezenje ali drift**.

Vzroki so:

- temperaturna odvisnost,
- spreminjanje napajalne napetosti,
- staranje elementov itn.

Rešitev problema je lahko z ojačevalnikom, ki uporablja **razsekalec** (chopper amplifier).





Slika 5.3 Blokovna shema voltmetra za merjenje nizkih enosmernih napetosti

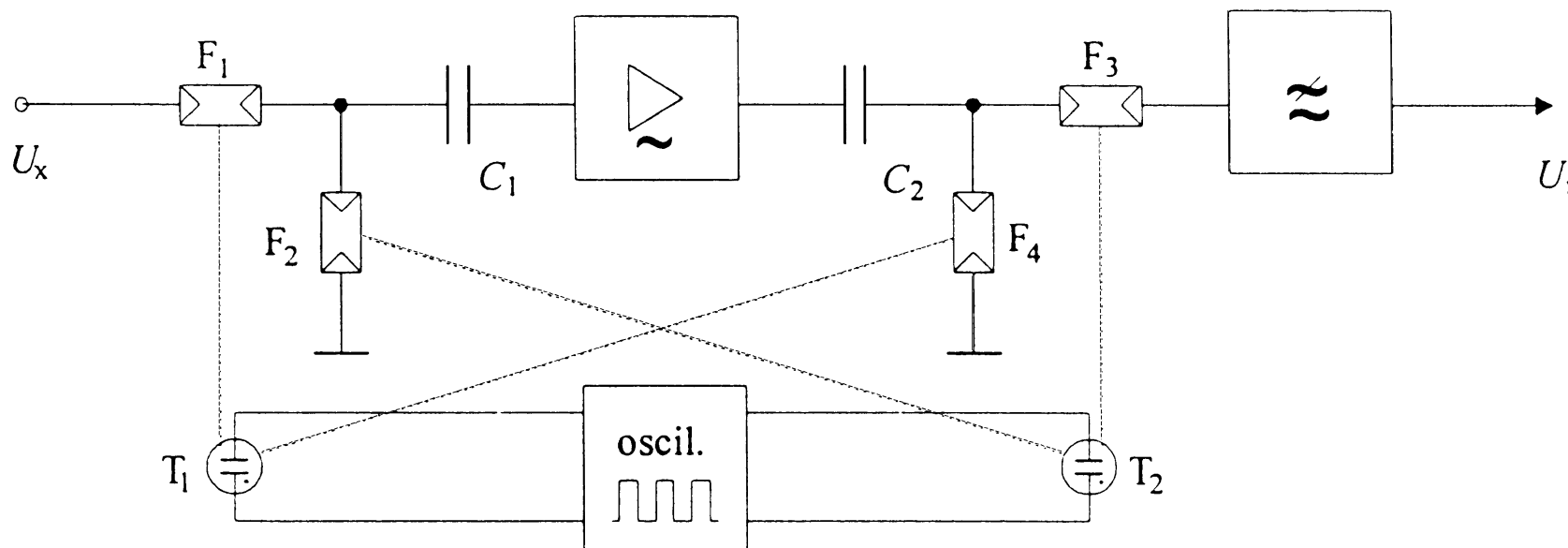
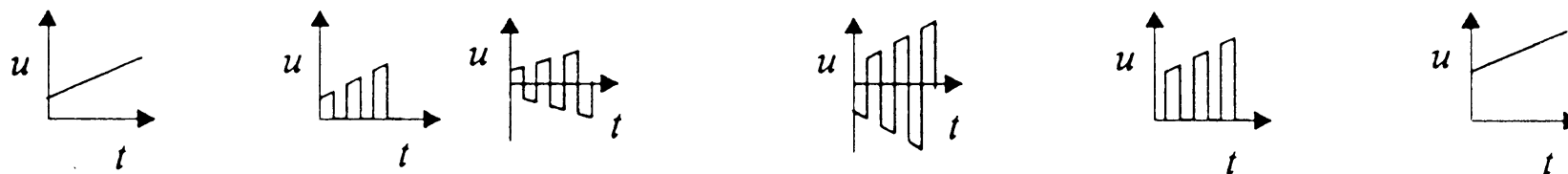
- **Enosmerna** napetost se najprej pretvori v **izmenično** (2) z razsekalcem - **modulatorjem**.
- **Izmenični ojačevalnik** (3) ne ojačuje enosmernih in nizkofrekvenčnih signalov.
- Ojačan signal se na koncu **usmeri** (4) v enosmerno vrednost - **demodulira**.
- Preklapanje krmili **krmilni člen** (5).





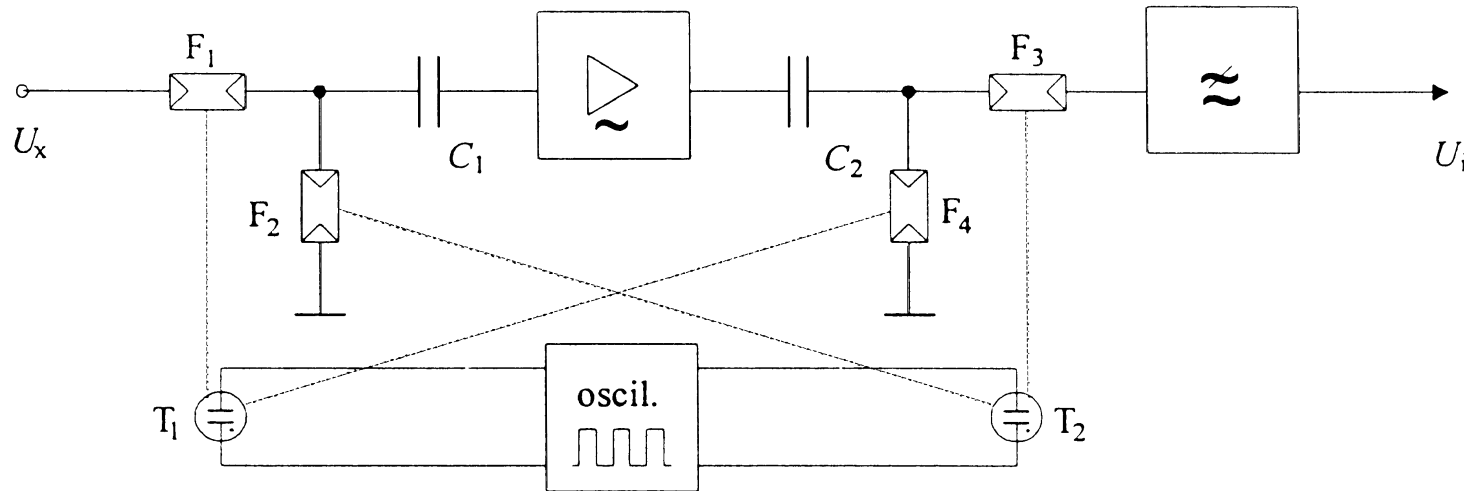
Za razsekanje se uporabljajo različna **stikala**:

- **tranzistorska** in **fotouporovna**, kapacitivne diode, magnetno spremenljivi upori.



Slika 5.4 Voltmeter za nizke enosmerne napetosti s fotouporovnim razsekalcem





Fotoupore F_1 do F_4 osvetlujeta tlivki T_1 in T_2 (plinski elektronki) z bliski.

- ko **prevaja** tlivka T_1 , **prevajata** fotoupora F_1 in F_4 (sta osvetljena), ko prevaja tlivka T_2 prevajata fotoupora F_2 in F_3 ,
 - frekvenca preklapljanja je reda 100 Hz.
- **oscilator** je **galvansko ločen** in ne povzroča motenj.
- pred ojačevalnikom imamo izmenično napetost - **modulacija**, ki se ojača.
- na izhodu ojačevalnika imamo obraten proces - **demodulacija**.
- izhodni filter je **nizkoprepusten** → **ovojnica** signala





Obstajajo tudi ojačevalniki, kjer se z merjeno enosmerno napetostjo **modulira nosilni sinusni** signal ($f(U)$).

- izhodiščna frekvenca mora biti vsaj 10 krat večja kot je najvišja frekvenca merjenega signala.



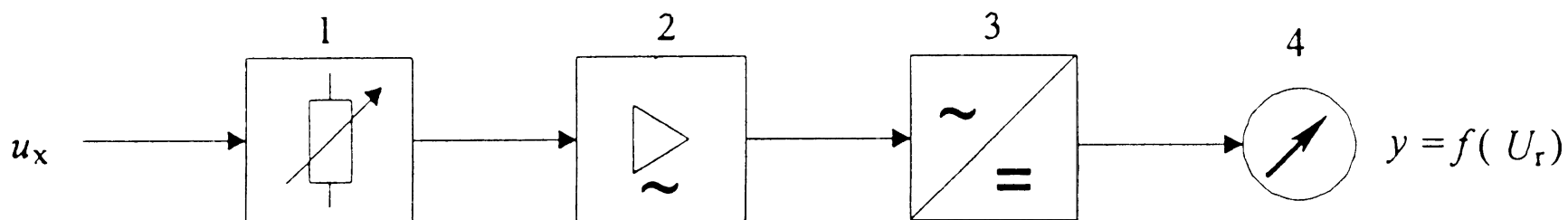


Izmenični elektronski voltmetri

Pri merjenju izmenične napetosti razlikujemo dva tipa voltmetrov:

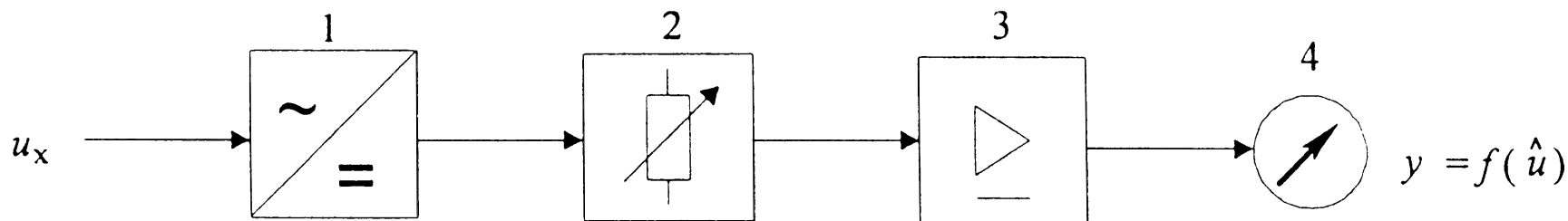
a. izmenično napetost najprej ojačimo in potem usmerimo

- odklon je ponavadi odvisen od usmerjene vrednosti izmenične napetosti (**polnovalno usmerjanje**),



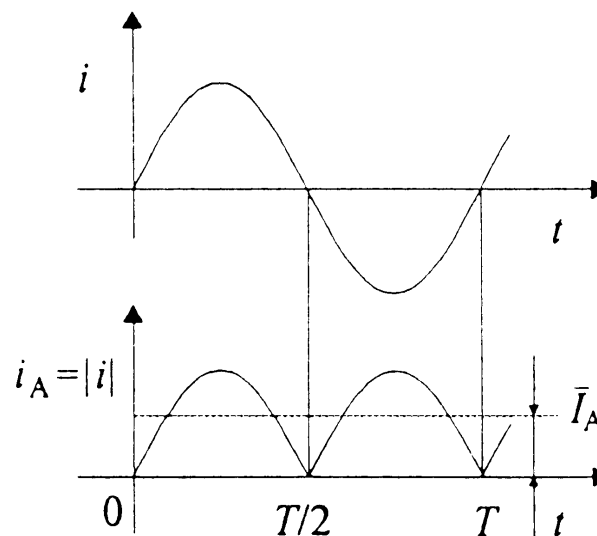
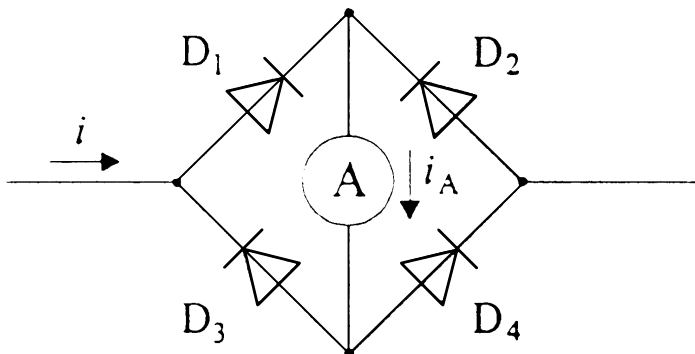
b. izmenično napetost najprej usmerimo in potem ojačimo

- **odzivanje na temensko vrednost**,





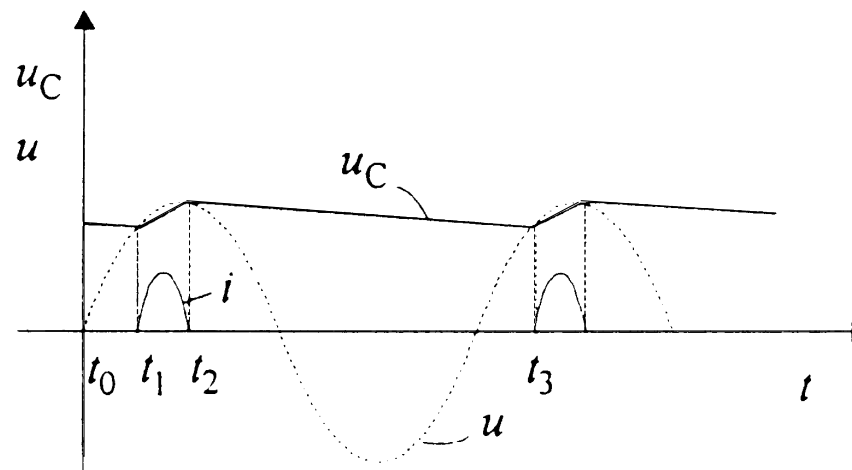
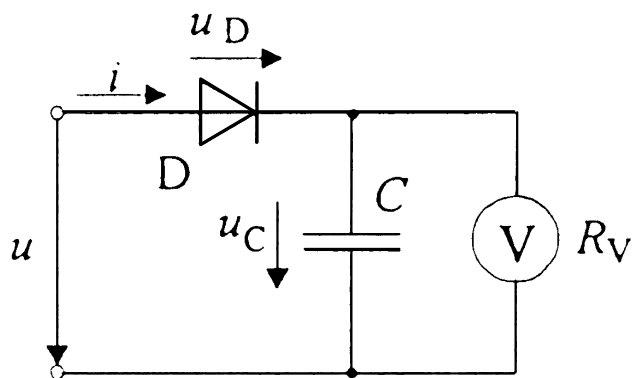
Slika 4.17 Polnovalno usmerjanje



Voltmetre ponavadi umerimo v efektivnih vrednostih izmenične napetosti

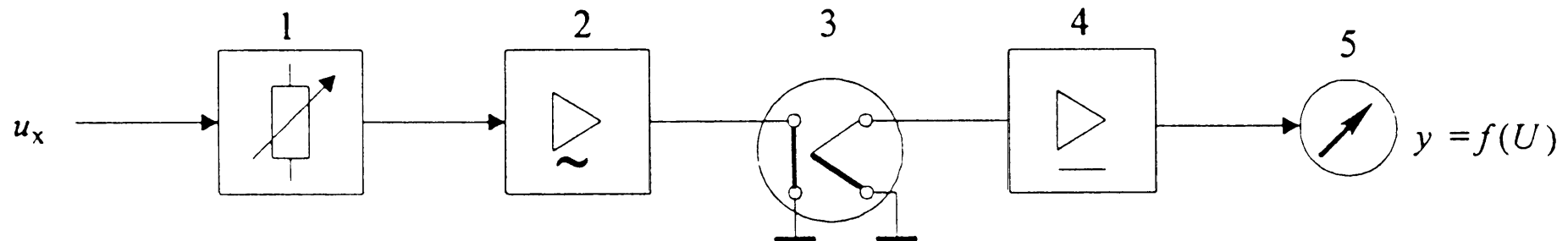
- če ni sinus → sistematski pogrešek

Slika 4.19 Voltmeter, ki se odziva na temensko vrednost

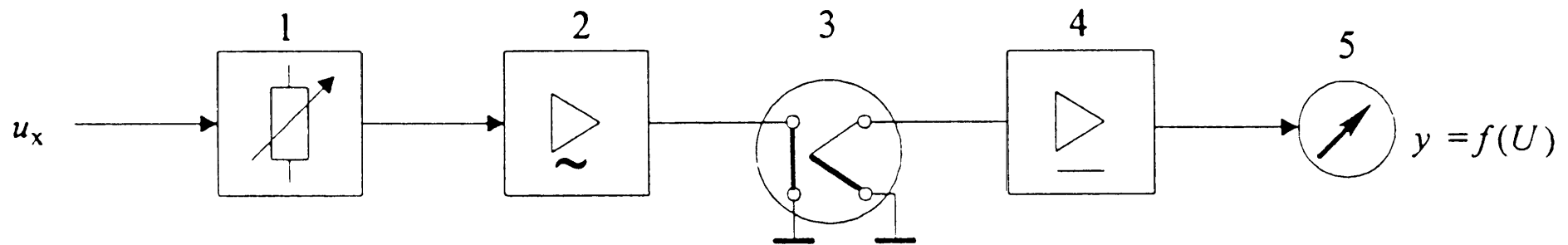


Obstaja še **tretji tip** elektronskih voltmetrov, ki se odzivajo **na efektivno vrednost** izmenične napetosti.

