

Merenja

7. predavanje

Osnovni strujni krugovi iz analogne elektronike

Strujni krugovi koji će se prikazati, javljaju se u mnogim instrumentima i mernim spojevima.

Operacioni pojačavači

Realni operacioni pojačavači imaju sledeće osnovne karakteristike:

- veliku ulaznu impedansu (red veličina $M\Omega$ - $G\Omega$)
- malu izlaznu impedansu
- veliko naponsko pojačanje ($A_0 = 10^4$ - 10^7 odnosno 80 - 140 dB)

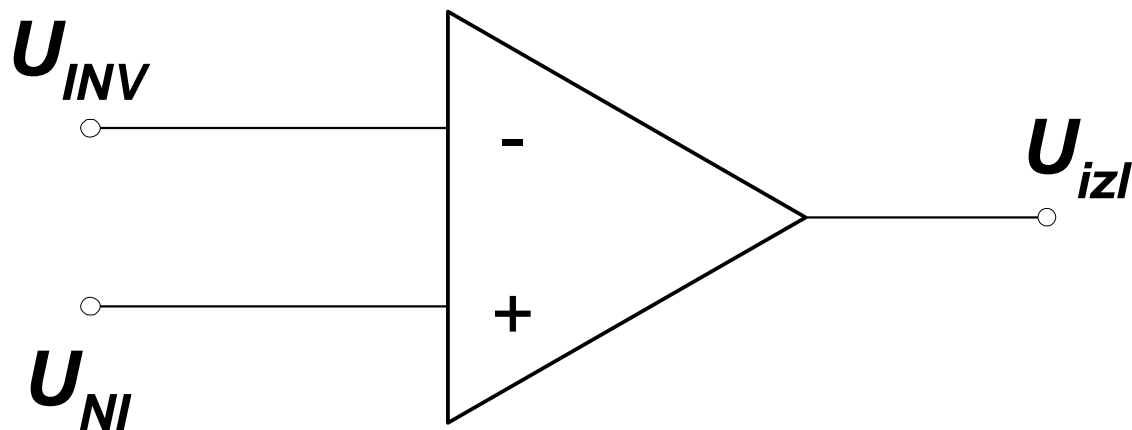
Ove karakteristike približavaju se karakteristikama idealnih operacionih pojačavača

- ulazna impedansa $R_{ul} = \infty$
- mala izlazna impedansa $R_{izl} = 0$
- veliko naponsko pojačanje $A_0 = \infty$

Danas se operacioni pojačavači proizvode jeftino, malih dimenzija, u velikim serijama, i izuzetno su pouzdani. Potrebno im je napajanje. Operacioni pojačavači imaju dva ulaza: neinvertujući (obeležava se sa „+” ili *NI*) i invertujući (obeležava se sa „-” ili *INV*). Osnovna namena im je da pojačavaju razliku napona na svojim ulazima, dajući na izlazu napon U_{izl} .

$$U_{izl} = A_0 (U_{NI} - U_{INV})$$

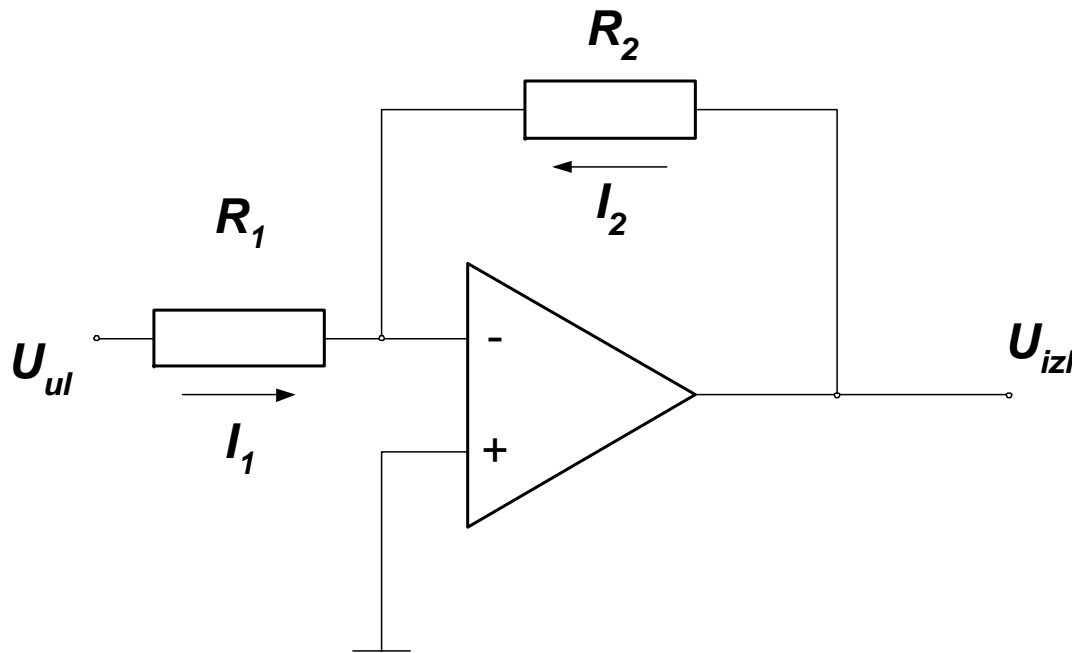
Operacioni pojačavač može da se upotrebljava i tako da se jedan ulaz veže na masu, a da se na drugi ulaz dovodi napon koji se pojačava. Pozitivni napon na neinvertujućem ulazu proizvodi pozitivni napon na izlazu, dok pozitivan napon na invertujućem ulazu, proizvodi negativni napon na izlazu.



Pomoću operacionih pojačavača mogu se realizovati strujni krugovi različitih osobina. Između ostalog: invertujući pojačavač, neinvertujući pojačavač, diferencijalni pojačavač, sabirač signala, sleditelj napona, integrator, diferencijator, razni filteri, komparator, komparator sa histerezisom, kolo za uzorkovanje, pretvarač struje u napon, pretvarač napona u struju, pojačavač struje itd...

Invertujući pojačavač

Kod invertujućeg pojačavača napon koji se pojačava, dovodi na invertujući (-) ulaz operacionog pojačavača. Napon na njegovom izlazu, proporcionalan je naponu na ulazu, ali je obrnutog znaka.



