

The title 'ELEMENTI AUTOMATIZACIJE' is written in a large, bold, serif font with a black and white checkered pattern. The text is arranged in two lines: 'ELEMENTI' on top and 'AUTOMATIZACIJE' below it. On either side of the text, there are two grey arrows pointing outwards, one above and one below, suggesting a circular or cyclical process.

# ELEMENTI AUTOMATIZACIJE

(za III razred i smer elektrotehničar automatike)

(septembar 2010)

1. Uvod u predmet
2. Detektori signala greške

za školsku **2010 / 2011** godinu  
prilagođeno za nastavu od strane predavača:  
Verica Papić-Filko, dipl. ing. elektrotehnike i računarstva

# 1. Uvod u predmet sa osvrtom na merne pretvarače

Proces proizvodnje ima za cilj stvaranje materijalnih dobara potrebnih za zadovoljavanje ljudskih potreba. U težnji da se oslobodi fizičkog rada u procesu proizvodnje, čovek je izmislio i stvorio razne mehanizme i mašine. Uvođenje mehanizama i mašina u proizvodni proces, kojima se čovek oslobađa fizičkog rada, naziva se *mehanizacija* proizvodnog procesa. Međutim, iako se oslobađa fizičkog rada, čovek i dalje troši energiju na upravljanje proizvodnim procesom. Da bi se oslobodio i toga, u proces proizvodnje se uvode mašine i uređaji koji upravljaju samim proizvodnim procesom. Uvođenje mašina i uređaja kojima se čovek oslobađa od rada na upravljanju proizvodnim procesom naziva se *automatizacija*.

Na tok proizvodnog procesa utiču i razni poremećaji. Da bi se proces proizvodnje odvijao na unapred određen način, potrebno je upravljati njime. Kao što je poznato, pod upravljanjem se podrazumeva skup akcija kojima se deluje na objekat upravljanja da bi se ostvario neki cilj. U suštini, upravljanje je *proces donošenja odluke* o izboru između raznih mogućnosti ostvarivanja zadatog cilja pri unapred definisanim ograničenjima. Uređaj koji obavlja taj zadatak naziva se *regulator*.

Krajnji cilj upravljanja proizvodnim procesima je neki koristan ili proizvodni rad. Taj rad obavlja mašina na koju se primenjuje upravljanje (*objekat upravljanja*). Prema tome, koristan proizvodni rad je rezultat usklađenog funkcionisanja mašine koja obavlja proizvodni proces i regulatora koji upravlja tom mašinom. Sistem upravljanja je skup međusobno povezanih elemenata koji zajedno obavljaju jednostavnu ili složenu operaciju upravljanja. Ti elementi su međusobno povezani određenim funkcionalnim vezama. Ako se radi o automatskom upravljanju oni obrazuju funkcionalnu celinu koja se naziva *Sistem automatskog upravljanja (SAU)*.

Za uspešno upravljanje bilo kojim proizvodnim procesom potrebno je poznavati stanje svih delova datog procesa. Da bismo došli do tih informacija koristimo elemente koje nazivamo merni pretvarači. Kao što im ime sugeriše, merni pretvarači se koriste za merenje veličina koje karakterišu pojedine delove proizvodnog procesa. Veličine koje se mere nazivamo *merenim promenljivima*, dok se pod *merenjem* podrazumeva određivanje vrednosti merene promenjive. Znači, merena promenjiva deluje na ulaz mernog pretvarača, vrši se njeno merenje i nakon toga pretvaranje dobijene vrednosti u oblik koji je pogodan za prenos i dalju obradu (npr električni signal). Drugim rečima, na izlazu mernog pretvarača se dobija vrednost merene promenjive u transformisanom obliku. Na primer, na izlazu mernog pretvarača može da se dobija strujni signal u granicama koje su propisane standardom: najčešće u opsegu od 4 do 20 mA.<sup>(1)</sup>

U stručnoj literaturi se sreću sledeći termini: senzori, transmiteri, konvertori, davači.

Senzori su elementi na koje direktno deluje merena veličina. U nekim oblastima se za ovaj pojam koristi i termin *detektor*.

*Transmitter* je pretvarač na čiji ulaz se šalje signal sa senzora, kakav god da je, a na izlazu se dobija standardizovan oblik signala pogodan za dalju obradu i/ili prenos. Za transmitter se koristi i termin *prenosnik*.

*Konvertori* pretvaraju signal iz jednog oblika u drugi, dok je *Davač* termin koji se koristi i za pretvarače i za senzore.

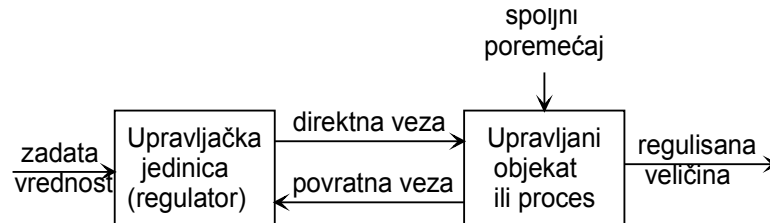
Na osnovu ovoga možemo reći da su nam merni pretvarači potrebni da bi uopšte bilo moguće upravljati bilo kojim procesom. Merni pretvarači su detaljnije opisivani u okviru gradiva prethodnog razreda, pa će se u daljem gradivu opisivati svi ostali elementi sistema automatskog upravljanja i regulacije.