- kažejo pravilno **ne glede** na **faktor oblike** in **temenski faktor**
- uporablja se termoelektrični pret. - **termopretvornik**



Slika 5.6 Blokovna shema voltmetra za merjenje efektivne vrednosti napetosti



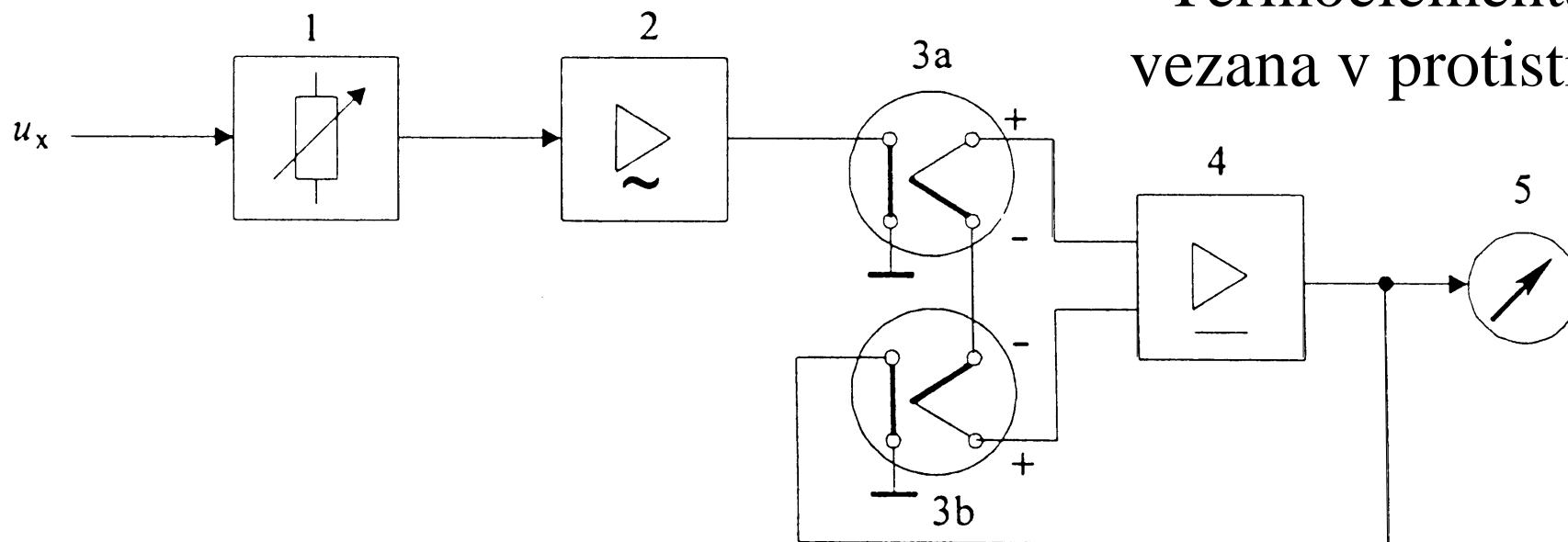
- Signal gre preko **atenuatorja** (1) in širokopasovnega **ojačevalnika** (2) na **ogrevno nitko** termopret. (3);
- **Nizko vrednost** enosmerne napetosti termopretvornika je potrebno **ojačiti** (4).
- Enosmerna napetost je proporcionalna moči dovedenega toka oz. kvadratu toka → **kvadratična skala**;





Lineariziramo jo z uporabo še enega termopretvornika v povratni zanki:

Termoelementa sta vezana v protistiku.



Slika 5.7 Voltmeter za merjenje efektivne vrednosti napetosti z linearno skalo

Napetost na vhodu ojačevalnika je praktično **nič**, kadar sta efektivni vrednosti **izmeničnega toka** na T-3a in **enosmernega toka** na T-3b enaki.

- za enakost poskrbi **ojačevalnik z zelo velikim ojačanjem!**

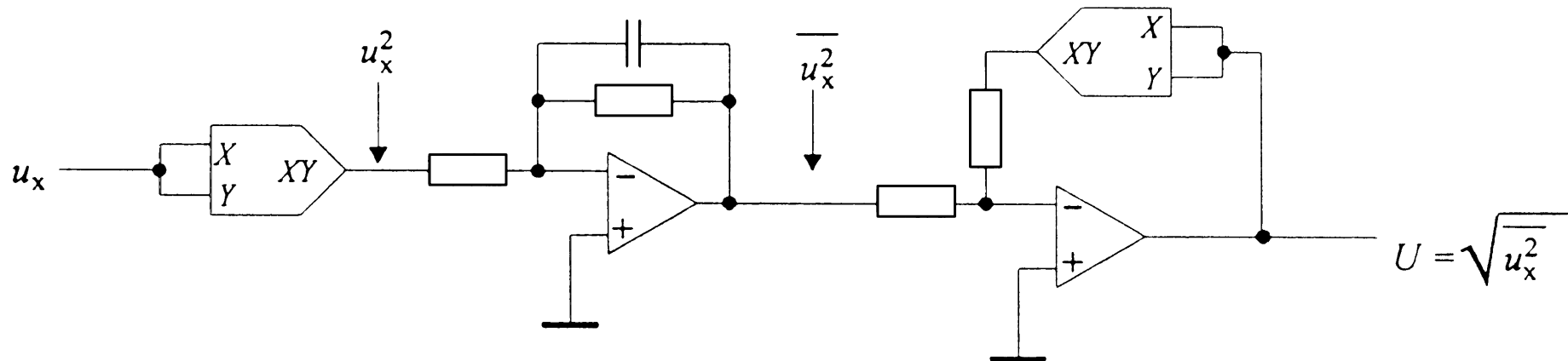




Najbolj pogosto se uporablja popolna **elektronska realizacija** definicije:

$$U = \sqrt{u_x^2} \text{ - koren povprečja kvadratov (rms)}$$

- napetost **kvadriramo**, **povprečimo** s filtrom in **korenimo** (kvadratna funkcija v povratni zanki ojač.)



Slika 5.8 Pretvornik za merjenje efektivne vrednosti napetosti z analognim postopkom





Uporaba elektronskih analognih voltmetrov za izmenične napetosti:

- Pozorni moramo biti, na kateri parameter se odzivajo;
 - v mislih moramo imeti tudi **časovni potek** napetosti.
- **Trenutne vrednosti** so lahko **precej večje** kot povprečja merjene napetosti (usmerjena ali efektivna vrednost) in pride **do nasičenja** v pretvorniku.
 - povpreček ni več točen!
 - podaja se mejna vrednost temenskega faktorja.





Digitalni elektronski voltmeter

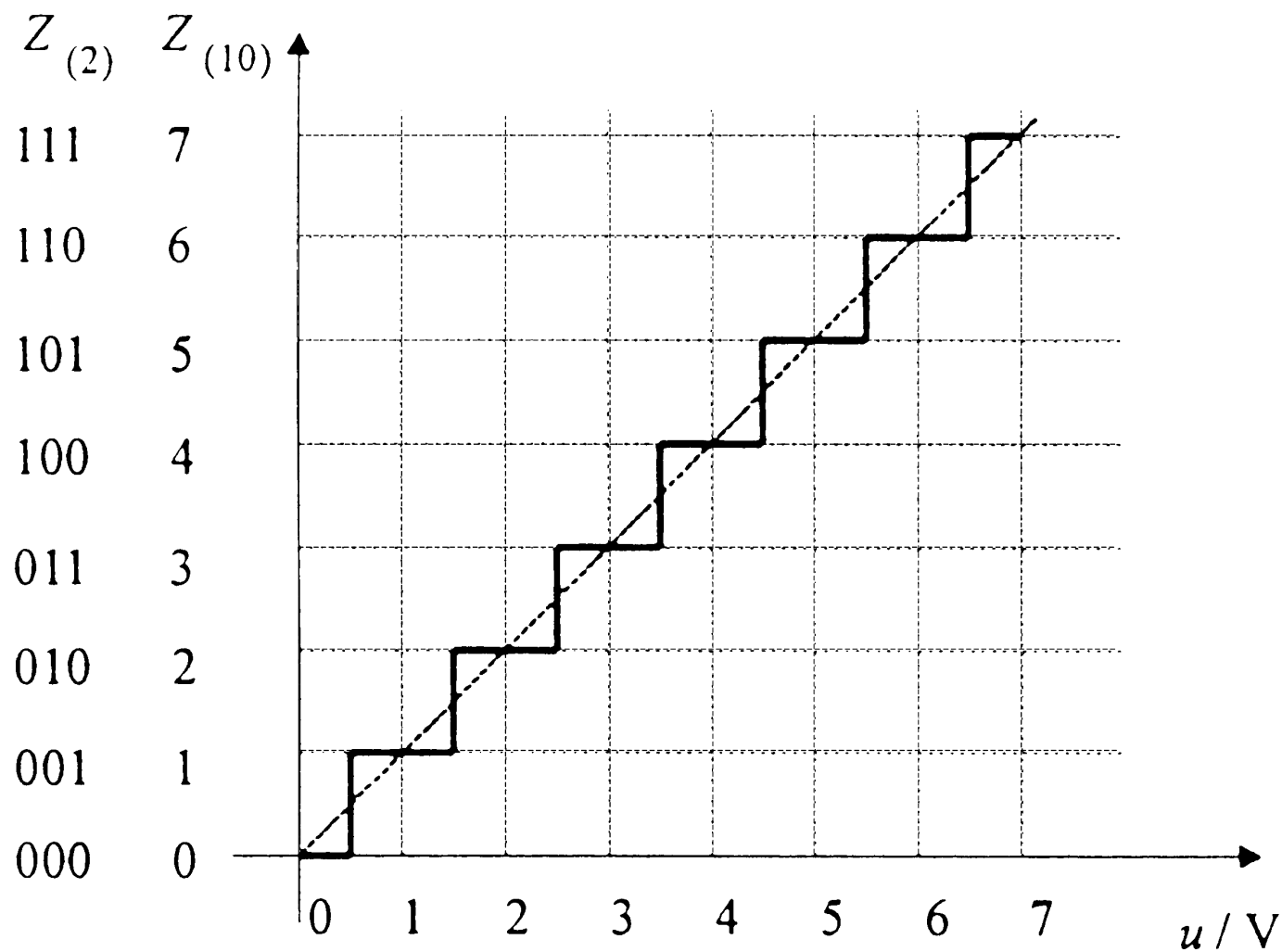
Temeljni člen je **analogno-digitalni pretvornik** (ADP – ADC – analog to digital converter).

- Analogna **vhodna veličina** je u (ali i),
- **izhodna veličina** pa njen **digitalni ekvivalent** Z - **kodirana beseda** $Z_{(2)} = \text{lb}(Z_{(10)})$.
 - uporablja se **binarno kodiranje** (zapis z **0 in 1**) – beseda je binarno večmestna (6-bitna, 8-bitna, ...).

Z n -bitnim ADP imamo 2^n **diskretnih izhodnih nivojev**.

- so **predstavniki** (reprezentanti) kvantizacijskih intervalov - **podobmočij**



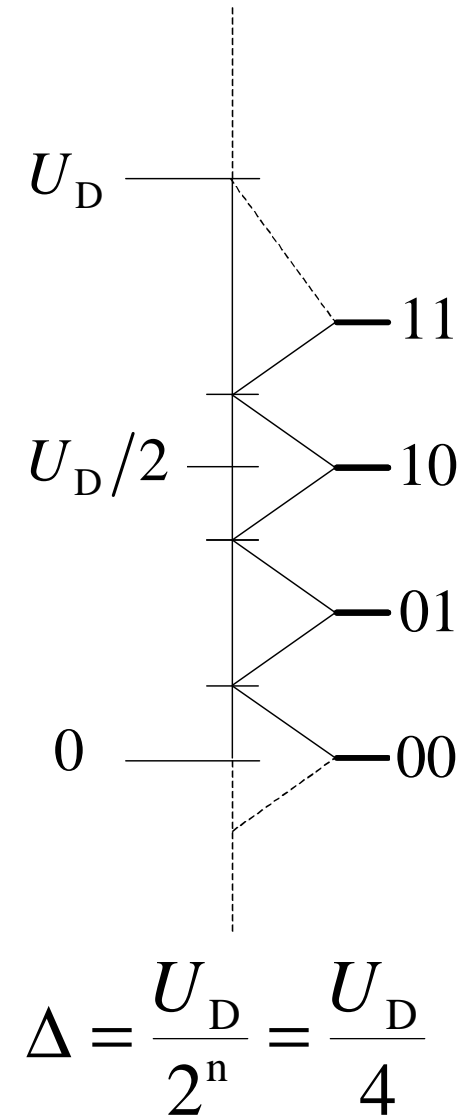
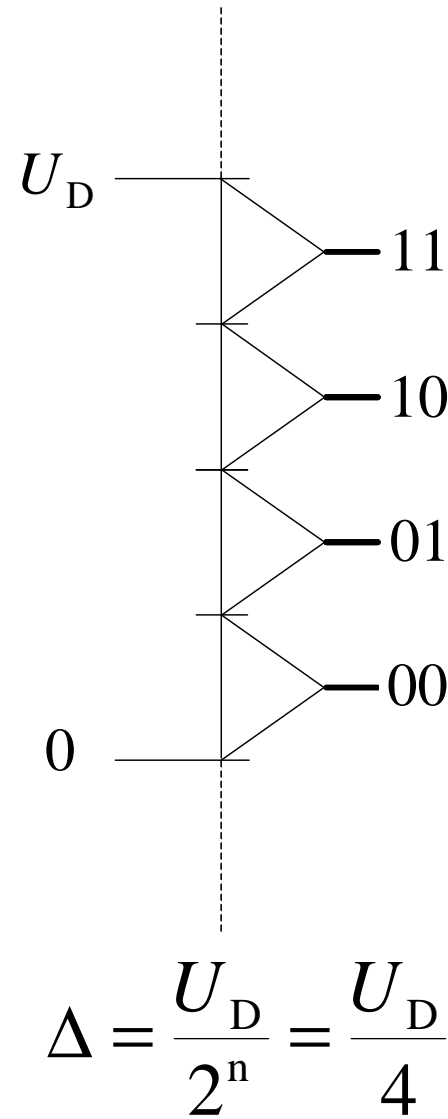
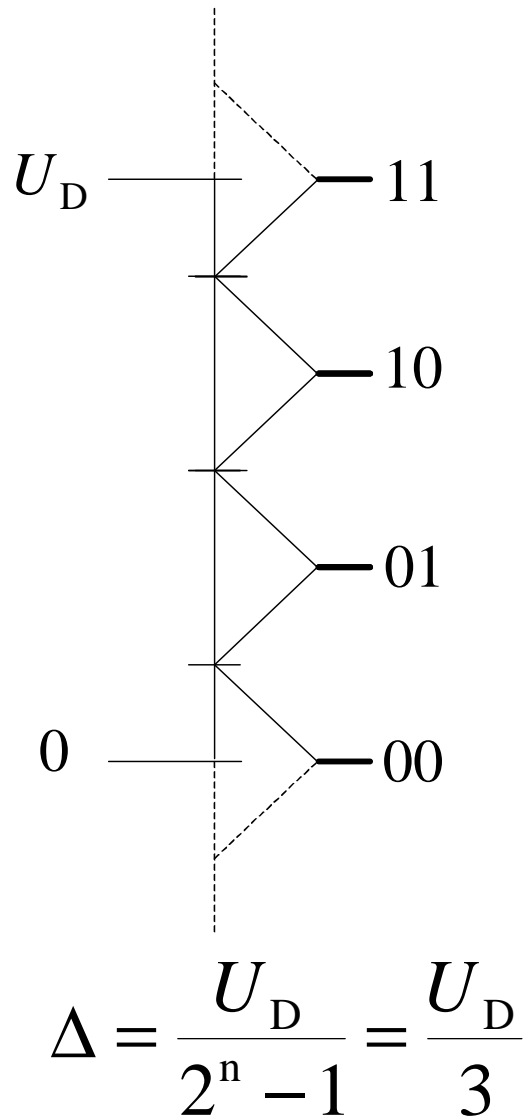


Slika 5.9 Kvantizacijska karakteristika 3-bitnega ADP





Primeri karakteristik ADP: $n = 2$





Ker ima vhodna analogna veličina neskončno nivojev digitalna pa končno, nastane **kvantizacijski pogrešek** (pri **analognih instrumentih** ustreza temu **pogrešek odčitavanja**).