Pretpostavljajući da je pojačanje operacionog pojačavača beskonačno veliko, napon između ulaznih krajeva će biti ravan nuli. Uz tu pretpostavku o idealnom operacionom pojačavaču, napon na neinvertujućem ulazu pojačavača će biti 0 V, pa su struje na otpornicima date sa:

$$I_1 = \frac{U_{ul}}{R_1} \quad I_2 = \frac{U_{izl}}{R_2}$$

Kako je ulazna impedansa idealnog operacionog pojačavača beskonačno velika, u (-) ulaz pojačavača neće teći nikakva struja, pa su struje I_1 i I_2 jednake po veličini a suprotnog su polariteta:

$$I_1 = -I_2$$

Zamenom, dobija se pojačanje invertujućeg pojačavača:

$$U_{izl} = -\frac{R_2}{R_1} U_{ul} \quad A = \frac{U_{izl}}{U_{ul}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

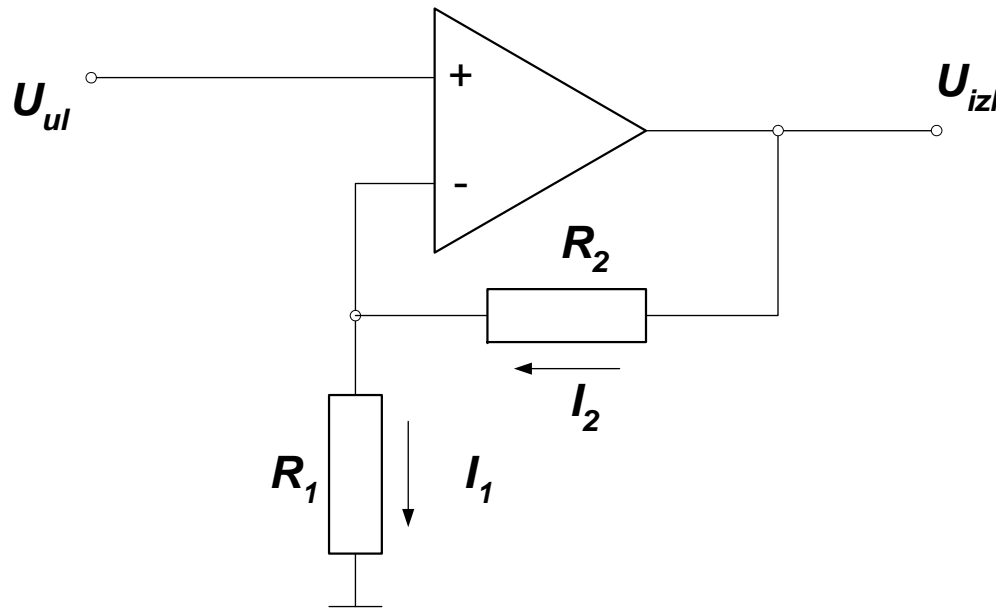
Znak (-) u izrazu za pojačanje, pokazuje faznu inverziju.

Odgovarajućom kombinacijom R_1 i R_2 može da se dobije bilo koja vrednost pojačanja A pa čak i vrednost manja od 1. Značajno je uočiti da pojačanje invertujućeg pojačavača zavisi samo od vrednosti otpornosti R_1 i R_2 .

Ulazna impedansa invertujućeg pojačavača sa idealnim operacionim pojačavačem jednaka je otporu R_1 , a izlazna impedansa je ravna nuli.

Neinvertujući pojačavač

Kod neinvertujućeg pojačavača napon koji se pojačava, dovodi se na neinvertujući (+) ulaz operacionog pojačavača. Napon na izlazu, srazmeran je naponu na ulazu, i istog je polariteta.



Uz pretpostavku da je upotrebljeni operacioni pojačavač idealan, naponska razlika između (+) i (-) ulaza operacionog pojačavača će biti ravna nuli, te će na oba ulaza operacionog pojačavača postojati napon U_{ul} . Napon U_{ul} na invertujućem ulazu operacionog pojačavača može se izračunati uzimajući da su R_1 i R_2 vezani kao potencijometar:

$$U_{ul} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{izl}$$

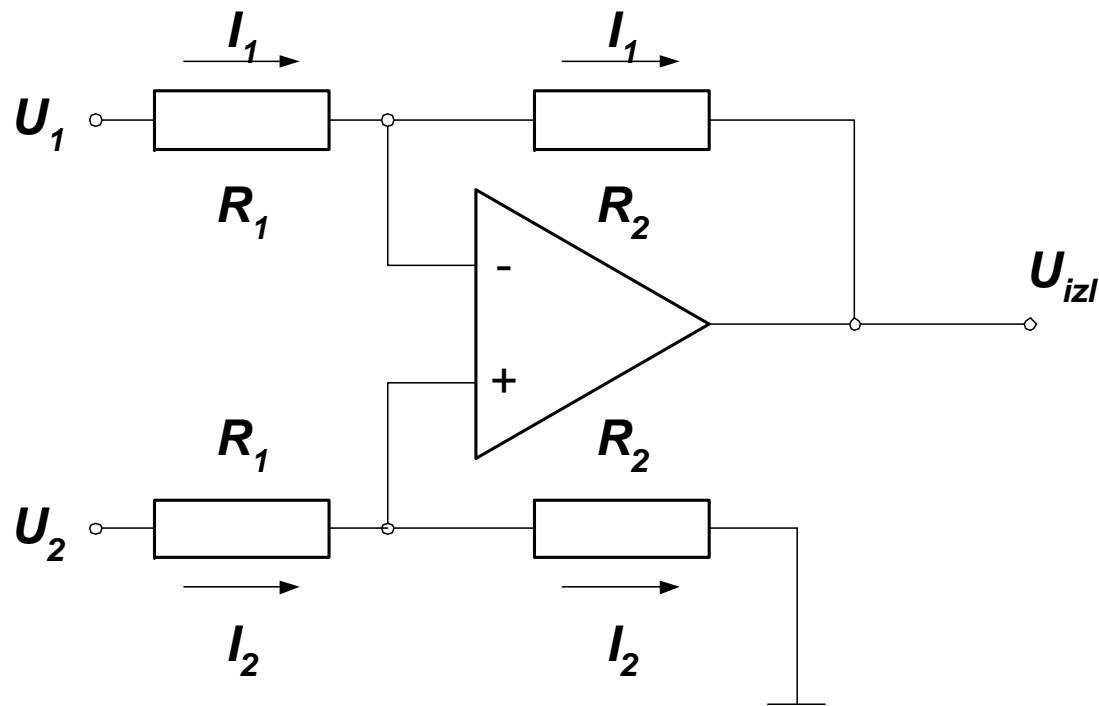
Iz ove jednačine može se odrediti pojačanje neinvertujućeg pojačavača kao:

$$U_{izl} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} U_{ul}$$

$$A = \frac{U_{izl}}{U_{ul}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Diferencijalni pojačavač

Kod diferencijalnog pojačavača se na oba ulaza operacionog pojačavača dovode ulazni signali. Napon na njegovom izlazu je proporcionalan razlici napona na njegovim ulazima ukoliko je upotrebljen idealni operacioni pojačavač.