---

(1) Ovo se radi zbog lakše detekcije kvarova. Ako neki uređaj ili merni element otkáže, signal koji bi se dobio bio bi van tog opsega, što odmah ukazuje da je došlo do nekih nepredviđenih događaja ili havarije.

## 1.1. Opšta šema upravljanja procesom

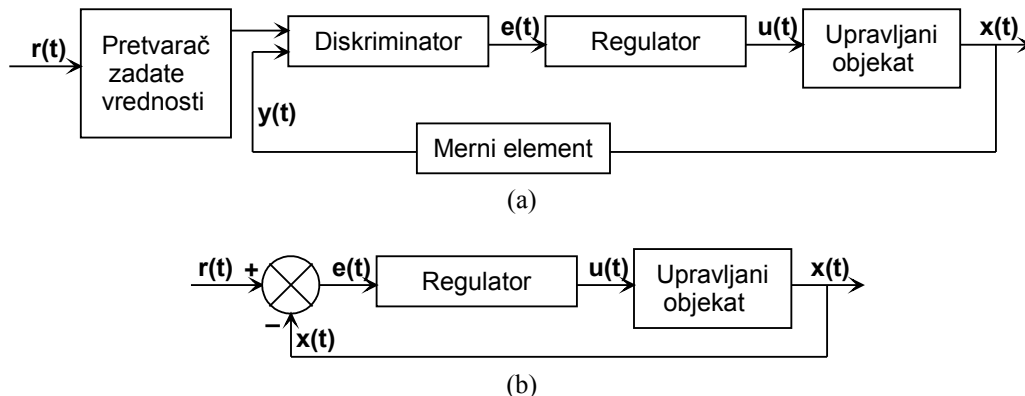
U opisu sistema automatskog upravljanja rekli smo da su uređaj kojim se vrši automatsko upravljanje (regulator) i upravljani objekat (ili proces) međusobno povezani određenim funkcionalnim vezama. U opštem slučaju postoje dve funkcionalne veze: direktna i povratna veza. Direktnom vezom se prenosi delovanje regulatora na upravljani objekat. Informacija o vrednosti veličine nad kojom se vrši upravljanje prenosi se povratnom vezom. Na slici 1.1 je prikazana opšta blok šema upravljanja procesom, na kojoj su pravougaonicima označeni opšti delovi SAU, a strelicama funkcionalne veze između njih.



Slika 1.1 Opšta blok-šema upravljanja procesom

## 1.2. Klasifikacija elemenata SAU

Složenost upravljanja nekim proizvodnim procesom zavisi od složenosti samog proizvodnog procesa. Zbog toga su i pojedini konkretni sistemi automatskog upravljanja različitog stepena složenosti. Osnovni sastavni delovi sistema automatskog upravljanja nazivaju se opštim imenom elementi SAU. Svaki element SAU obavlja određenu funkciju u procesu upravljanja, pa se prema tome vrši njihovo razvrstavanje.



Slika 1.2 Strukturna blok-šema SAU

Na slici 1.2 je prikazana strukturalna blok-šema SAU, na kojoj su prikazani opšti elementi SAU, kao i njihove međusobne funkcionalne veze. Opšti elementi SAU su sledeći:

*Upravljani objekat* ili *objekat upravljanja* je sve ono na šta se primenjuje upravljanje. To je uređaj ili tehnički sistem u kome se u uslovima delovanja raznovrsnih poremećaja odvija neki proces.<sup>(2)</sup>

*Regulator* proizvodi signal upravljanja  $u(t)$  u zavisnosti od signala greške. To je obično najsloženiji deo uređaja za automatsko upravljanje, jer sadrži uređaje za pojačanje i promenu oblika signala greške, uređaj za generisanje signala upravljanja dovoljno velike snage za obezbeđenje određenog redosleda operacija kod složenih proizvodnih procesa i drugo.

Ulazna veličina upravljanog objekta je izlazna veličina regulatora. Posredstvom ove veličine prenosi se energija upravljanja iz regulatora na upravljani objekat. Zbog toga se ova veličina naziva *signal upravljanja* i označava se opštom oznakom  $u$ .