- **mejni kvantizacijski pogrešek:** $\pm \frac{\Delta}{2}$ ali $\pm \frac{\text{LSB}}{2}$
 - LSB - najmanj pomebni bit

Izhodni merilni parameter ADP je (ne)prisotnost impulza (0 ali 1) → **impulzno kodna modulacija**

Za predstavitev izhodne besede imamo dva bistvena načina prikaza:

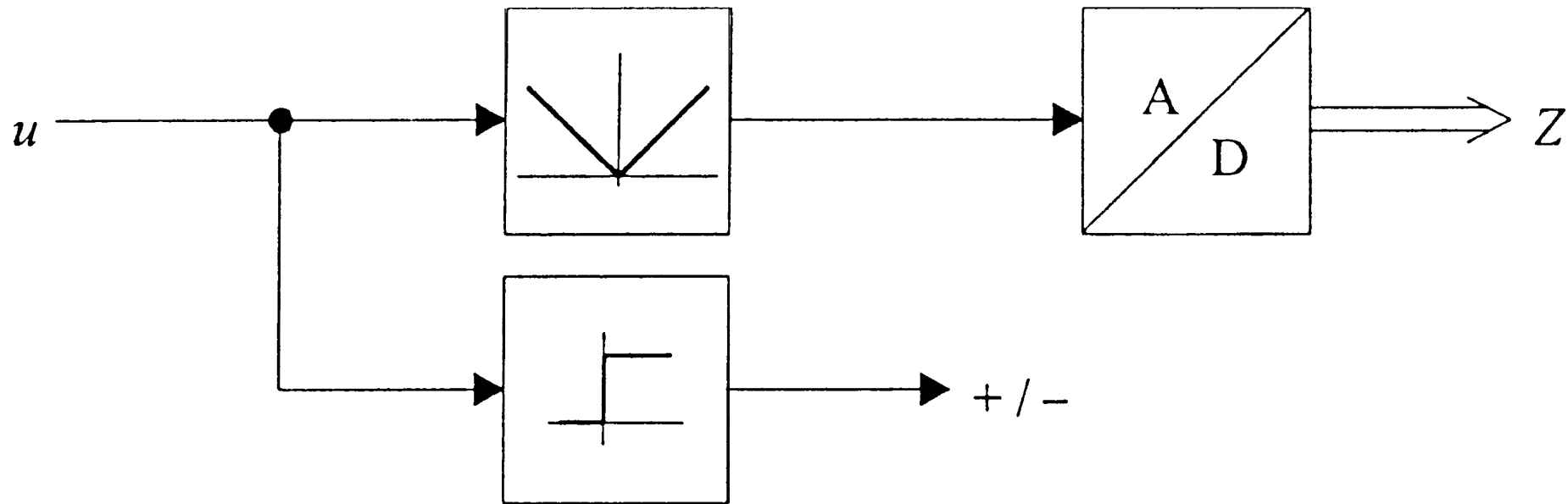
- **zaporedni** (serijski),
- **vzporedni** (paralelni),
- obstajajo še vmesni **serijsko-paralelni**.





Negativne vrednosti pretvarjamo:

- z usmernikom:
 - predznak nam doda MSB bit (najbolj tehten bit: 0.. $U < 0$, 1 .. $U > 0$; Sign+Magnitude)



Slika 5.10 Razširitev unipolarnega ADP v bipolarnega z usmernikom

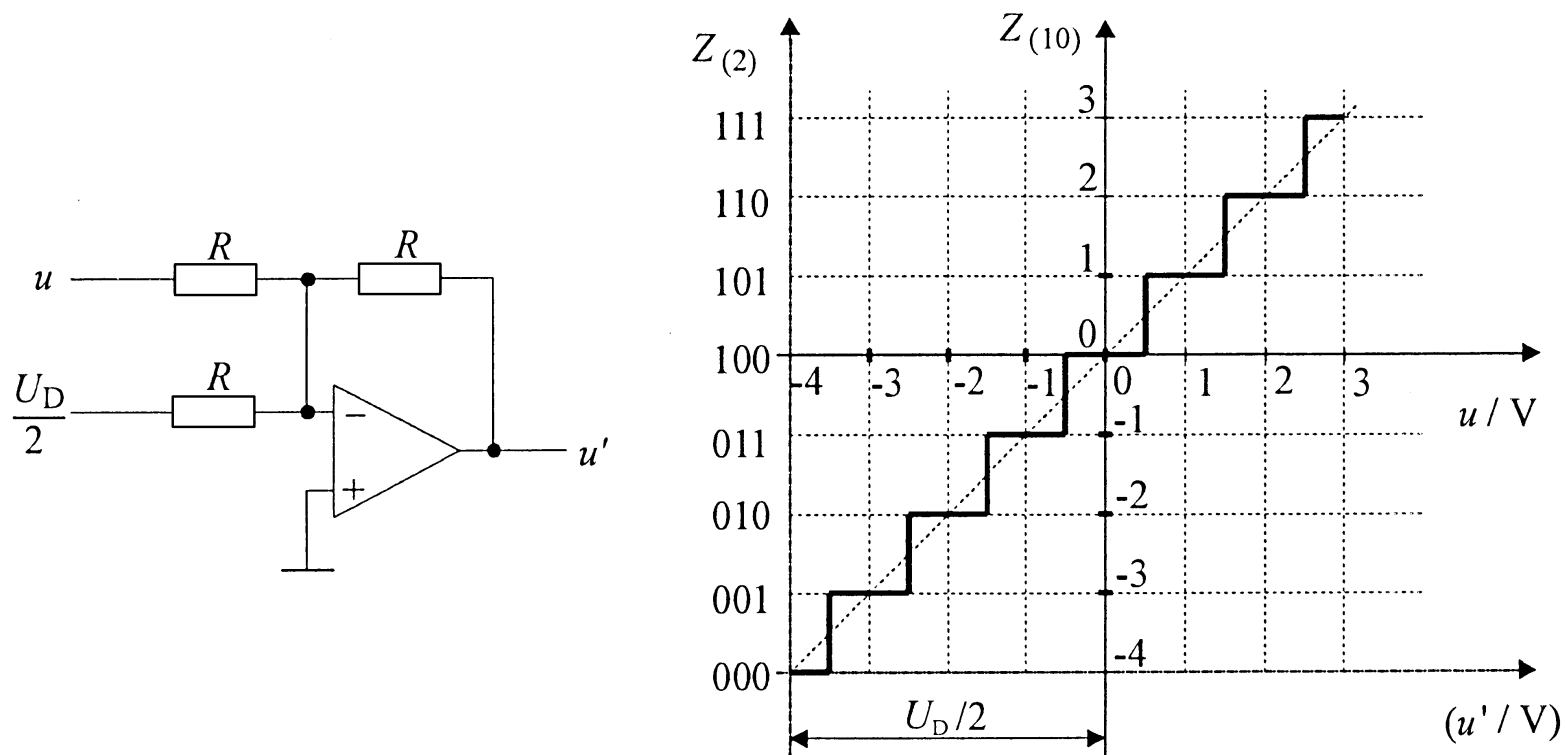




- z enosmerno prednapetostjo:

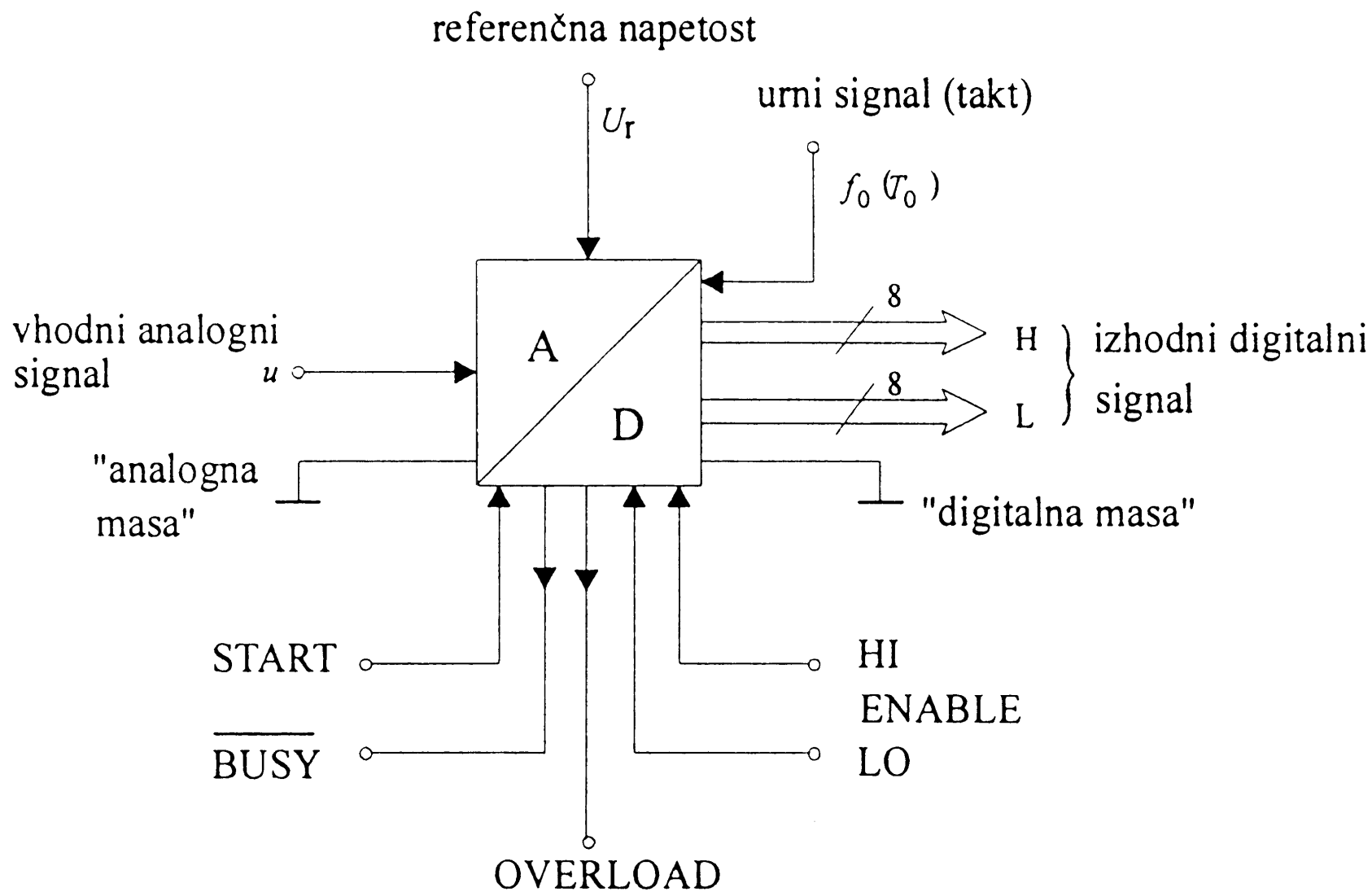
- $Z = 000 \quad \infty \quad -U_D/2;$

- $Z = 111 \quad \infty \quad U_D/2 - 1\text{LSB} \quad (\text{Offset Binary})$



Slika 5.11 Razširitev unipolarnega ADP v bipolarnega z enosmerno prednapetostjo





Slika 5.10 Blokovna shema ADP z značilnimi priključki





ADP ima vrsto priključkov:

- referenčni potencial '**analogna masa**' (Agnd),
- skupni potencial izhoda '**digitalna masa**' (Dgnd),
- **referenčna napetost** U_r za primerjavo z merjeno napetostjo,
- **urni signal**, ki daje takt korakov pri pretvarjanju,
- **prožilni signal** za začetek pretvorbe (START),
- **signal zasedenosti** z delom (BUSY),
 - ko preide v stanje 1, lahko sprožimo novo pretvarjanji z $1 \rightarrow 0$,
- če je **ADP izkrmiljen** (prevelika napetost na vhodu), nam ADP to sporoči na priključku OVERLOAD,
- prisotnost 8-bitnih podatkov na vodilu (HI ali LO ENABLE) s pomočjo 'tristate' gonilnikov.





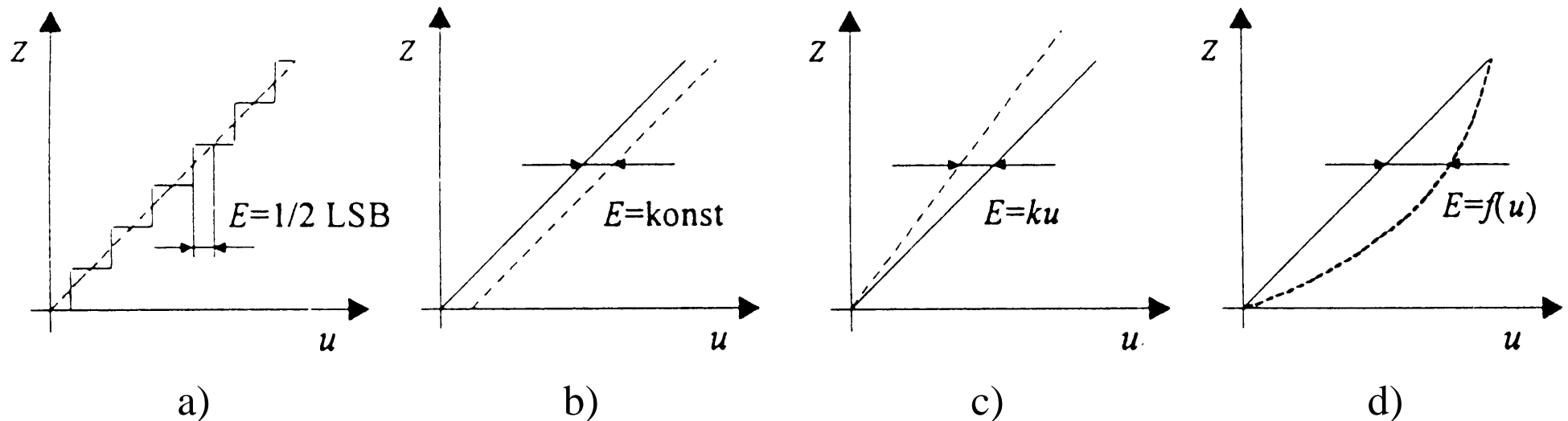
Značilni podatki ADP:

- **dolžina besede** določa relativni kvantizacijski pogrešek
$$e_{q,\max} = \pm \Delta/2 / U_D = 1/2 / 2^n \quad (\Delta = U_D / 2^n),$$
 - primeri:
 - 6-bitni ADP: $e_{q,\max} = \pm 1/2^7 \approx \pm 0,8\%$
 - 18-bitni ADP: $e_{q,\max} = \pm 1/2^{19} \approx \pm 2 \text{ ppm}$
- **uporabljeni koda,**
 - od nje je odvisna **interpretacija predznaka,**
- **čas pretvorbe,**
 - **odvisen od vrste pretvornika:**
 - **najdaljši** pri integrirajočem ADP,
 - **najkrajši** pri paralelnem ADP,
 - določa časovni presledek med zaporednima podatkomoma oz. **največjo hitrost merjenja.**





- **pogrešek** razdelimo na:
 - **kvantizacijskega** - a,
 - **ničelnega** – b,
 - **naklonskega** – c,
 - pogrešek **nelinearnosti** – d.
 - **diferencialna (DNL)** in **integralna (INL)**