Rad ovog pojačavača može da se analizira primenjujući teoremu superpozicije. Izlazni napon U_{izl1} koji potiče od ulaznog signala U_1 (za $U_2 = 0$) je:

$$U_{izl1} = -\frac{R_2}{R_1} U_1$$

Izlazni signal U_{izl2} koji potiče od ulaznog signala U_2 (za $U_1 = 0$) je:

$$U_{izl2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_2 = \frac{R_2}{R_1} U_2$$

Prema teoremi o superpoziciji, ukupni izlazni napon ravan je zbiru napona koji potiču od dva ulazna signala kada oni deluju pojedinačno.

$$U_{izl} = U_{izl1} + U_{izl2}$$

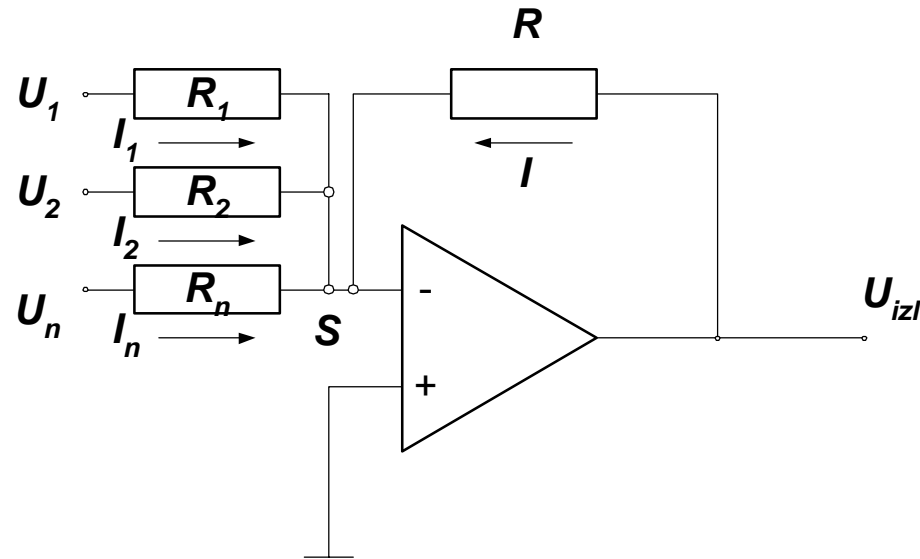
$$U_{izl} = \frac{R_2}{R_1} (U_2 - U_1)$$

Ako se kao ulazni signal smatra razlika napona ($U_2 - U_1$) onda je pojačanje diferencijalnog pojačavača data izrazom:

$$A_d = \frac{U_{izl}}{U_2 - U_1} = \frac{U_{izl}}{U_d} = \frac{R_2}{R_1}$$

Diferencijalni pojačavač pojačava razliku napona na svojim ulazima ne vodeći računa o punim vrednostima svakog od ulaznih napona.

Sabirajući pojačavač



Zbir struja u tački **S** je:

$$I_1 + I_2 + \dots + I_n + I = 0$$

$$\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \dots + \frac{U_n}{R_n} = -\frac{U_{izl}}{R}$$

Sređivanjem izraza:

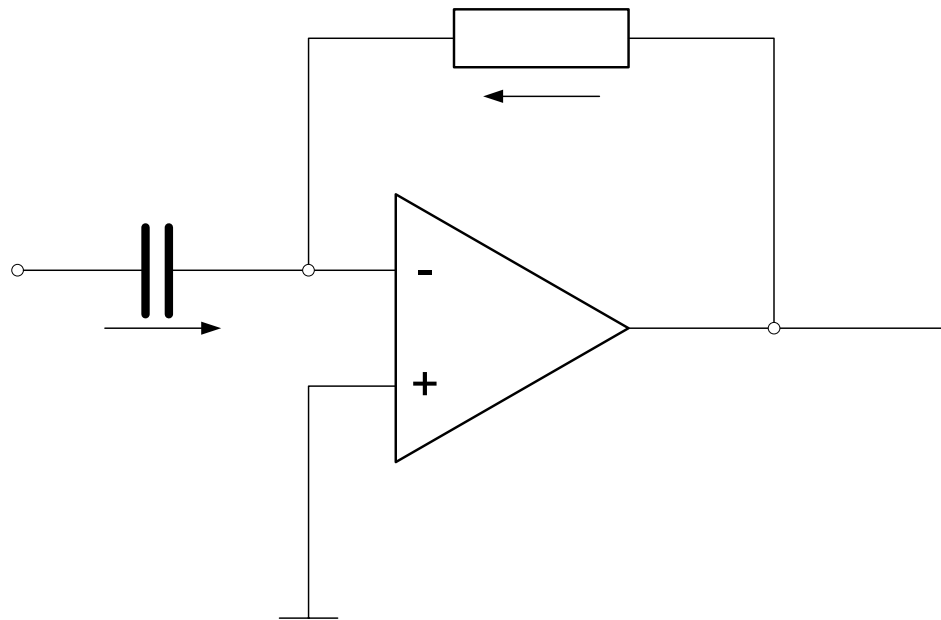
$$U_{izl} = - \left[\frac{R}{R_1} U_1 + \frac{R}{R_2} U_2 + \dots + \frac{R}{R_n} U_n \right]$$

dobijamo težinski zbir napona, gde je otpornost veći, napon učestvuje srazmerno manje u konačnom zbiru. Kod prostog sabirača, kada je $R_1 = R_2 = \dots = R_n$ imamo:

$$U_{izl} = - \sum_{x=1}^n U_x$$

Diferencijator

Diferencijator služi da obavlja matematičku operaciju diferenciranja. Napon na izlazu diferencijatora proporcionalan je diferencijalu napona koji se dovodi na ulaz diferencijatora.