Slika 5.11 Pogreški analogno-digitalnega pretvornika

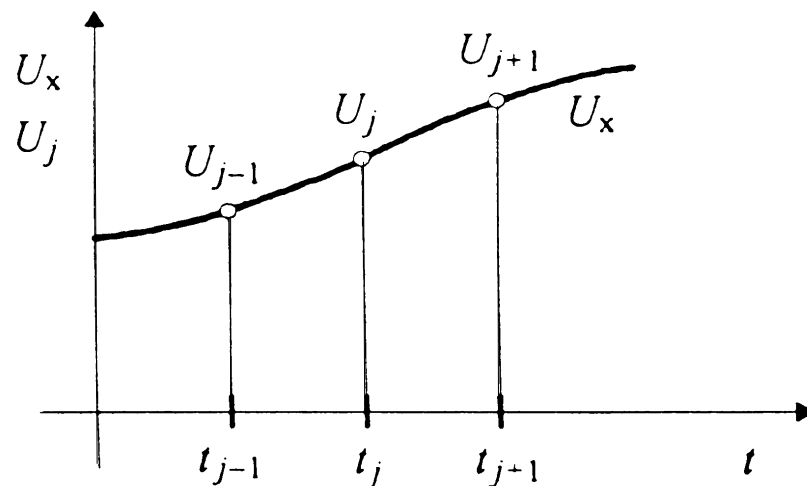




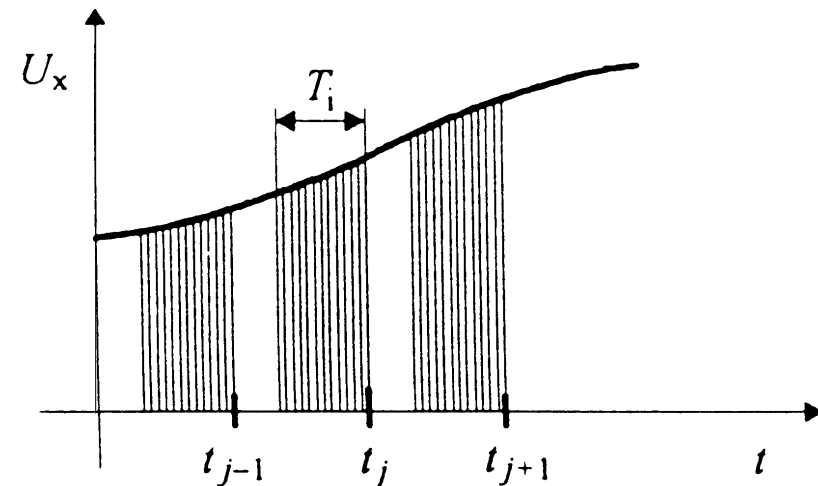
Bistveno za ADP je tudi **postopek vzorčenja**:

- **trenutni** – izhod ustreza trenutni vrednosti: $U_j(t_j)$,
- **integrirajoči** – izhod ustreza **tekoči povprečni vrednosti**:

$$\bar{U}_j = \frac{1}{T_i} \int_{t_j - T_i}^{t_j} U_x dt$$



a)



b)

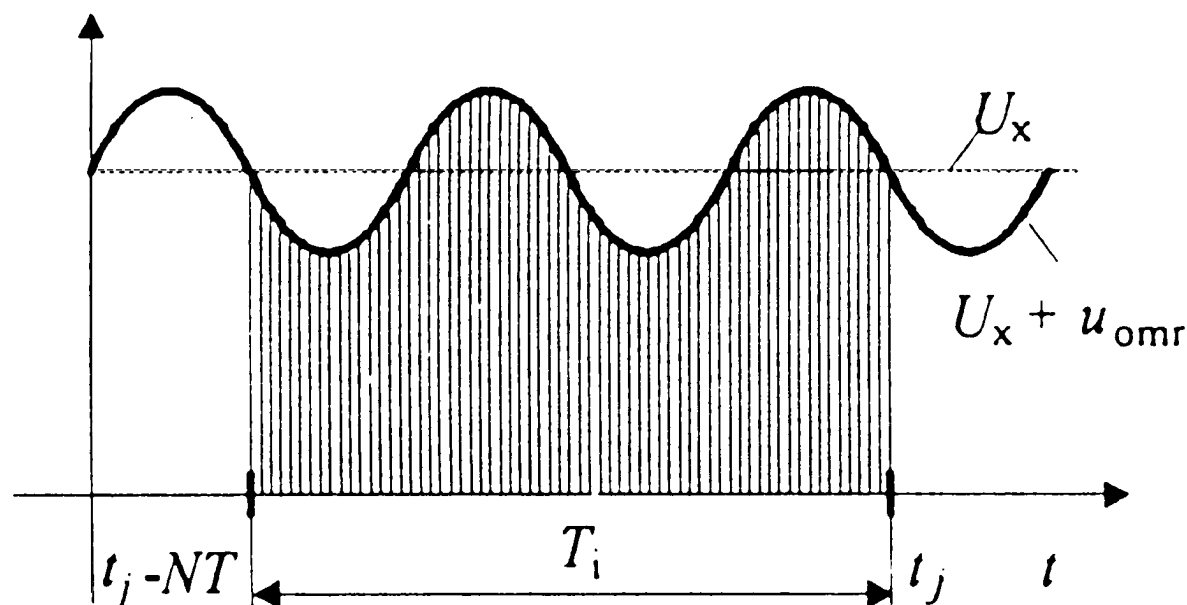
Slika 5.12 Trenutni in integrirajoči ADP





Lastnost **integrirajočega ADP** da **filtrira** (odziva se na povprečno vrednost) izkoriščamo za **izločanje motnje**.

- **integracijski čas T_i** mora biti **enak periodi** ali večkratniku periode **motnje** (omrežna frekvenca):



$$\begin{aligned}\bar{U}_j &= \frac{1}{NT} \int_{t_j - NT}^{t_j} (U_x + u_{\text{omr}}) dt = \\ &= U_x + \frac{1}{NT} \int_{t_j - NT}^{t_j} u_{\text{omr}} dt \cong U_x\end{aligned}$$

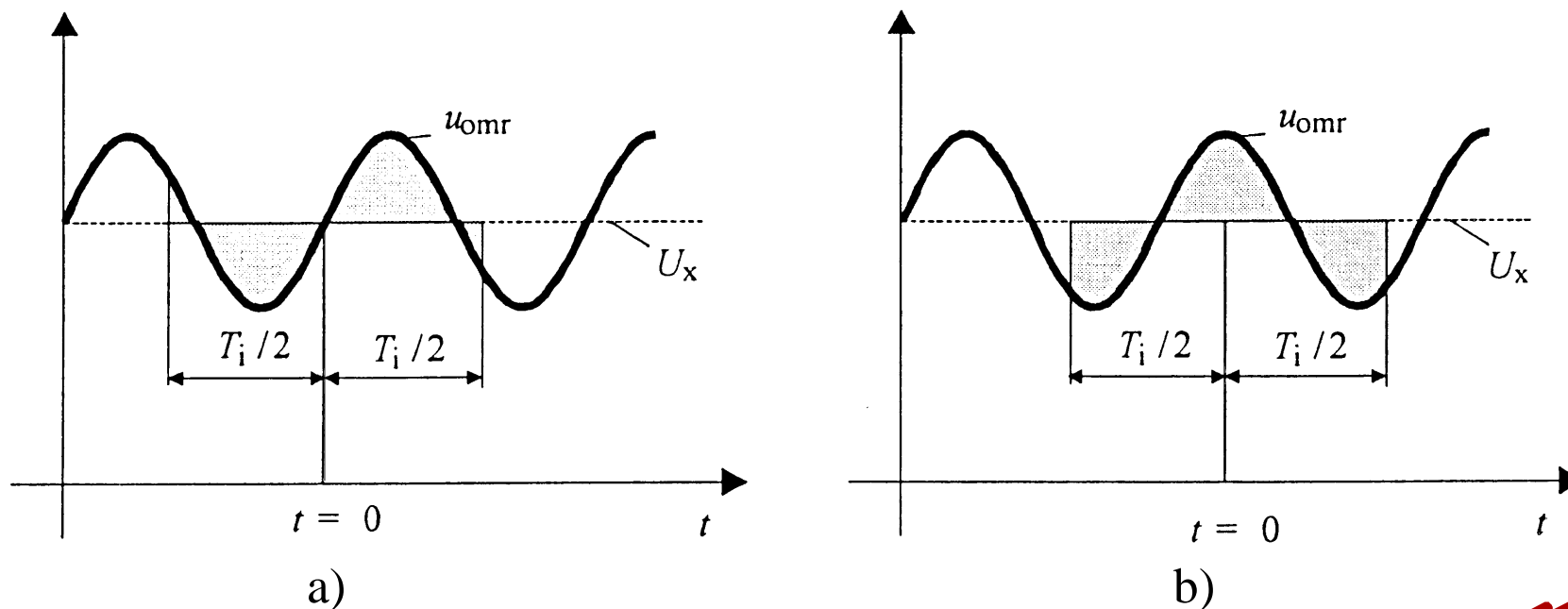
Slika 5.13 Izločitev periodične motnje pri integrirajočem ADP





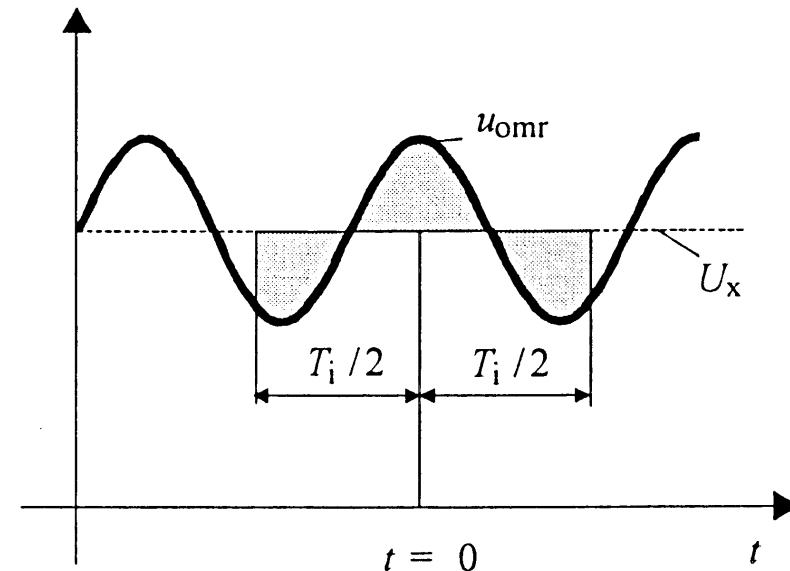
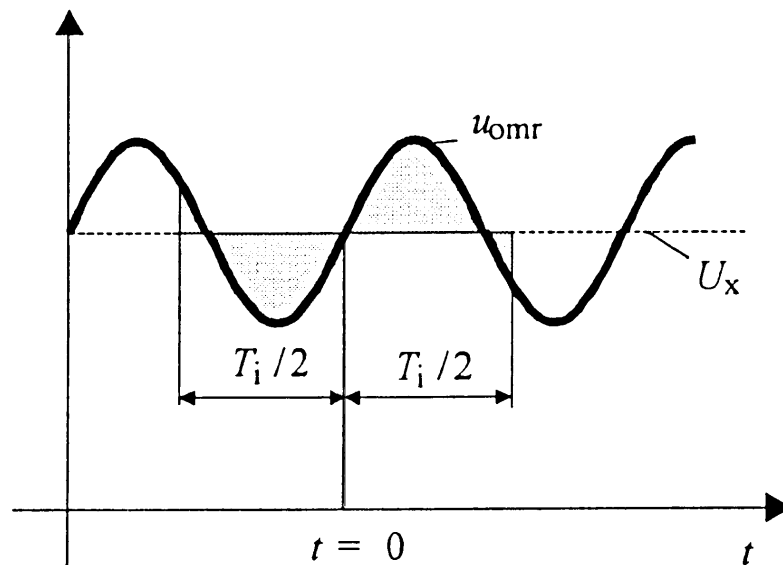
Če čas integracije ni mnogokratnik periode motnje, je izločanje motnje odvisno od relativnega položaja glede na motnjo.

- analiza za sinusno obliko:
 - a) izločanje motnje je popolno,
 - sredina integracijskega intervala se ujema s prehodom motnje skozi ničelni nivo.
 - b) izločanje motnje je najslabše.
 - sredina intervala se ujema z vrhom motnje.



Slika 5.16 Vpliv položaja integracijskega intervala na slabljenje motnje





Največja povprečna vrednost motnje v primeru b:

$$\bar{U}_{\text{omr}} = \frac{1}{T_i} \int_{-T_i/2}^{T_i/2} \hat{u}_{\text{omr}} \cos \omega t \, dt = \hat{u}_{\text{omr}} \frac{\sin \omega T_i / 2}{\omega T_i / 2}$$

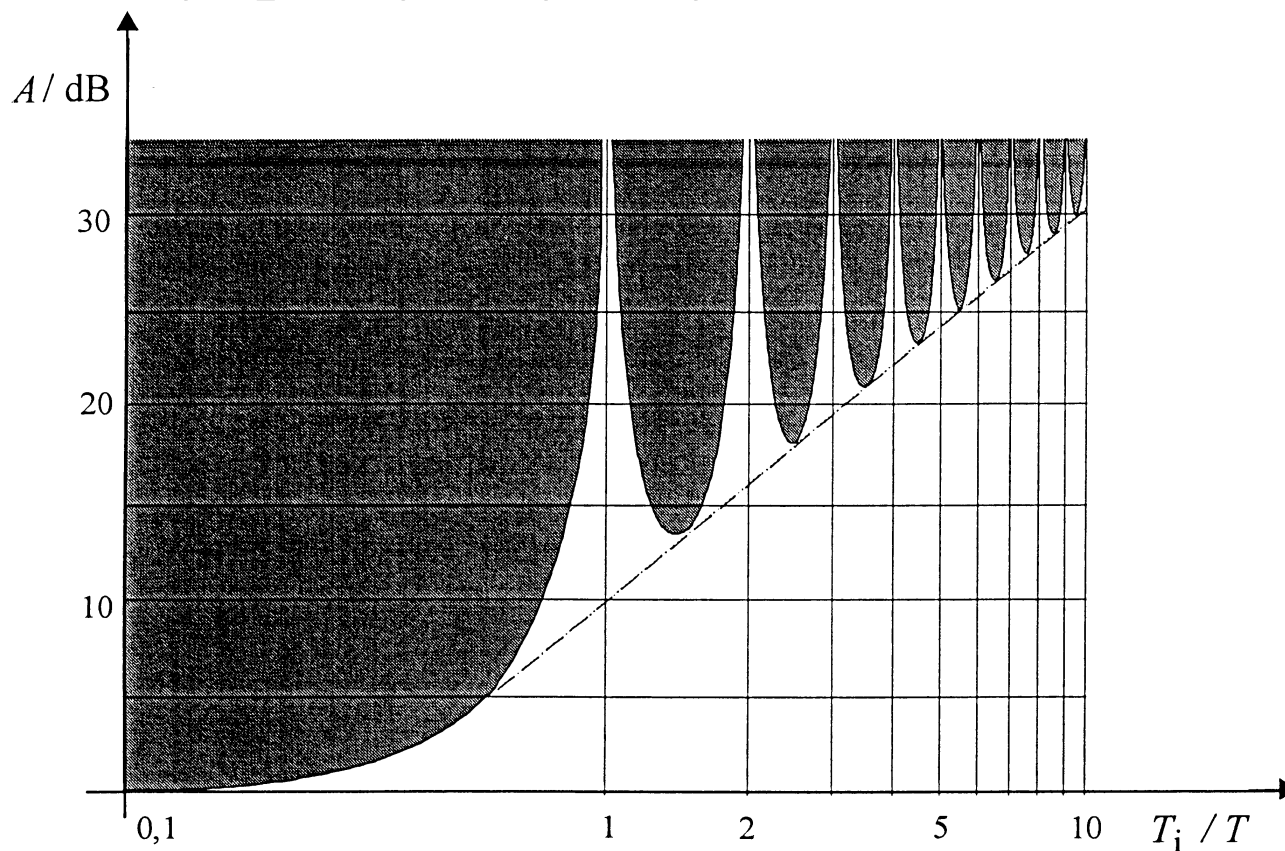
- Pri določanju slabljenja jo **primerjamo s temensko vrednostjo:**
 - **integracijski ADP se primerja s trenutnim!**





Slablenje: $A/\text{dB} = 20 \lg \frac{\widehat{u}_{\text{omr}}}{|\overline{U}_{\text{omr}}|}$ oz. $A/\text{dB} = 20 \lg \frac{\pi T_i / T}{|\sin(\pi T_i / T)|}$

- krivulja podaja najmanjšo vrednost slabljenja!



Slika 5.17 Slablenje integrirajočega ADP





Pri sinusni obliki se **tekoča povprečna vrednost** in **trenutna vrednost razlikujeta**,

- nastane **relativni pogrešek**, ki je v najslabšem:

$$|e| = \left| \frac{\widehat{u} \frac{\sin(\pi T_i/T)}{\pi T_i/T} - \widehat{u}}{\widehat{u}} \right| = 1 - \frac{|\sin(\pi T_i/T)|}{\pi T_i/T}$$

- pri integrirajočem ADP tekoča povprečna vrednost je enaka trenutni, ko je ta konstantna!

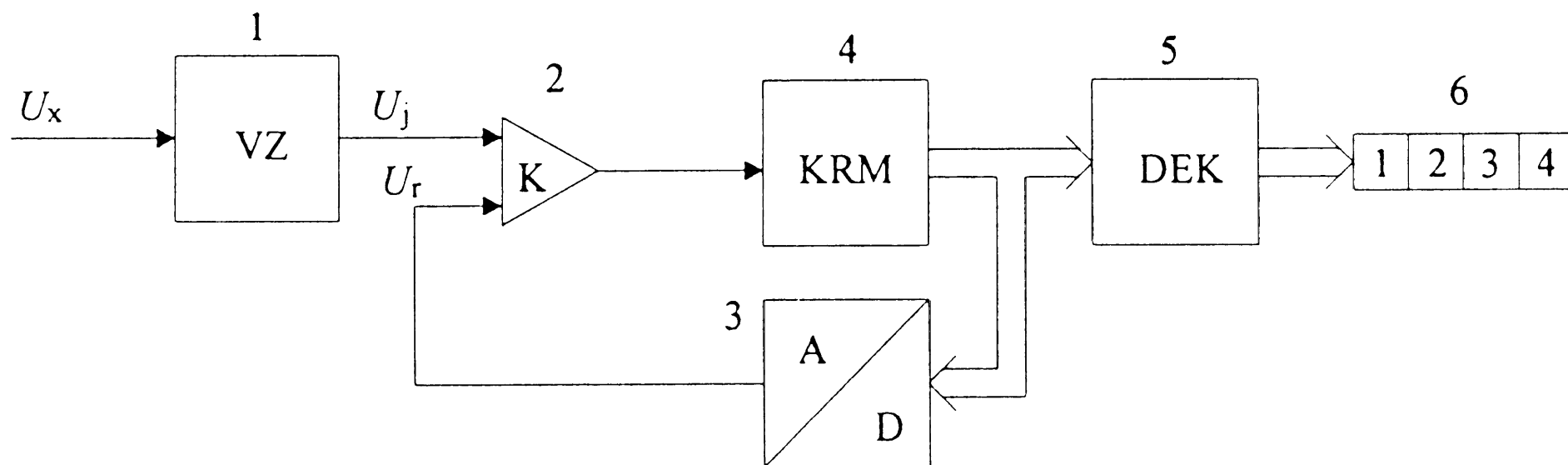




Vrste ADP

Pretvornik s postopnim približevanjem

(sukcesivna aproksimacija)



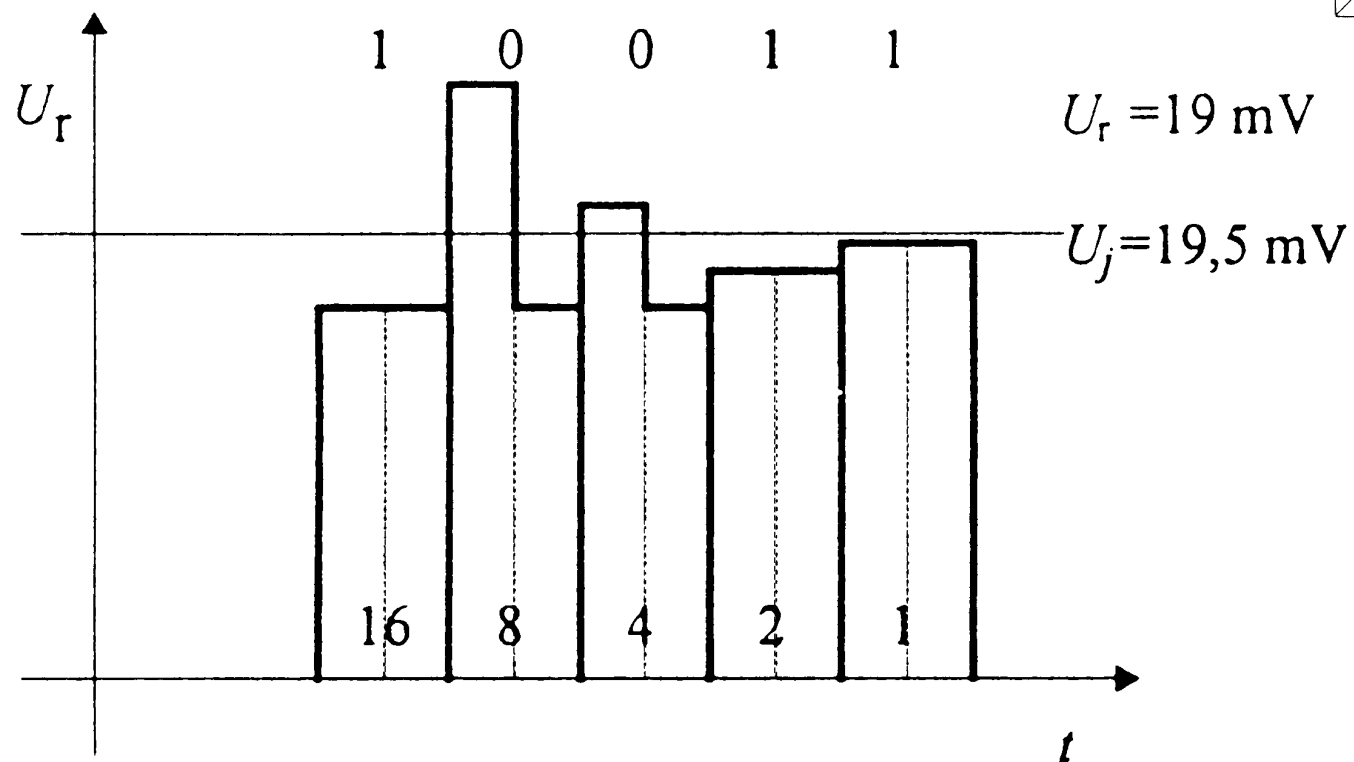
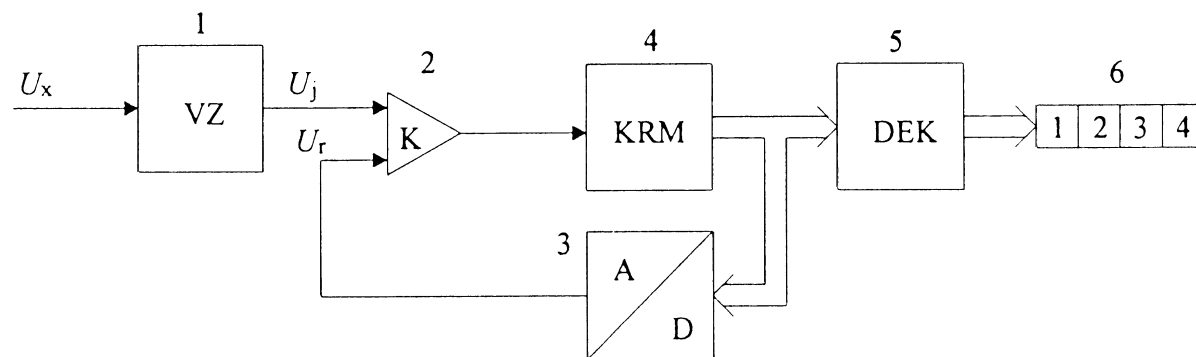
Slika 5.14 ADP s postopnim približevanjem

Zaradi trajanja AD pretvorbe imamo na vhodu **člen za vzorčenje in zadržanje**,



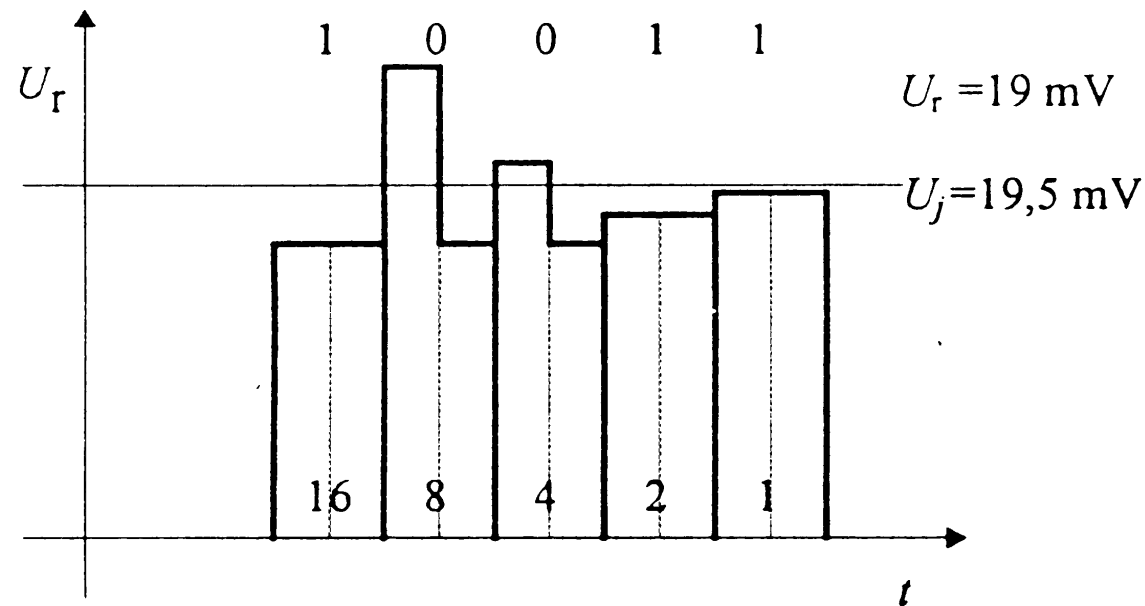


Napetost U_j primerjamo z znano U_r z **digitalno analognega pretvornika (DAP) v povratni zanki**, ki jo spreminjamo zaporedno z vedno manjšimi (**polovičnimi**) koraki.



Slika 5.15 Časovni potek postopnega približevanja





- krmilno vezje **najprej** postavi **bit z največjo vrednostjo** na ena (1000... ustreza $U_r \cong U_D/2$),
- komparator primerja neznano napetost U_j s trenutno vrednostjo referenčne napetosti U_r ,
- ker je **večja** $U_j > U_r$, se **postavljeni bit potrdi** in se preizkuša naslednji bit s pol manjšo utežjo itd.





Trajanje pretvorbe je **neodvisno** od merjene napetosti.

- če potrebuje n - bitni ADP za vzpostavitev enega bita čas τ ($\cong 1\mu\text{s}$), je **skupni čas** enak:

$$n\tau - n \text{ korakov } k = n,$$

- potrebno **število referenc:** $r = n$ (ena za vsak bit),

- $k \cdot r = n^2$

Dekoder pretvori binarno obliko v desetiško:

$$16 \text{ bitov} \cong 5 \text{ dekad}$$

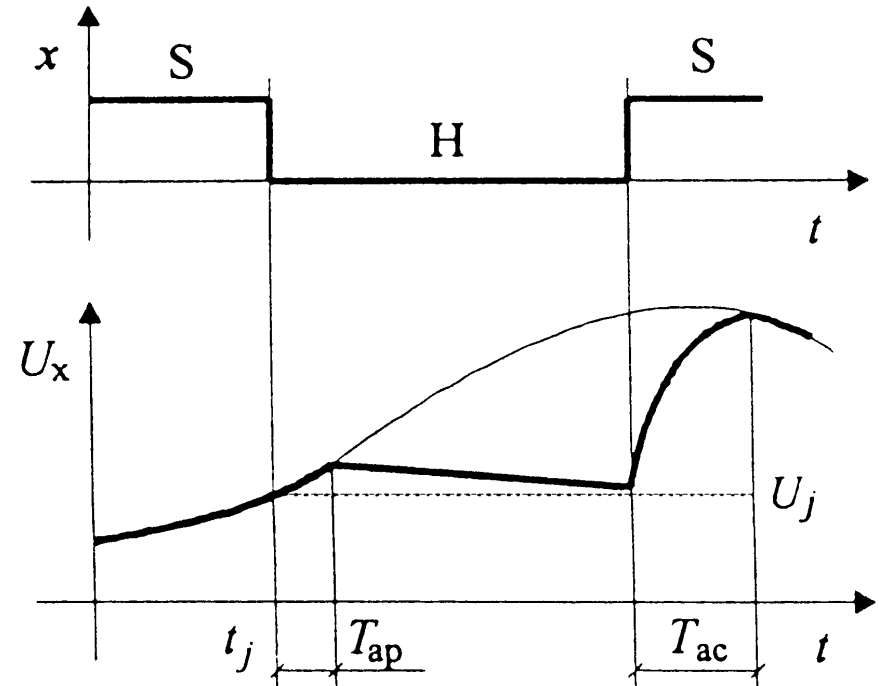
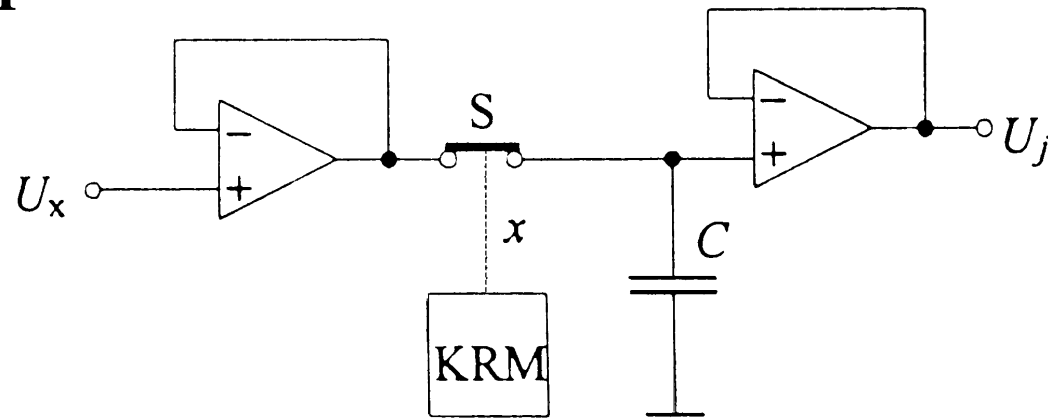
Pretvornik s postopnim približevanjem je **najboj razširjen** v industrijskem okolju: 16 bitov/1MHz, 12 bitov/80MHz,...





Člen za vzorčenje in zadržanje

Ojačevalniki omogočajo
impedančno ločitev.

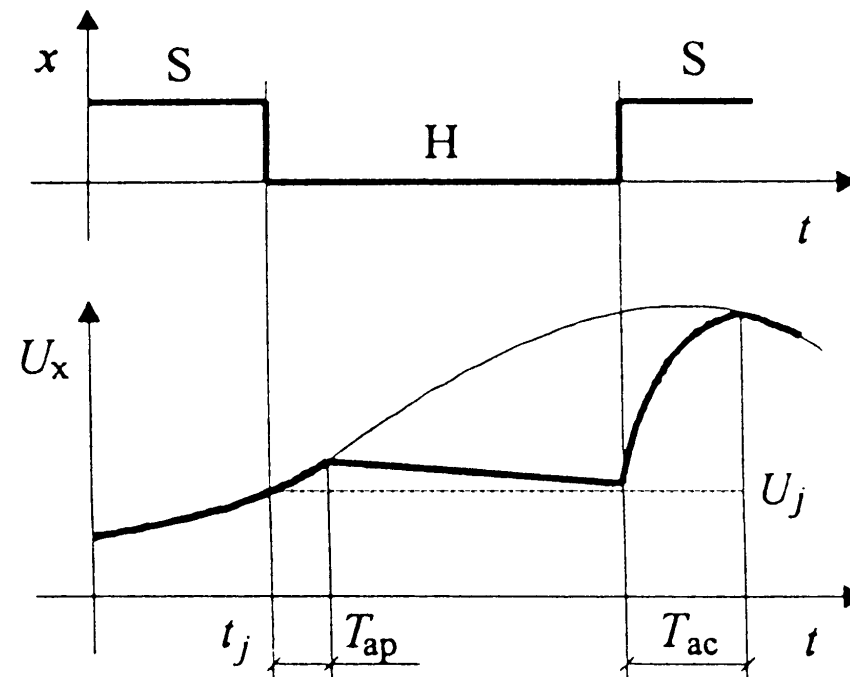
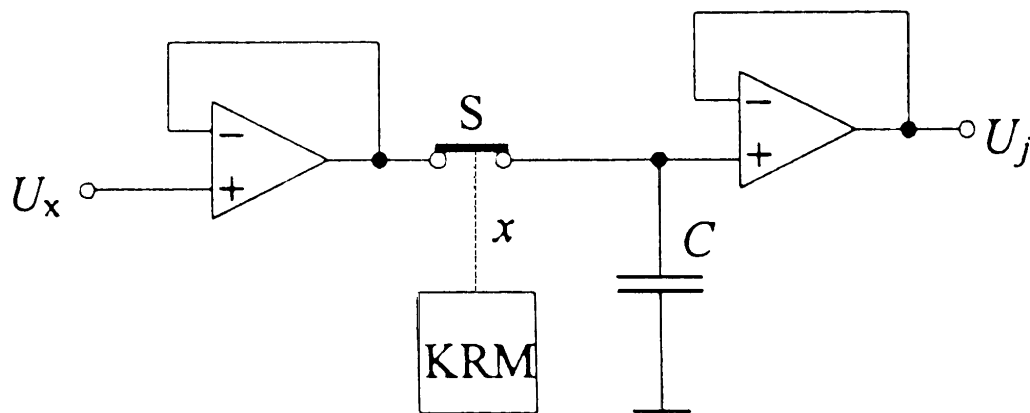


Slika 5.16 Člen za vzorčenje in zadržanje

V trenutku t_j nastopi **ukaz zadrži** (H - hold),

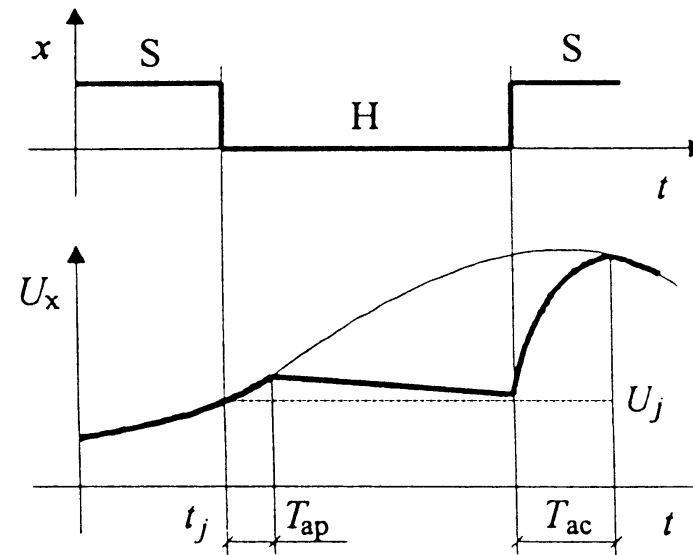
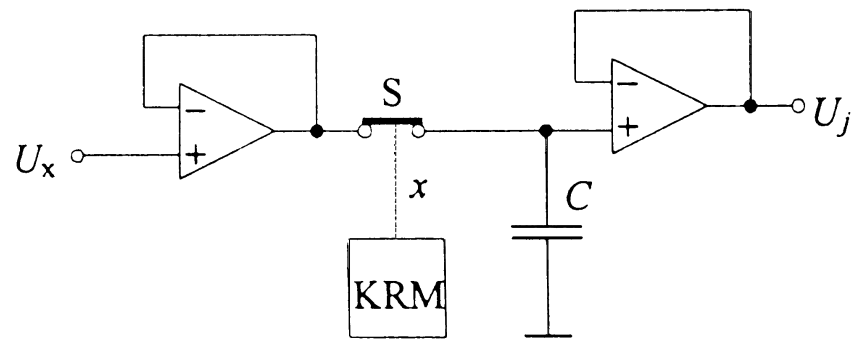
- stikalo S se odpre in kondenzator C bi naj zadržal vrednost trenutne napetosti U_j !