Ukoliko je upotrebljeni operacioni pojačavač idealan, napon na ulazu (-) je 0 V. Struje koje teku kroz kondenzator i otpornik bile bi:

$$I_C = C \frac{dU_{ul}}{dt}$$

$$I_R = \frac{U_{izl}}{R}$$

Uz pretpostavku o idealnom operacionom pojačavaču, nikakva struja ne bi ulazila u (-) ulaz operacionog pojačavača, te su onda struje I_R i I_C jednake,

Zamenom u izrazima dobija se za izlazni napon:

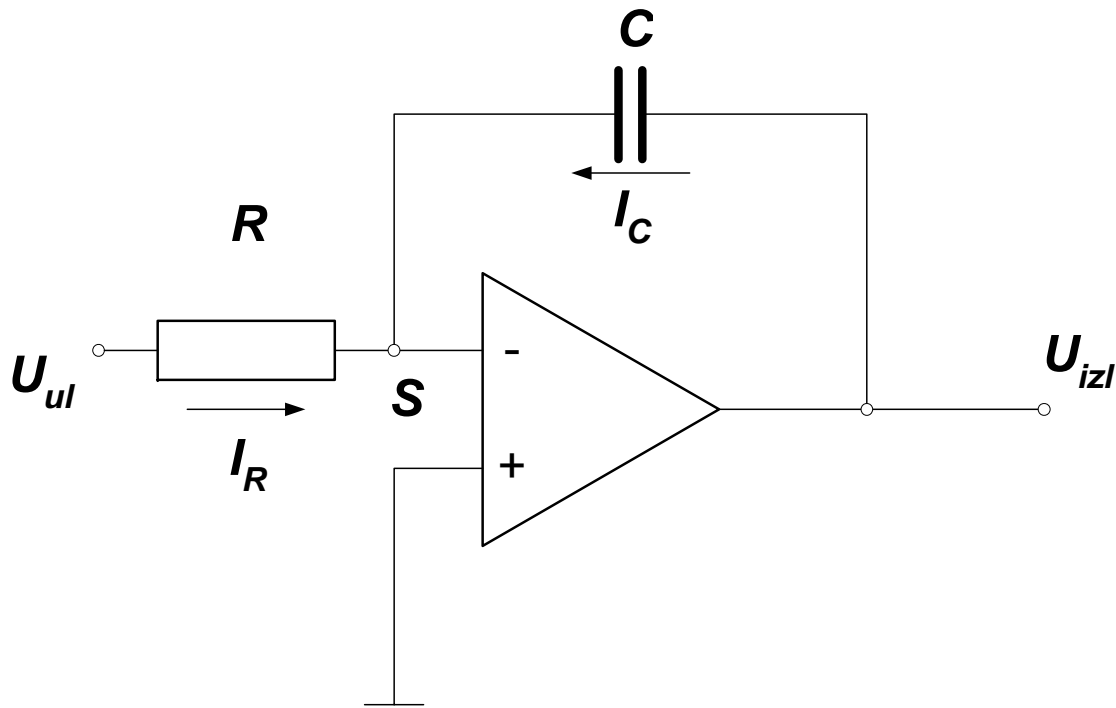
$$\frac{U_{izl}}{R} = -C \frac{dU_{ul}}{dt}$$
$$U_{izl} = -RC \frac{dU_{ul}}{dt}$$

Ukoliko se elementi R i C izaberu tako da je $RC = 1$ onda će izlazni napon biti jednak diferencijalu ulaznog napona:

$$U_{izl} = -\frac{dU_{ul}}{dt}$$

Integrator

Integrator služi da obavlja matematičku operaciju integrisanja. Kolo integratora je sličan kolu diferencijatora s tim da su R i C zamenili mesta.



Ukoliko je upotrebljeni operacioni pojačavač idealan napon na ulazu (-) je 0 V. Struje koje teku kroz kondenzator i otpornik su:

$$I_R = \frac{U_{ul}}{R}$$

$$I_C = C \frac{dU_{izl}}{dt}$$

Uz pretpostavku o idealnom operacionom pojačavaču, nikakva struja ne bi ulazila u (-) ulaz operacionog pojačavača, te su onda struje I_C i I_R jednake

Zamenom izraza dobija se za izlazni napon:

$$\frac{U_{ul}}{R} = -C \frac{dU_{izl}}{dt}$$

$$U_{izl} = -\frac{1}{RC} \int U_{ul} dt$$

Ukoliko se elementi R i C izaberu tako da je $RC = 1$ onda će izlazni napon biti jednak integralu ulaznog napona:

$$U_{izl} = -\int U_{ul} dt$$

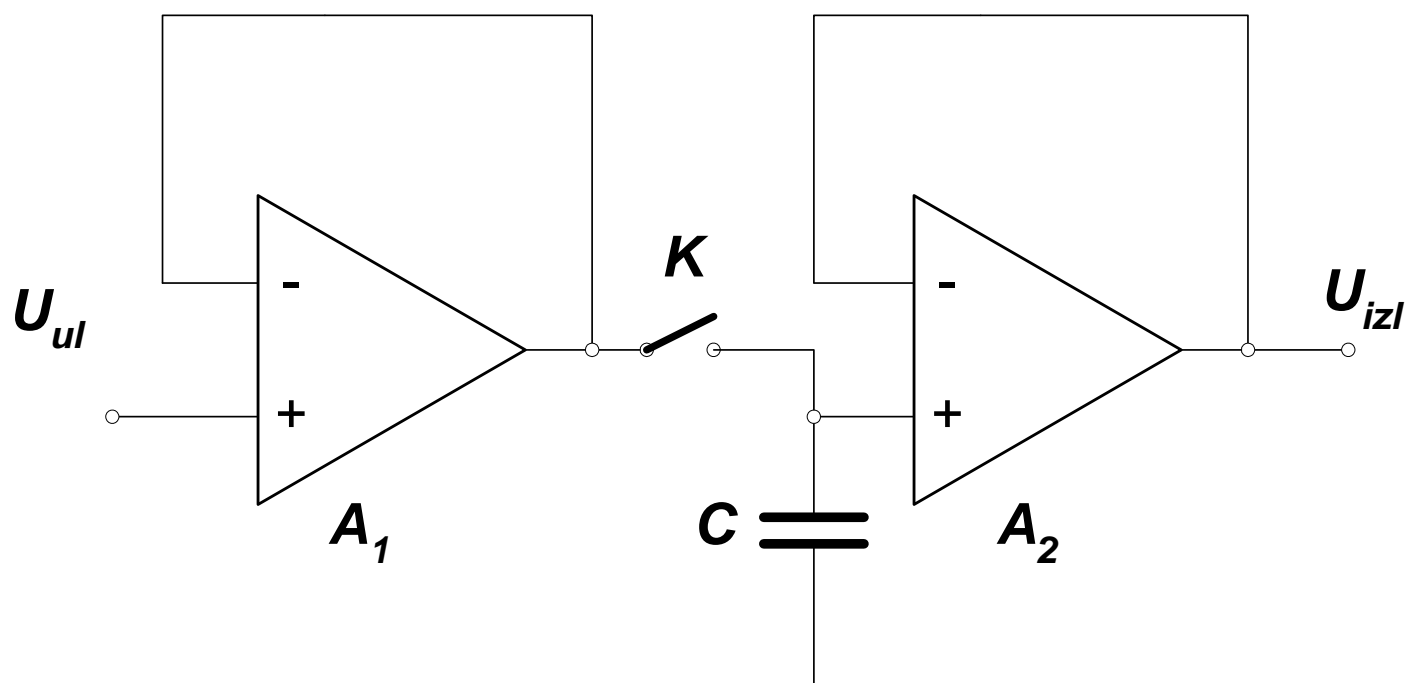
Znak (-) u izrazima ukazuje na promenu faze na izlazu iz integratora.