- stikalo potrebuje **aperturni čas** T_{ap} (lat. aperire - odpreti), da se odpre (nekaj nanosekund) - imamo **časovni zamik**.
- **napetost** na kondenzatorju zaradi končnih upornosti **upada** – imamo **upad napetosti** (drop rate).





Ko nastopi **ukaz vzorči** (S - sample) začne V/Z člen slediti signalu,

- stikalo se sklene in napetost na kondenzatorju sledi signalu preko prvega ojačevalnika,
- V/Z člen potrebuje **akvizicijski čas** T_{ac} (lat. *acquirere* - pridobiti), da doseže signal v mejah toleranc. $T_{ac} \approx 50T_{ap}$
- mejna **vzorčna frekvenca**: $f_s \leq 1/(T_{ac} + T_{ap})!$





Največja dopustna sprememba vhodne napetosti v času pretvorbe T_c naj bo manjša od ločljivosti ADP:

$$\left| \frac{dU_x}{dt} \right|_{\max} = \frac{U_D}{2^n T_c} \quad U_D - \text{doseg ADP}$$

- če je na vходу **sinusna napetost:**

$$u_x = \hat{u} \sin \omega t \quad \Rightarrow \quad \left| \frac{du_x}{dt} \right|_{\max} = \omega \hat{u}$$

- kadar je **ADP polno izkoriščen** $\hat{u} = \frac{U_D}{2}$, je **največja frekvenca signala** (vsi biti ADP so verodostojni) :

$$2\pi f \hat{u} = \frac{U_D}{2^n T_c} \quad \Rightarrow \quad f = \frac{1}{2^n \pi T_c}$$





Zgled:

- Kolikšna je največja dopustna časovna sprememba vhodne napetosti pri 12-bitnem ADP?

- $U_D = 10 \text{ V}, T_c = 10 \mu\text{s}$

- $\left. \frac{du}{dt} \right|_{\max} = \frac{U_D}{2^n T_c} = \frac{10 \text{ V}}{2^{12} 10 \mu\text{s}} = 244 \text{ V/s}$

- Koliko je največja dopustna frekvenca?

- $f = \frac{1}{2^n \pi T_c} = \frac{1}{2^{12} \pi 10 \mu\text{s}} = 7,8 \text{ Hz}$

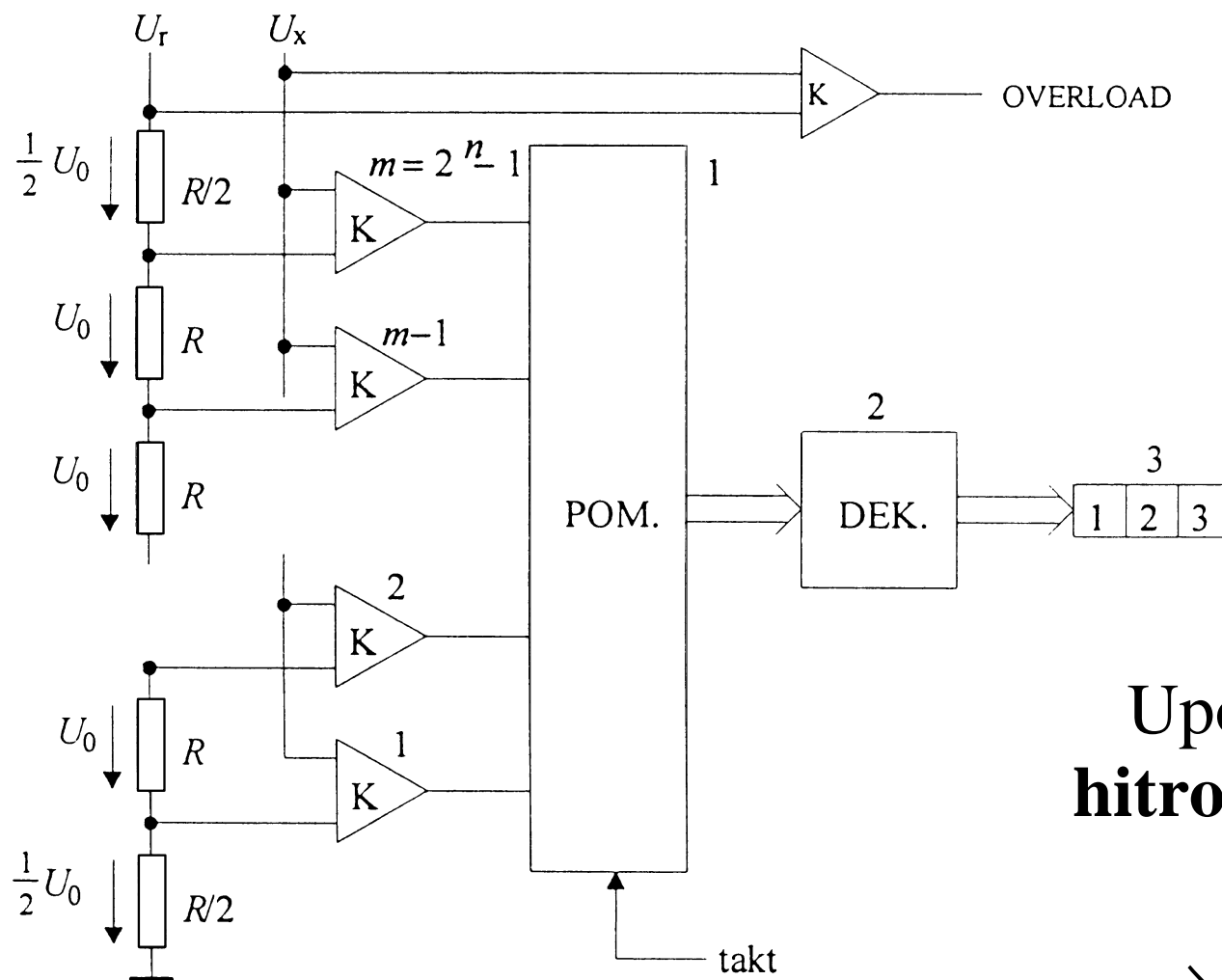
- Koliko je frekvenca, če ima V/Z-člen $T_{ap} = 5 \text{ ns}$?

- $f = \frac{1}{2^n \pi T_{ap}} = \frac{1}{2^{12} \pi 5 \text{ ns}} = 15,5 \text{ kHz}$





Paralelni trenutni pretvornik (flash converter)



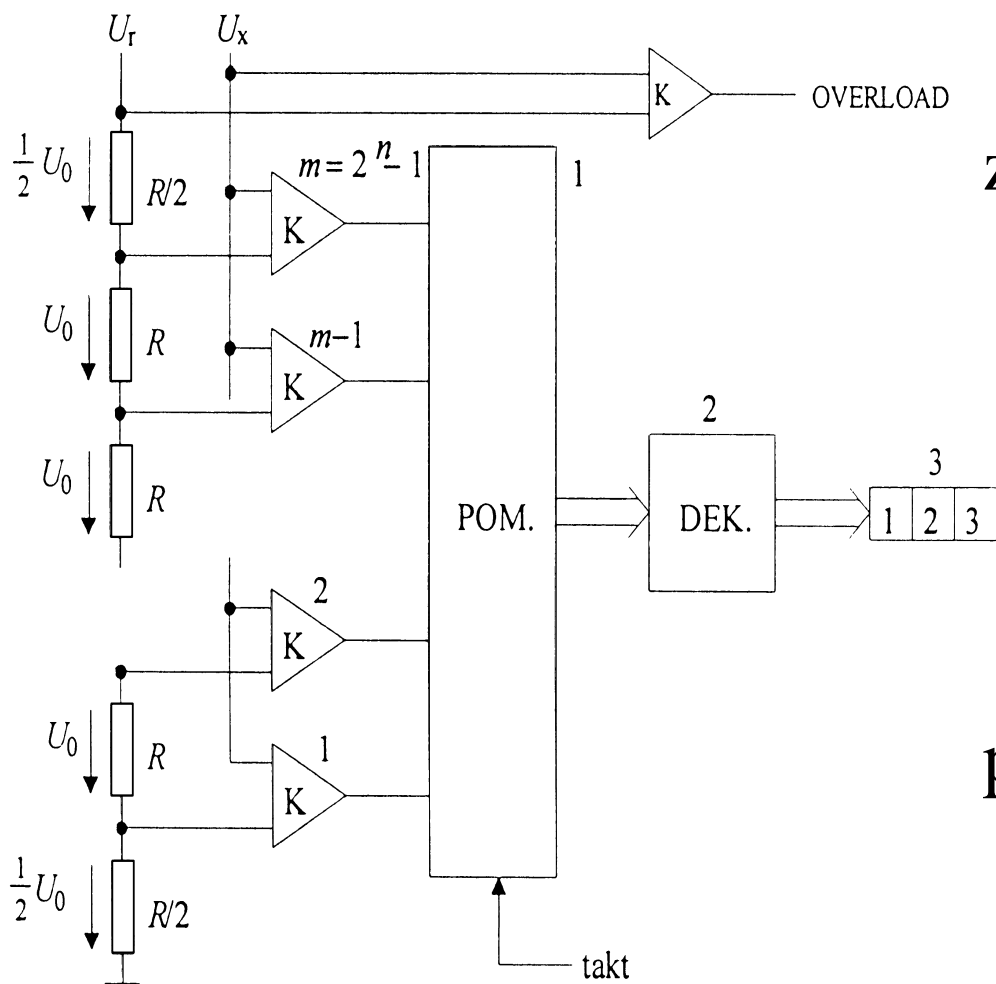
Slika 5.17 Paralelni pretvornik

Uporablja se za **zelo velike hitrosti** pretvarjanja

$$f_s > 1\text{GHz}$$

→ pretvoba se izvrši v **enem koraku** ($k = 1$).





Referenčne napet. so realizirane z uporovnim delilnikom.

- komparatorji pod nivojem napetosti U_x imajo vrednost 1 in nad 0 –

- termometerska koda.

Eksponentno se poveča poraba pri realizaciji:

- število potrebnih referenc in komparatorjev je $r = 2^n - 1 \rightarrow k \cdot r = 2^n - 1$

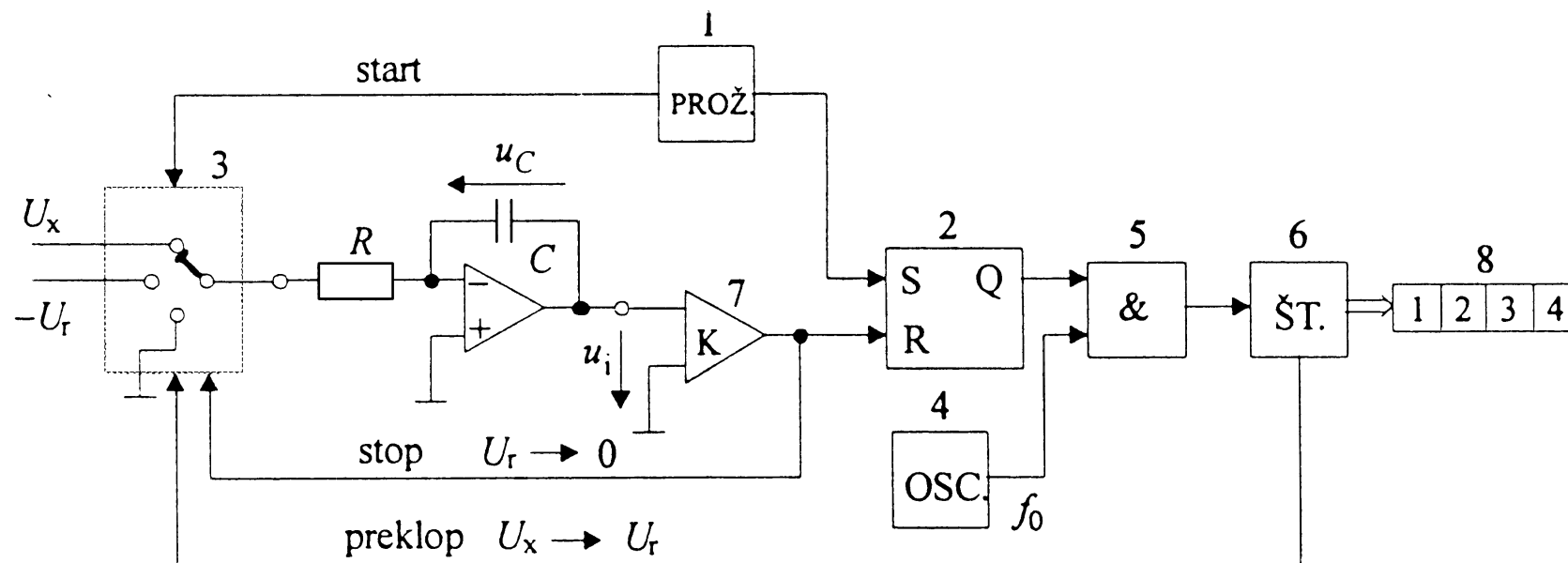
Postopek kvantizacije je pred vzorčenjem! 8 bit./10GHz





Integrirajoči ADP

Pretvornik z dvakratnim integriranjem ali **pretvornik z dvojnim naklonom**

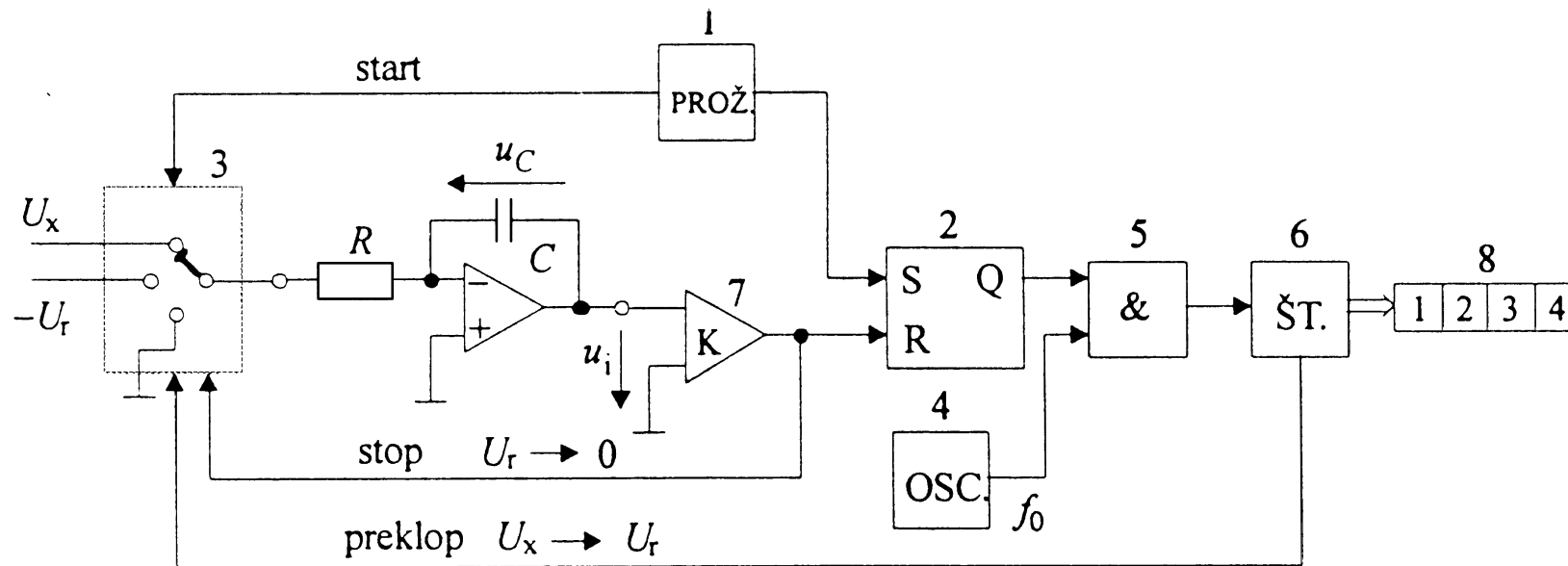


Slika 5.18 ADP z dvojnim naklonom

Merilni cikel se začne:

- ko prožilnik (1) postavi RS bistabilnega multivibratorja (2) v logično stanje ena,
- in preklopnik (3) v začetno stanje.





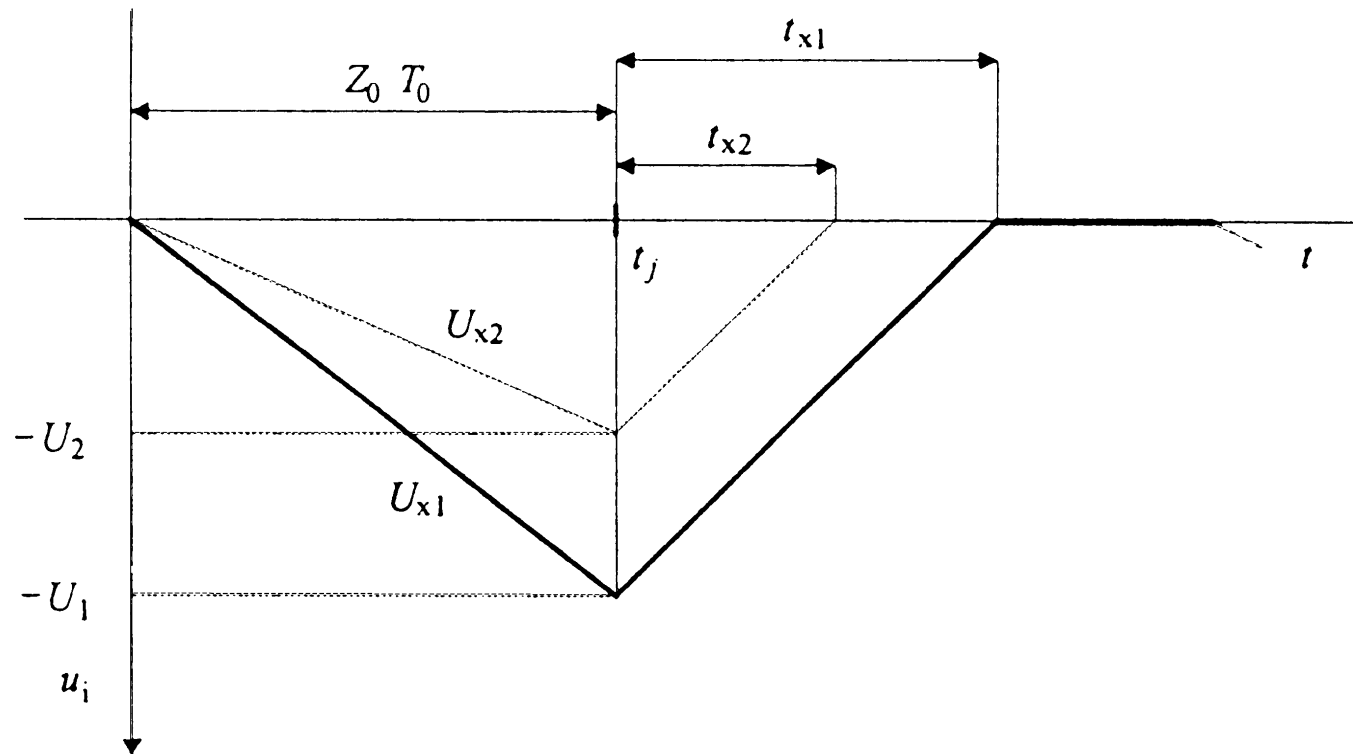
Začne se integracija neznane napetosti U_x z **integratorjem**:

- operacijski ojačevalnik z RC členom v povratni zanki

Impulzi referenčnega oscilatorja f_0 gredo skozi odprta IN vrata (5) na števec (6).

- ko se napolni z Z_0 impulzi, se konča integracija U_x ,
- **čas integracije** napetosti U_x je enak $Z_0 T_0 = Z_0 / f_0$,



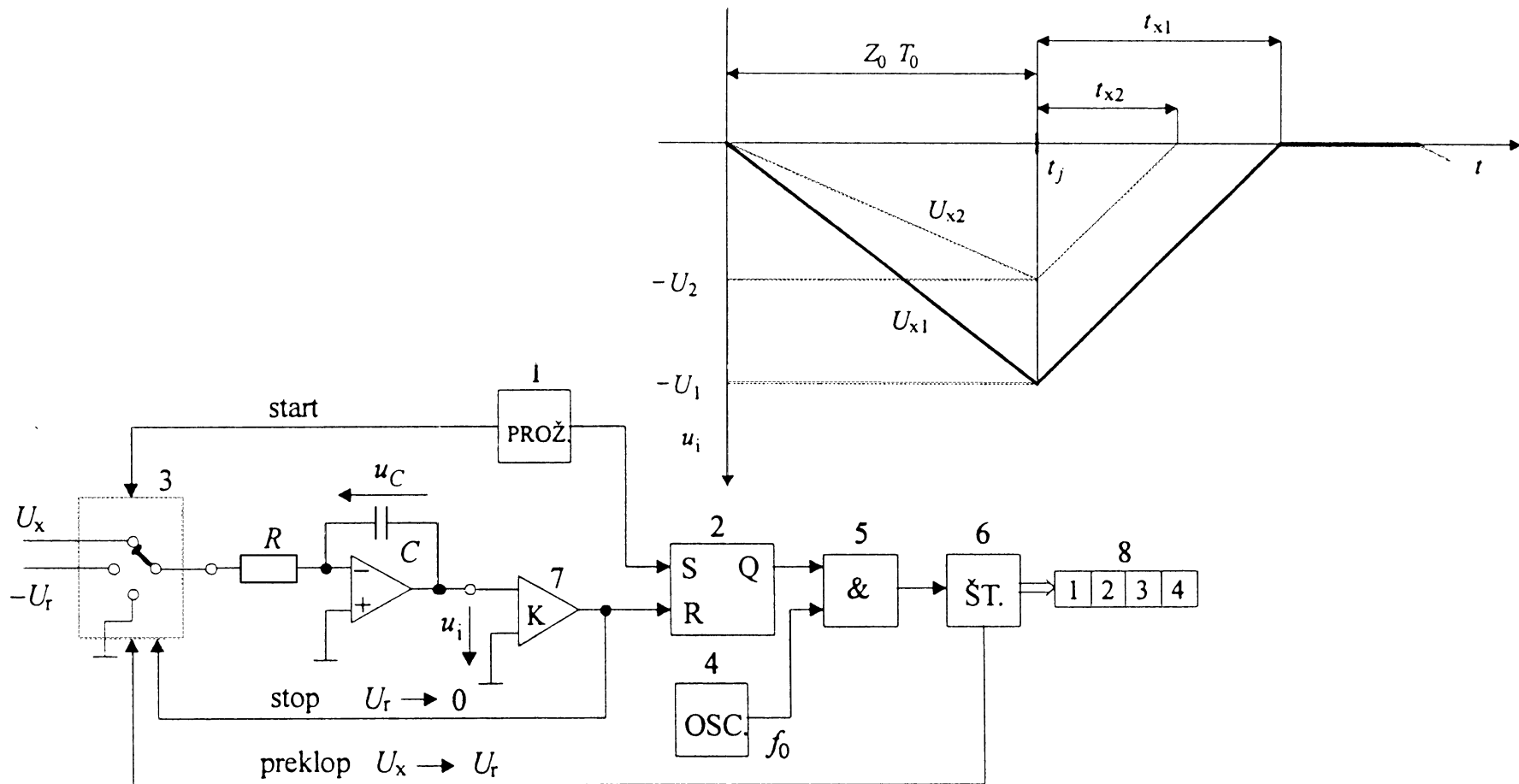


Slika 5.19 Časovni diagram ADP z dvojnimi naklonoma

Po času $Z_0 T_0$ se stikalo (3) preklopi na U_r ,

- referenčna napetost U_r mora biti **nasprotne polaritete**, da se spremeni tendenca integracije.





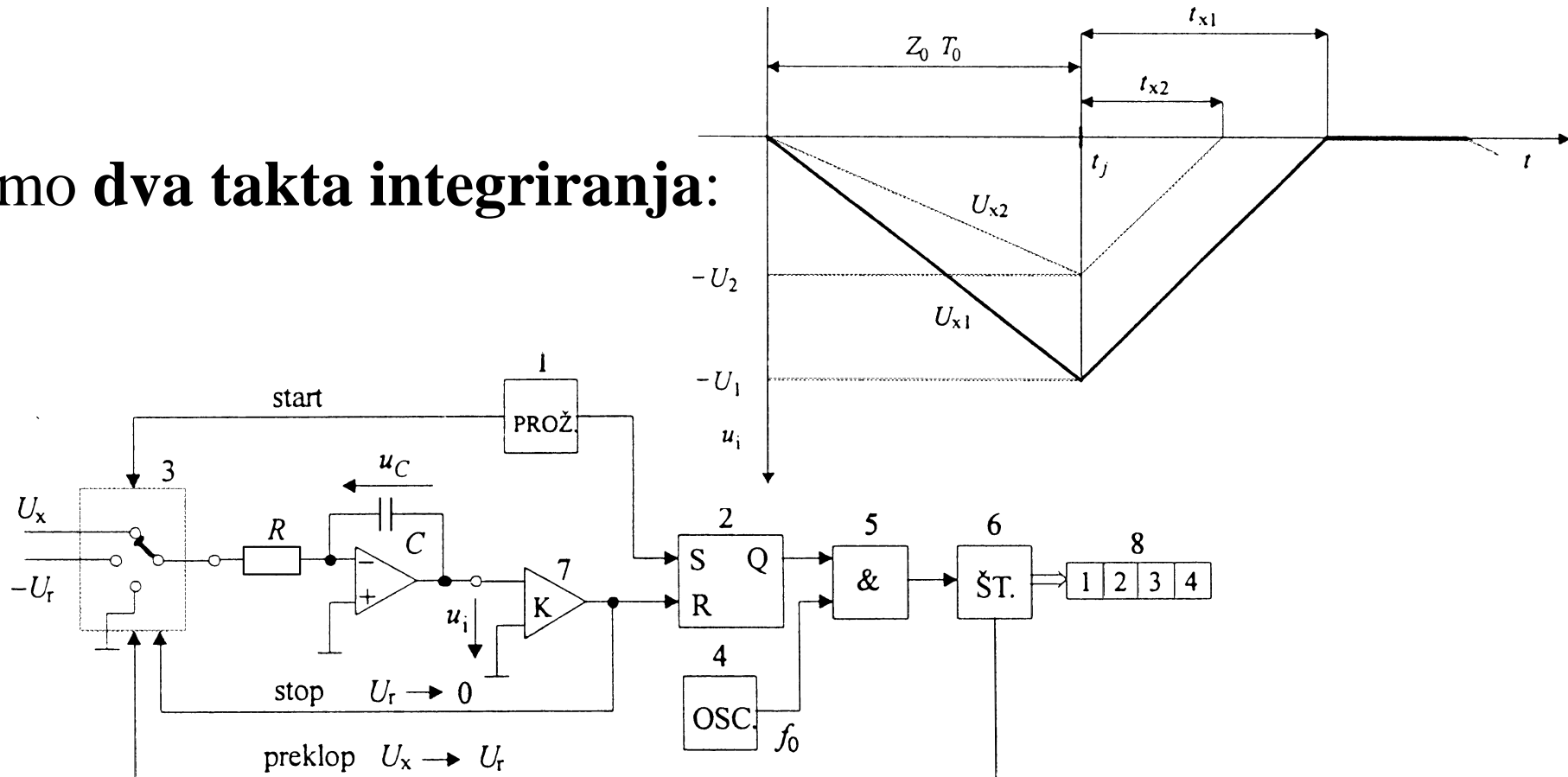
Ko napetost u_i doseže **nivo nič**, komparator (7) resetira flip-flop (2), vrata se zaprejo in **meritev se ustavi**.

- na vhodu je napetost nič,
- ADP čaka na nov merilni cikel.





Imamo dva takta integriranja:



Za prvi takt velja: - napetost na C:

$$u_i \approx u_C$$

- vsota tokov na vhodu integ.:

$$\frac{U_x}{R} + C \frac{du_i}{dt} = 0$$

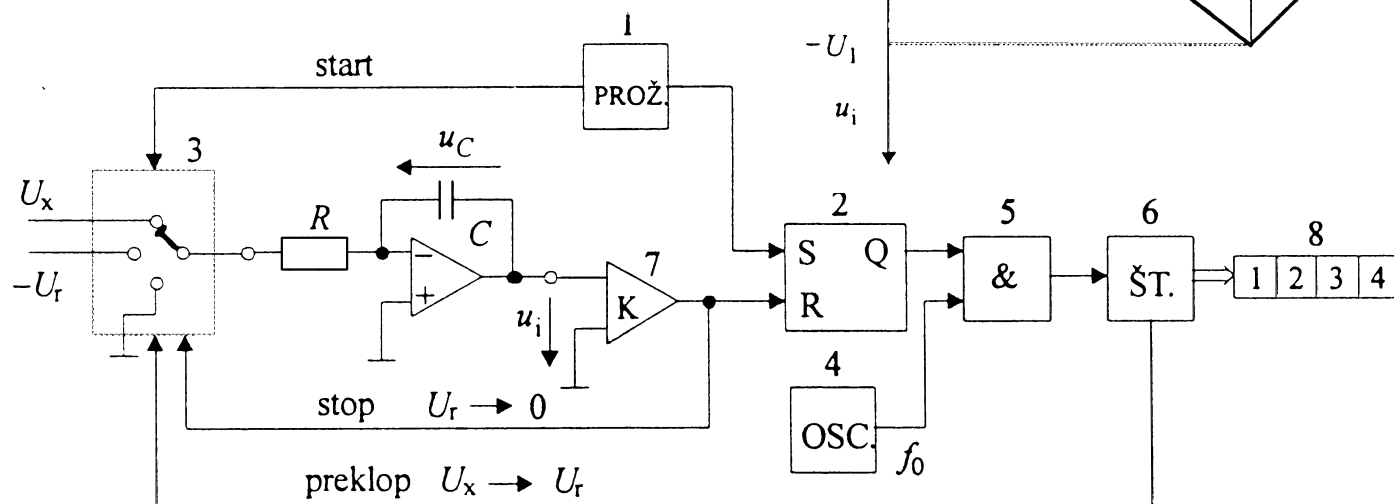
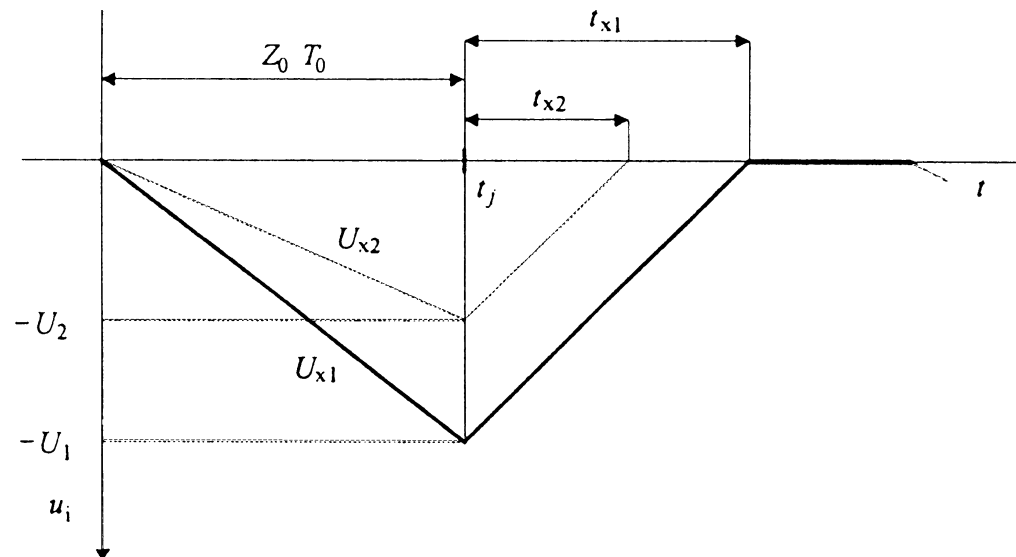
- integracija:
$$\int_0^{-U_1} du_i = -\frac{1}{RC} \int_{t_i - Z_0 T_0}^{t_j} U_{x1} dt \Rightarrow U_1 = \frac{Z_0 T_0}{RC} \bar{U}_{x1}$$





Za drugi takt velja:

- integrira se napetost $-U_r$



- vsota tokov na vhodu integ.:

$$-\frac{U_r}{R} + C \frac{du_i}{dt} = 0$$

- naklon izhodne napetosti:

$$\frac{du_i}{dt} = \frac{1}{RC} U_r$$

- integracija: $\int_{-U_1}^0 du_i = \frac{1}{RC} \int_{t_j}^{t_j+t_{x1}} U_r dt \Rightarrow U_1 = \frac{t_{x1}}{RC} U_r$





Izenačenje napetosti obeh integracij nam da:

$$t_{x1} = \frac{Z_0 T_0}{U_r} \bar{U}_{x1} ; \quad \text{ker je } Z = \frac{t_{x1}}{T_0}, \text{ dobimo:} \quad Z = \frac{Z_0}{U_r} \bar{U}_{x1}$$

- točnost pretvornika **ni odvisna** od R in C pa tudi f_0 ne

Vmesna veličina pri ADP pretvorniku je čas (t_{x1}, t_{x2})

- **časovno** oz. frekvenčno **kodiranje**.
- možnost **izločanja** motilnega **izmeničnega signala** s povprečenjem – integracijo.
- **hitrost** pretvarjanja **ni velika**.