Komparator napona

Komparator napona reaguje naglim promenom izlaznog napona, kada ulaz koji se kontinualno menja postane veći od unapred definisanog nivoa komparacije U_K . Pozitivni i negativni maksimum izlaza u praksi zavisi od napona napajanja pojačavača.

To znači da izlaz komparatora je na potencijalu jednog od polova napona napajanja, dok je ulaz manji od komparacionog napona. Kada ulazni napon postane veće od komparacionog napona izlaz komparatora prelazi na potencijal drugog od polova napona napajanja. Ovo važi i prilikom opadanja ulaznog napona.

Sleditelj napona i kolo za uzorkovanje



Zadatak ovog sklopa je da od promenljivog signala u datom trenutku (t_0) uzme uzorak, i da zadrži taj napon u vremenskom intervalu (T) dok se izvrši obrada tog signala.

Prvo pojačalo A_1 - sleditelj napona - služi zato, da struja punjenja kondenzatora C ne tereti ulazni napon, a drugo pojačalo A_2 - kolo za uzorkovanje - služi za to da izlazni napon ne tereti kondenzator C , da opterećenje na izlazu ne smanjuje napon kondenzatora.

A/D i D/A pretvarači

Osnovni nedostaci analognih signala su: nemogućnost prenosa na veće udaljenosti, osetljivost na delovanje šumova, poteškoće u pogledu priključivanja na računar, nestabilnost statičkih i dinamičkih karakteristika itd. Digitalni signali omogućavaju da se ovi nedostaci prevaziđu ili da su izraženi u manjoj meri.

Merni uređaj koji konvertuje merenu analognu veličinu u digitalni izlazni signal, obično se gradi na bazi mikroprocesora, što omogućava visok metrološki kvalitet i značajnu obradu merene informacije i pre njenog uvođenja u sistem upravljanja.

Analogno-digitalni (A/D) konvertor je elektronski sklop koji analognu veličinu pretvara u digitalni oblik, i ono je jedan od karakterističnih elemenata instrumenata koji mere ili obrađuju rezultate merenja u digitalnom obliku.

Prema načinu rada dele se na:

- Merači trenutne vrednosti
- Merači srednje vrednosti

Merači trenutne vrednosti:

Diskretni merači trenutne vrednosti:

- -automatski kompenzatori
- -pretvarači napona u vreme

Kontinualni merači trenutne vrednosti:

- -simultani pretvarači (flash A/D konvertori)
- -prateći brojači

Merači srednje vrednosti:

- digitalni usrednjivači
- stohastički adicioni A/D konvertor
- analogni usrednjivači

Ovo pretvaranje karakterišu dva usko povezana procesa:

- Uzorkovanje analogne veličine $u(t)$ u diskretnim intervalima vremena (kvantizacija po vremenu)
- Zaokruživanje uzorkovane vrednosti na jednu od vrednosti ranije utvrđene fiksne skale (kvantizacija po amplitudi)

Da bi se dobio rezultat merenja, potrebno je kodirati fiksiranu vrednost dobijenu kvantovanjem po amplitudi.

Karakteristike A/D pretvarača

Statičke karakteristike

Greška kvantovanja

Statička karakteristika je definisana kao odnos izlaza i ulaza u stacionarnom stanju. Kod A/D pretvarača ova karakteristika je digitalno-analogna, jer stacionarnoj vrednosti merene veličine $x_i \in [x_{min}, x_{max}]$ odgovara kodirani izlaz x_{Ni}

$$x_{Ni} = i \cdot \Delta x \approx x_i$$

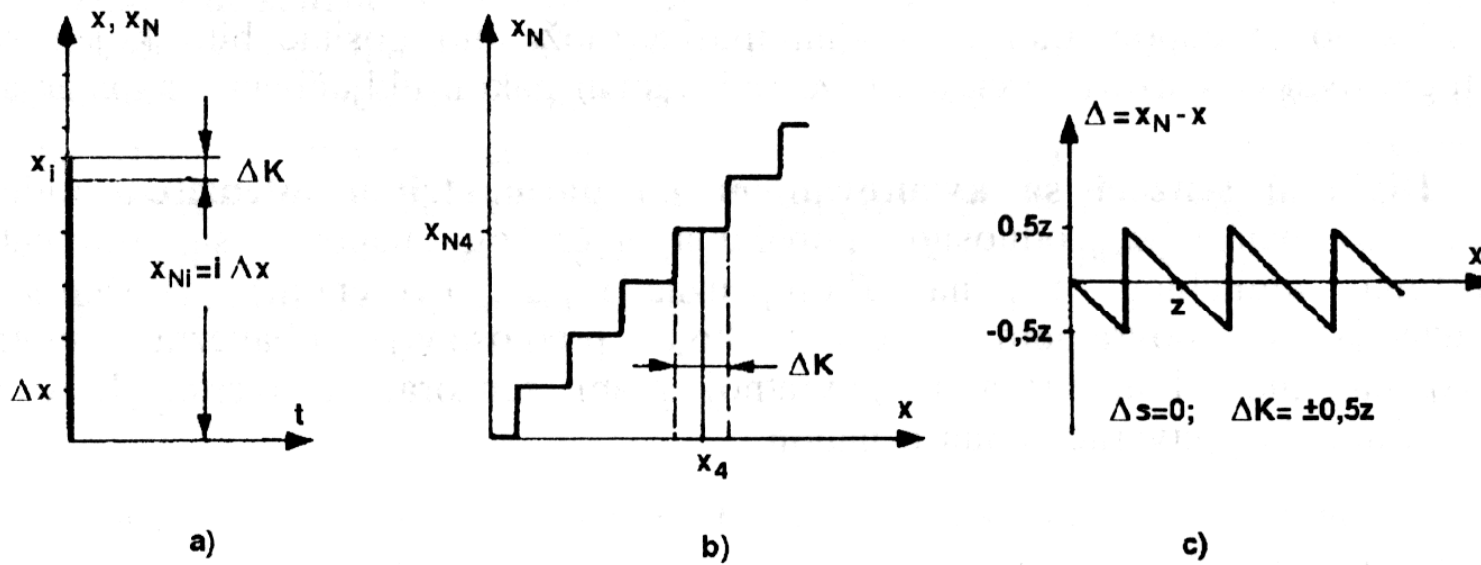
Samo u posebnom slučaju je $x_{Ni} = x_i$, jer zbog prirode procesa kvantovanja svakoj merenoj vrednosti iz intervala $[x_i - \Delta x, x_i + \Delta x]$ odgovara isti digitalni izlaz x_{Ni} .