Zelo razširjena uporaba, še posebej v **precizni instrumentaciji**.

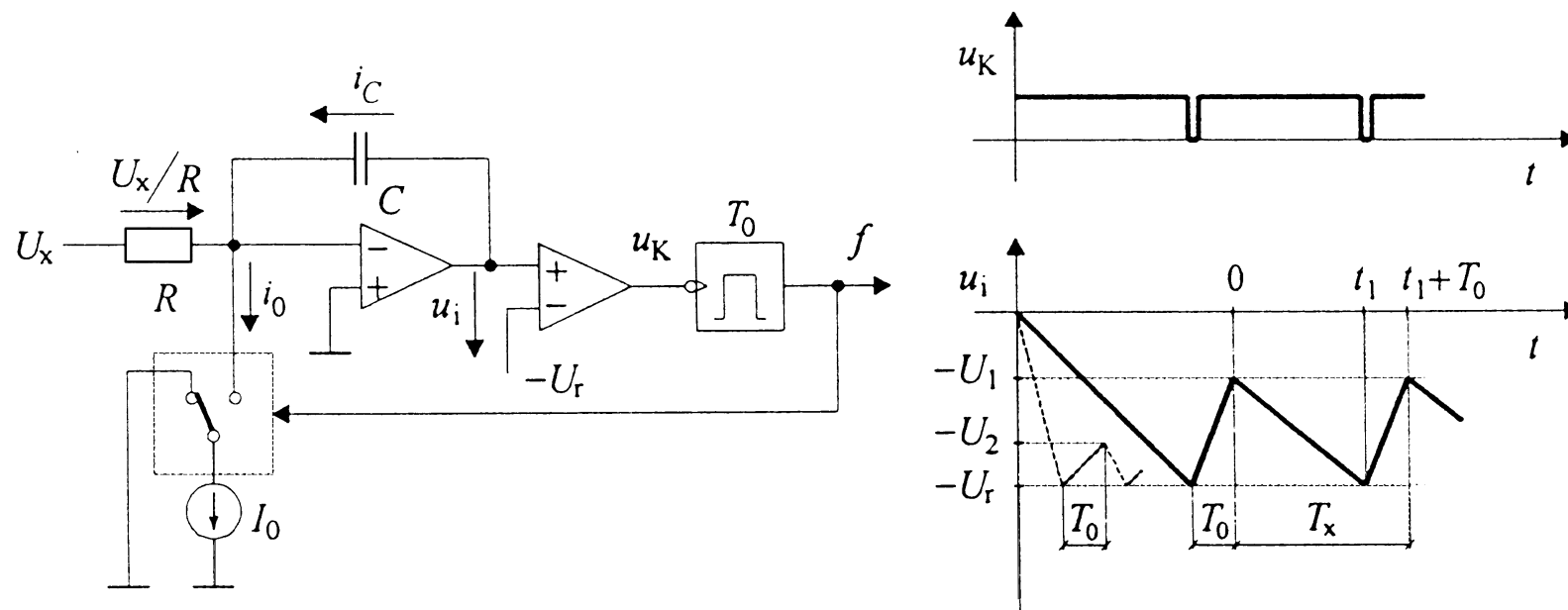
Obstajajo pretvorniki z **več nakloni**.





ADP s frekvenco kot analogno vmesno veličino

U/f pretvornik deluje na principu **izenačevanja naboja** (charge balance).

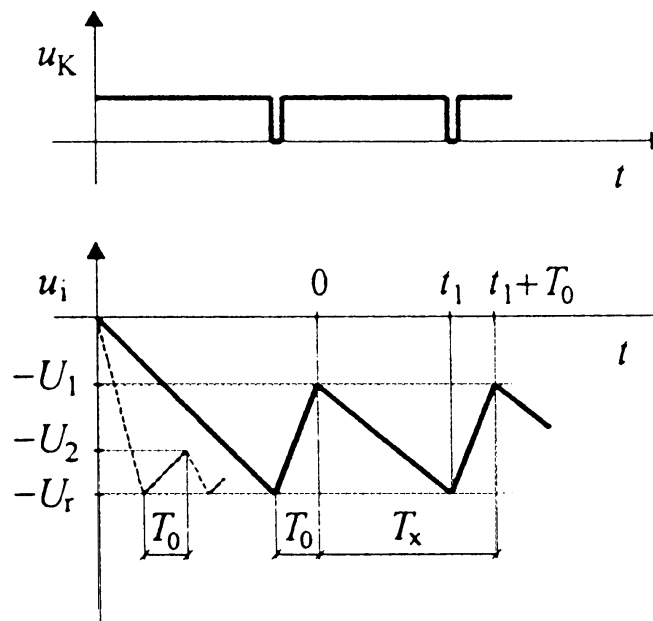
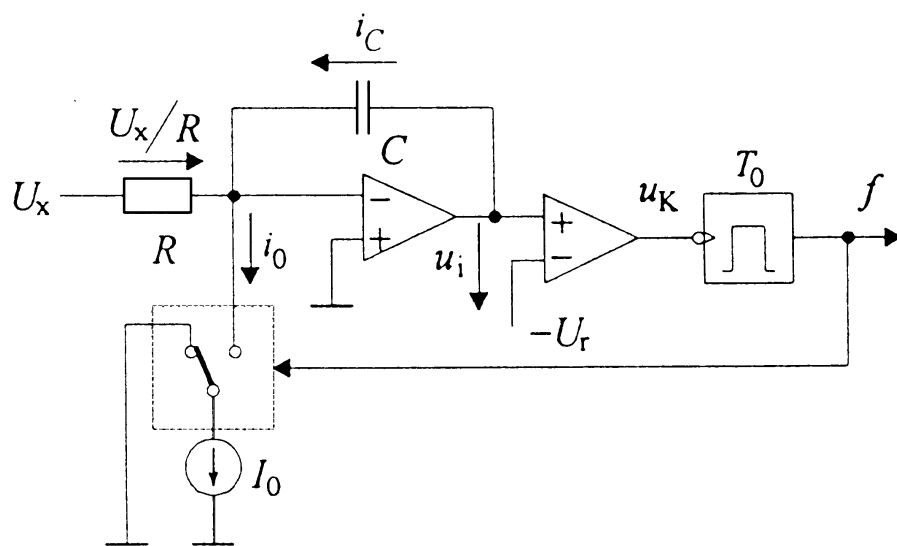


Slika 5.20 U/f pretvornik na principu izenačevanja naboja

V **prvem delu** integracije imamo samo tok U_x/R (in i_C),

- napetost u_i monotonno upada.





Ko doseže referenčni nivo $-U_r$,

- se sproži monostabilni multivibrator,
- za čas T_0 se priklopi **referenčni vir I_0** - **drugi del integracije**

$$\frac{U_x}{R} - I_0 + C \frac{du_i}{dt} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{du_i}{dt} = \frac{1}{C} \left(I_0 - \frac{U_x}{R} \right)$$





Napetost integratorja **niha med vrednostima** $-U_1$ in $-U_r$:

$$\int_{-U_1}^{-U_r} du_i + \int_{-U_r}^{-U_1} du_i = 0 = -\frac{1}{RC} \int_0^{t_1} U_x dt + \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_1+T_0} \left(I_0 - \frac{U_x}{R} \right) dt$$

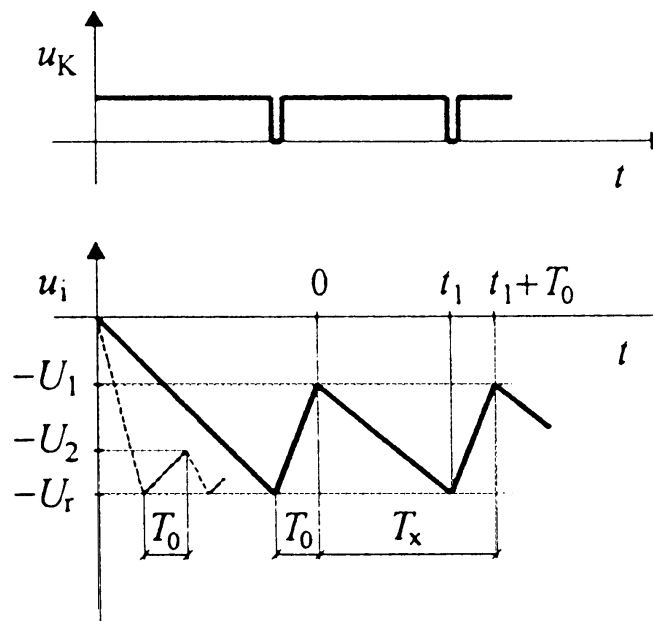
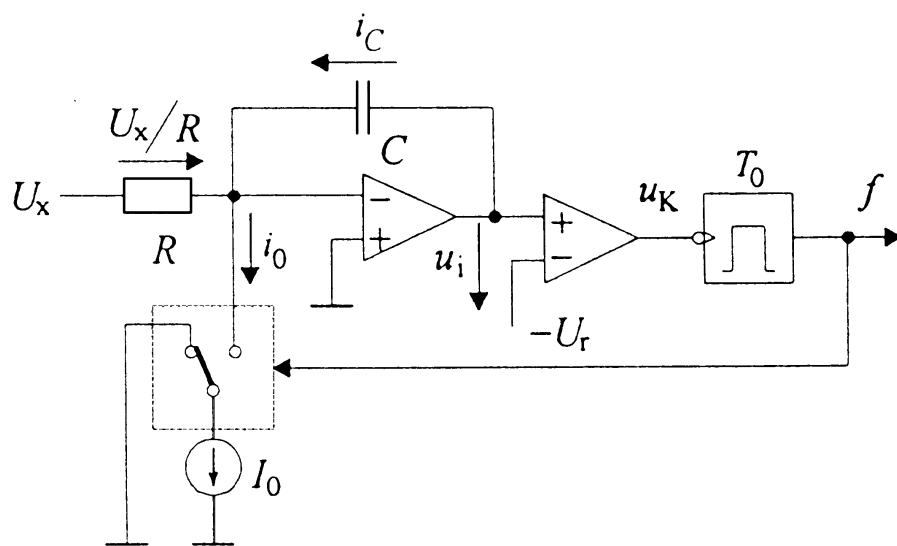
in dobimo:
$$\frac{I_0 T_0}{C} = \frac{1}{RC} \int_0^{t_1} U_x dt + \frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_1+T_0} U_x dt = \frac{1}{RC} \int_0^{t_1+T_0} U_x dt$$

Iz
$$I_0 T_0 = \frac{T_x}{R} \frac{1}{T_x} \int_0^{t_1+T_0} U_x dt = \frac{1}{R f_x} \bar{U}_x \quad (T_x = t_1 + T_0) \quad \text{izrazimo}$$

frekvenco ponavljanja:

$$f_x = \frac{1}{R I_0 T_0} \bar{U}_x$$





$$f_x = \frac{1}{RI_0T_0} \bar{U}_x$$

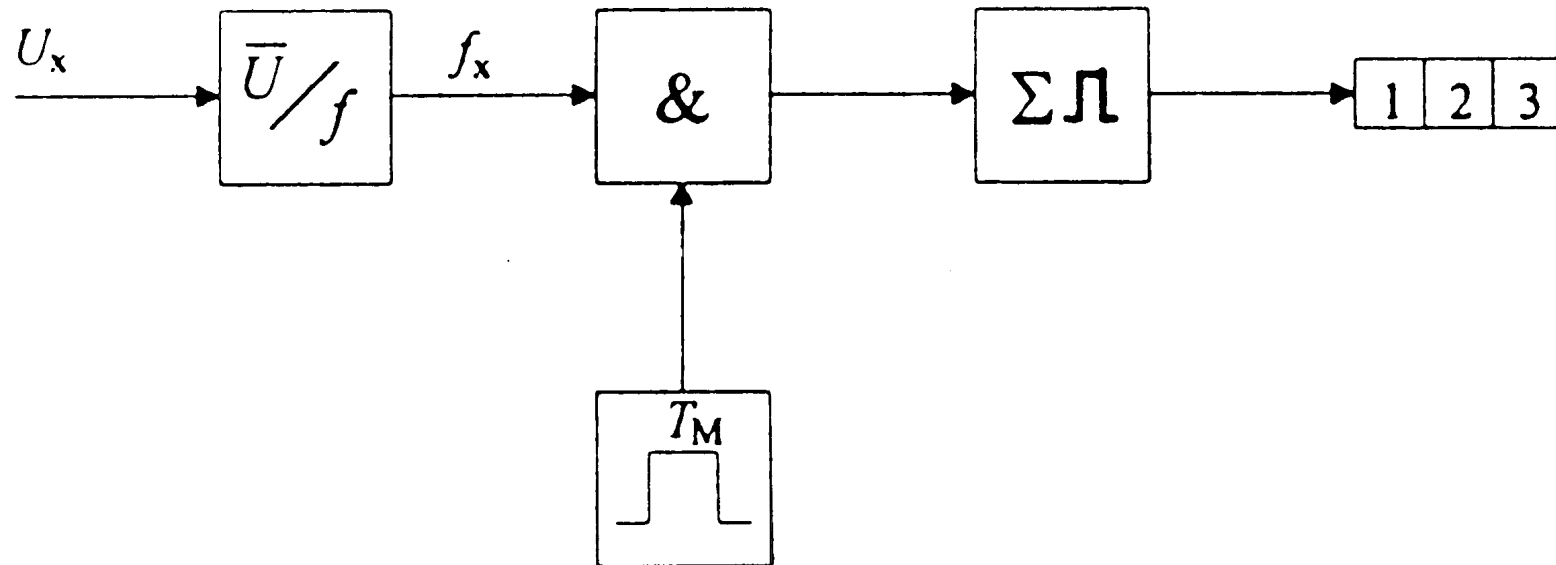
V prvem delu integracije priteče toliko elektrine na kondenzator C , kot jo v drugem odteče – **izravnava naboja**.

- **frekvenca** žagaste napetosti je odvisna od **tekoče povprečne vrednosti** merjene napetosti.





Digitalizacija se izvrši s **štetjem impulzov frekvence**, ki nosi informacijo o povprečni moči.



Slika 5.21 Digitalno merjenje frekvence oziroma napetosti

- IN vrata se odpro za določen čas T_M .
- Na števec pride $Z = f_x T_M$ **impulzov**, ki jih **števec prešteje** in **prikaže** na prikazovalniku.