Time se čini greška ΔK :

$$\Delta K = |x_{Ni} - x_i|$$

koja se zove greška kvantovanja, pa je realna statička greška:

$$x_{Ni} = i \cdot \Delta x = x_i \pm \Delta K_i \quad i = 1, 2, \dots, n.$$



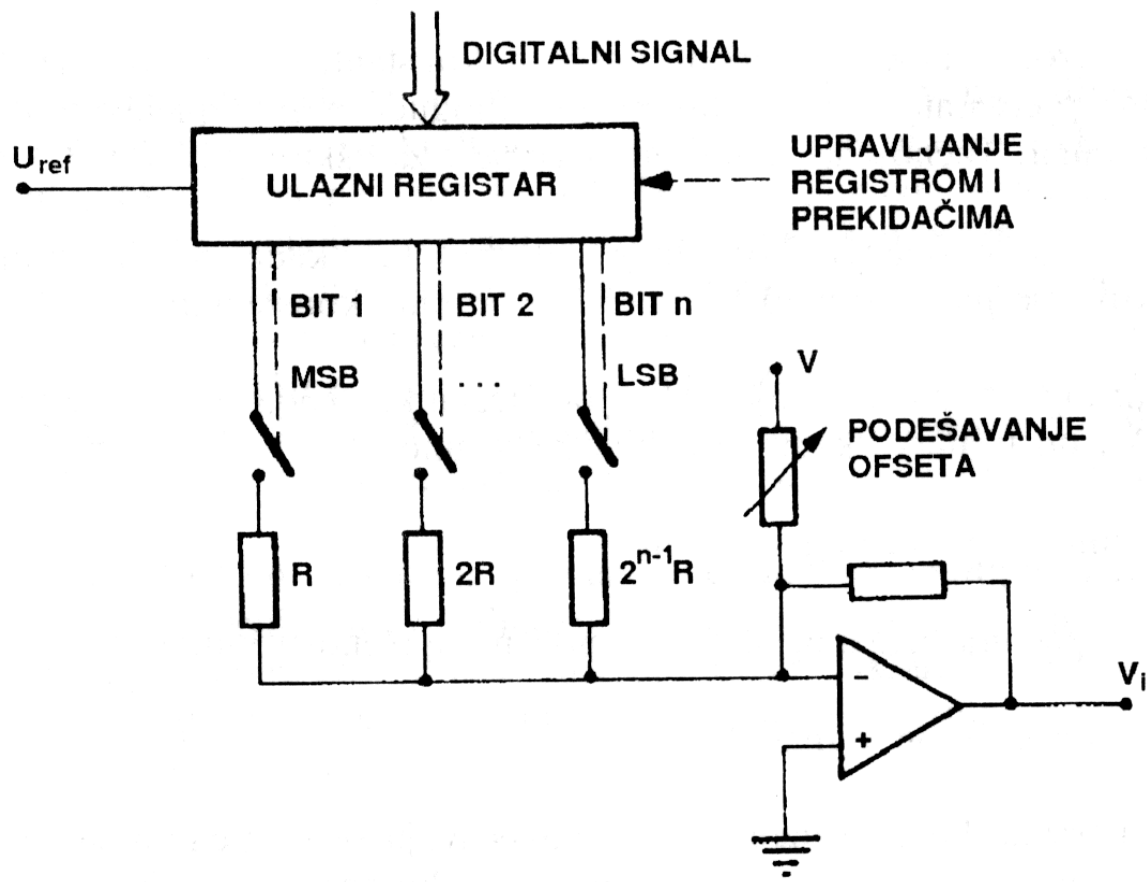
Slika 14.6. Statička karakteristika: a) greška kvantovanja, b) realna statička karakteristika, c) dijagram greške

Dinamička greška

A/D pretvarač radi tako što se u trenutku $t = t_1$ fiksira vrednost $x(t_1)$ na kraju pretvaranja merena veličina ima vrednost $x(t_1 + t_p)$ koja se u opštem slučaju razlikuje od vrednosti na početku pretvaranja.

Digitalno-analogni pretvarači

Digitalno-analogni pretvarači (D/A) su elektronska kola koja konvertuju digitalni serijski ili paralelni signal u analogni naponski ili strujni električni signal. Budući da je ulazni signal neki broj, osnova svake D/A tehnike je da se njegove cifre pretvore u odgovarajuće iznose struja ili napona koje treba sumirati.



Slika 14.15. Osnovna šema D/A pretvarača

Analogno-digitalni pretvarači

Analogno-digitalni pretvarač je elektronsko kolo koje ima funkciju diskretizacije. Pomoću njega određuje se broj diskretnih jedinica koji je ekvivalentan merenoj analognoj veličini.

Za izbor A/D pretvarača bitni su:

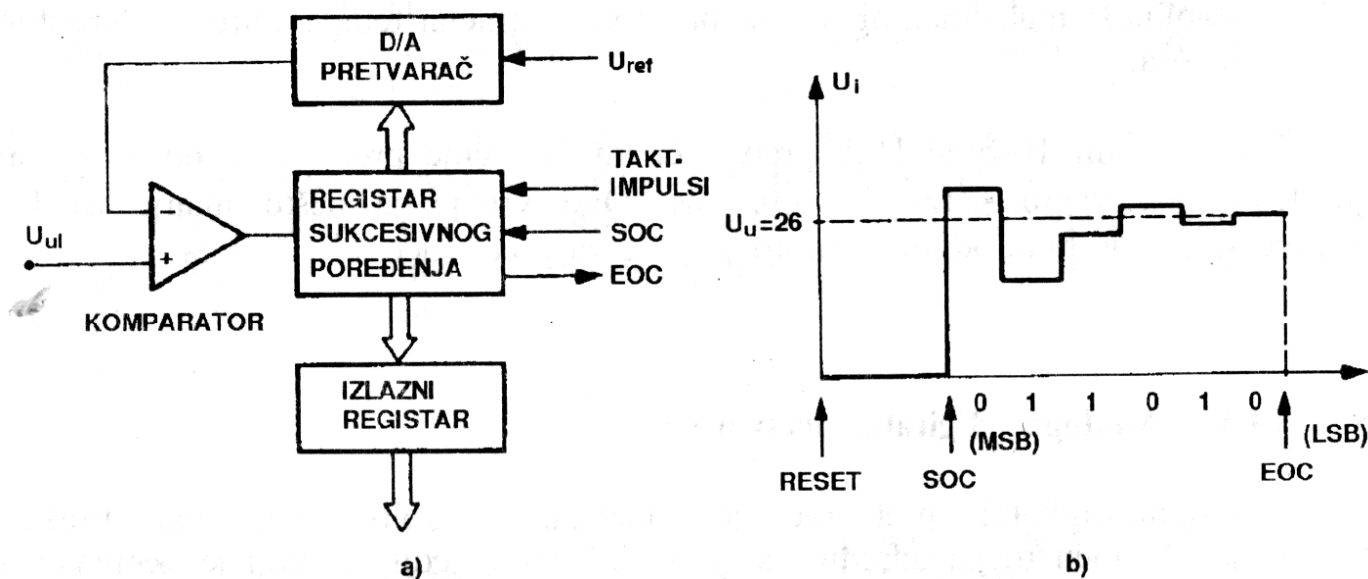
- opseg i rezolucija merenog analognog signala
- tačnost i stabilnost statičke karakteristike pretvarača
- spoljni uticaji, posebno delovanje temperature
- vreme pretvaranja
- tip referentnog napona (fiksno, promenljivo, podešljivo)
- izvor napajanja
- karakter ulaznih šumova
- uticaj karakteristika A/D pretvarača na ulazni kanal

A/D pretvarač sa sukcesivnom aproksimacijom

Suština sukcesivnih tehnika A/D pretvaranja je u tome da se nepoznati analogni signal poredi sa interno generisanim kompenzacionim signalom. Poređenje je sukcesivno i polazi od najstarijeg cifarskog mesta.

Na svakoj etapi poređenja uspostavlja se vrednost jednog cifarskog mesta. Početna vrednost svakog cifarskog mesta je jedinica. Ako je ulazni napon veći od kompenzacionog, logička jedinica ostaje sačuvana u suprotnom na cifarskom mestu uspostavlja se logička nula.

Kompenzacioni signal nastaje na D/A pretvaraču i startuje nakon prijema signala za početak pretvaranja SOC i završava se nakon prijema signala za kraj konverzije EOC.



Slika 14.16. A/D pretvarač sukcesivnog tipa: a) principijelna šema, b) dijagram aproksimacije

Ispred A/D pretvarača često se dodaje kolo za uzorkovanje i zadržku da bi se fiksirala vrednost brzo promenljivog signala u trenutku kada startuje pretvaranje.

A/D pretvarači integracionog tipa

Najširu upotrebu ima integrator sa dva nagiba integracije.

Radni ciklus se deli u tri etape:

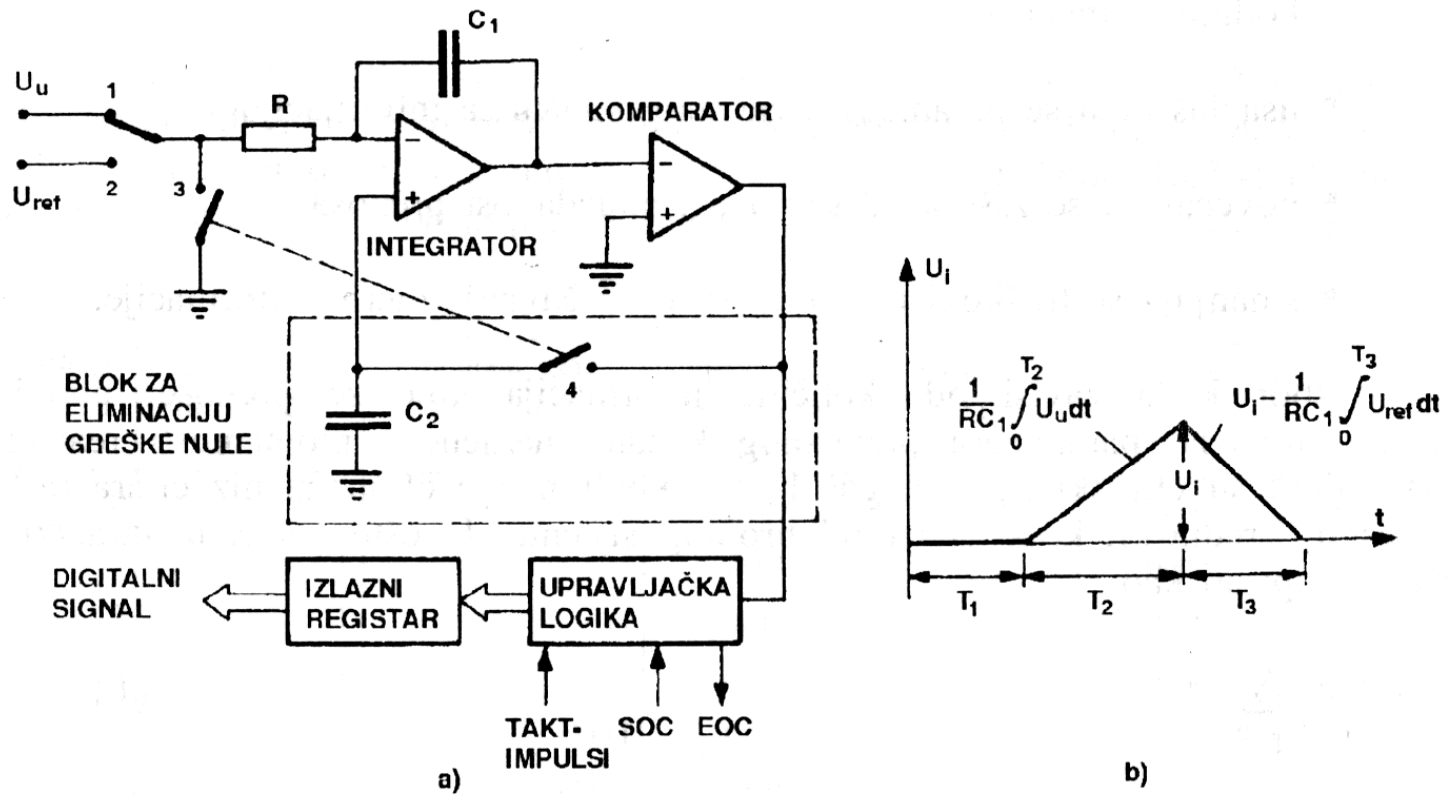
- U prvoj etapi (ulaz kratko spojen, a prekidači 3 i 4 zatvoreni) na kondenzatoru C_2 uspostavlja se napon jednak greški nule.
- U drugoj etapi (prekidač 1 zatvoren 3 i 4 otvoreni), ulazni analogni signal se integrira. Na kraju preioda T_2 koji je određen nekim brojem konstantnih impulsa sata, na izlazu integratora je napon proporcionalan ulaznom:

$$U_i = U_u (T_2/RC).$$

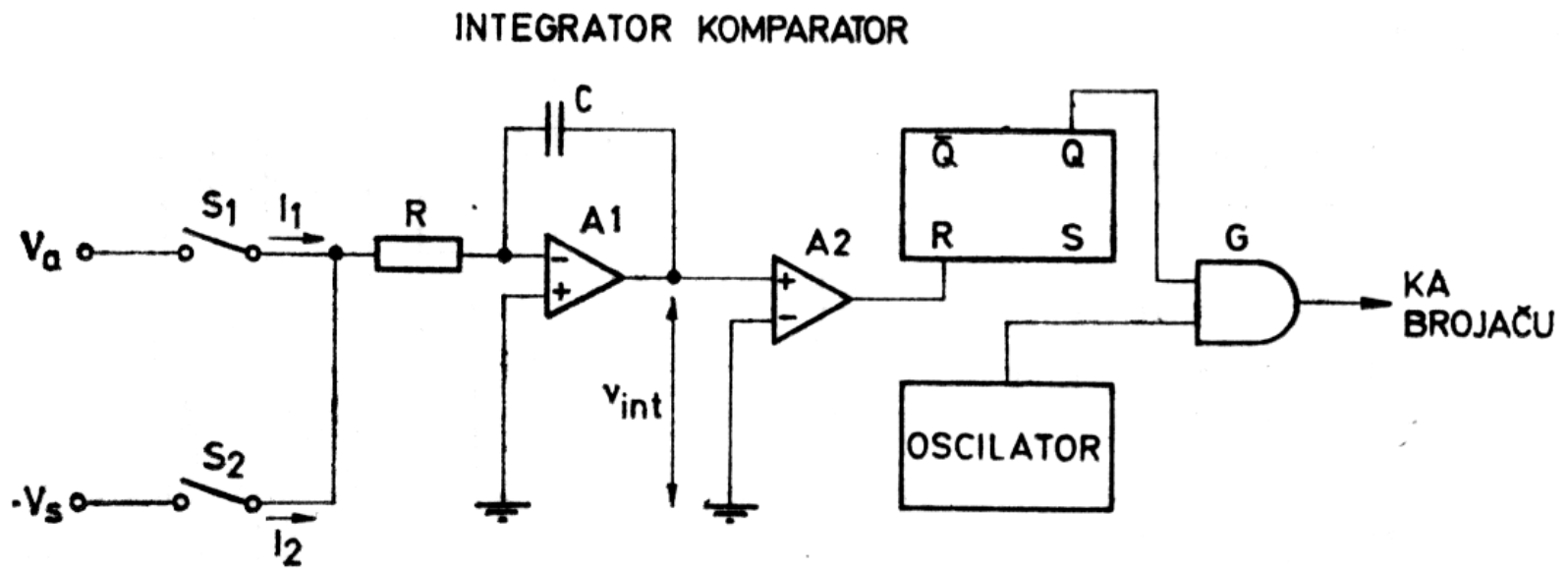
- U trećoj etapi ciklusa (prekidač 2 zatvoren) na ulaz integratora dolazi referentni napon suprotnog predznaka, te izlaz opada. Opadanje izlaznog napona u periodu T_3 traje sve dok komparator ne registruje nulu.
- Digitalni ekvivalent ulaznog napona određuje se iz jednačine.

$$U_u = (T_3 / T_2) U_{ref}$$

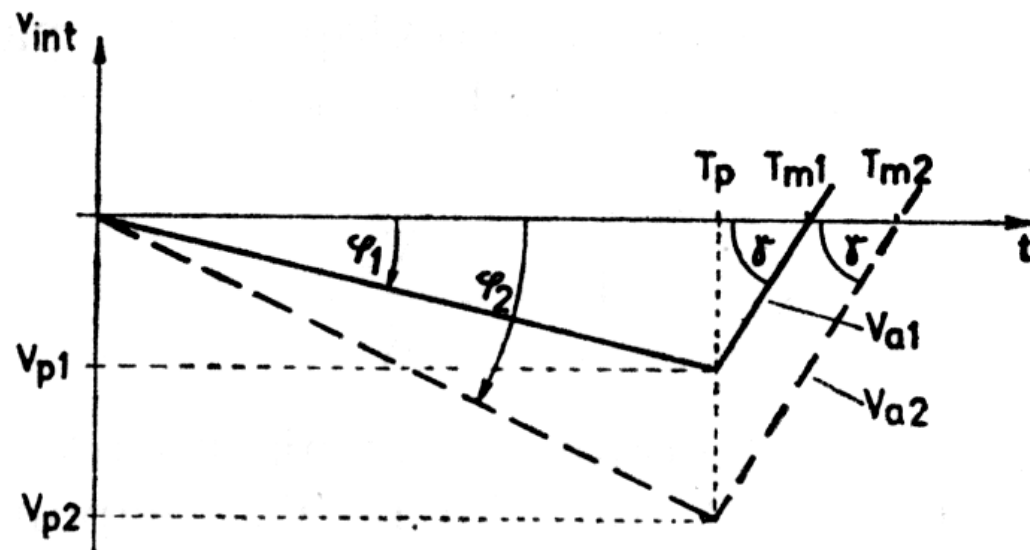
- Prednost A/D pretvarača na bazi integracije je velika tačnost i mali uticaj šumova, a nedostatak im je relativno mala brzina pretvaranja.



Slika 14.17. A/D pretvarač na principu integracije: a) principijelna šema, b) vremenski dijagram



Sl. 14.11 — A/D pretvarač sa dvojnim nagibom



Sl. 14.12 — Promena napona na izlazu integratora

A/D pretvarač na principu pretvaranja napona u frekvenciju

Odlikuje se jednostavnošću, relativno je jeftin, pogodan za konverziju brzo promenljivih analognih signala, te za prenos podataka na veće daljine, Mana mu je relativno mala tačnost.