Izlazna veličina upravljanog objekta je fizička veličina čijim merenjem se može odrediti stanje, položaj ili kretanje upravljanog objekta. Ona se naziva još i *upravljana promenljiva* sistema i označava se

(2)U tehničkoj literaturi se najčešće svaka operacija kojom treba da se upravlja naziva *proces*.

opštom oznakom  $x$ .<sup>(3)</sup>

*Merni pretvarač* se nalazi u povratnoj grani sistema i vrši prikupljanje informacija o stanju, položaju ili kretanju upravljanog objekta. Informacije o upravljanoj objektu sadržane su u izlaznoj veličini koju daje upravljani objekat, a merni pretvarač ima zadatak da tu veličinu pretvori u oblik pogodan za prenos informacija, kao i za njihovu obradu u procesu upravljanja. Za prenos informacija, kao i za njihovu obradu, najpodesnije su električne veličine (napon i struja), pa se zadatak mernog elementa u procesu automatskog upravljanja najčešće svodi na pretvaranje izlazne veličine upravljanog objekta u električni signal  $x(t)$ .

Informacija o zadatom toku procesa u upravljanoj objektu takođe je data u obliku neke fizičke veličine  $r$ , koja može, u opštem slučaju, da se menja u vremenu. Tu veličinu kod nekih sistema zadaje čovek, a kod nekih je predviđen poseban uređaj (programator) koji je proizvodi. Sistemi kod kojih je ova veličina konstantna nazivaju se *sistemi automatske regulacije*.

Radi jednostavnijeg prenosa informacija o zadatom toku proizvodnog procesa, kao i radi jednostavnije obrade tih informacija, veličina  $r(t)$  pretvara se u električnu veličinu pomoću pretvarača zadate vrednosti. Dalja obrada informacija sastoji se u upoređivanju izlaznog signala mernog elementa sa izlaznim signalom pretvarača zadate vrednosti pomoću uređaja koji se naziva *diskriminator*. Kao rezultat pretvaranja i upoređivanja veličine  $r(t)$  i  $x(t)$  dobija se *signal greške*  $e(t)$ :

$$e(t) = K(r(t) - x(t)) \quad (1.1)$$

gde je  $K$  koeficijent ukupnog pojačanja diskriminatora i pretvarača veličina  $r(t)$  i  $x(t)$ .

U teorijskoj analizi sistema automatskog upravljanja merni element, pretvarač zadate vrednosti i diskriminator se objedinjuju u jedan funkcionalni elemenat koji se naziva *detektor signala greške*. Na taj način strukturna blok-šema SAU dobija jednostavniji oblik kao na slici 1.2b. Jednostavnosti radi, najčešće se usvaja da je pojačanje detektora signala greške jednako jedinici, pa je:

$$e(t) = r(t) - x(t) \quad (1.2)$$

a stvarno pojačanje detektora signala greške obuhvata se pojačanjem regulatora.

Svaki elemenat SAU ima svoj ulaz i izlaz i može se prikazati na crtežu simbolički u obliku pravougaonika, na kojem je ulaz označen strelicom uperenom ka pravougaoniku, a izlaz strelicom od pravougaonika. Ovim strelicama se na simboličan način označava činjenica da, u procesu upravljanja, na ulaz elementa deluje neka fizička veličina i da se, kao posledica tog delovanja, u tom elementu stvara druga fizička veličina, podesnija za dalju primenu u procesu upravljanja. Iz toga sledi da je izlazna veličina elementa SAU u određenoj funkcionalnoj zavisnosti od ulazne. Tako, na primer, temperatura u nekoj prostoriji koju zagrevamo električnim grejačem biće viša ako povećamo jačinu struje grejača i slično.

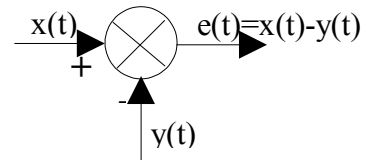
---

(3) Sve veličine u okviru SAU su u opštem slučaju promenljive u vremenu, tako da pišemo  $x(t)$ ,  $u(t)$ ,  $r(t)$ .

## 2. Detektori signala greške (DSG)

### 2.1. Pojam detektora signala greške, njegova funkcija u SAU

Da bi se mogla održavati funkcionalna veza između ulazne (zadana vrednost) i izlazne (upravljane) promenjive kod sistema automatskog upravljanja sa povratnom spregom potrebno je da se izlazna promenjiva meri (prati se proces), i da se uporedi sa promenjivom zadate vrednosti radi određivanja odstupanja stvarne od željene vrednosti izlaza. To odstupanje se u opštem slučaju treba redukovati na najmanju moguću meru.



Slika 2.1. Detektor signala greške

Detektor signala greške je uređaj ili kombinacija uređaja koji određuje odstupanje stvarne od zadate vrednosti. U nekim slučajevima, detektor signala greške mora da bude u stanju da prihvati signale različite fizičke prirode i da ih, u cilju poređenja, konvertuje u istu fizičku veličinu. Takvi detektori sadrže odgovarajući merni pretvarač. Rezultat poređenja dva signala dovedena na ulaz detektora je njihova razlika – *signal greške*. Signal greške treba da ima odgovarajući oblik da bi mogao da deluje na regulator, regulator na osnovu toga upravlja izvršnim elementom, dok izvršni element direktno deluje na objekat upravljanja.

Ako označimo sa  $x(t)$  ulazni, a sa  $y(t)$  izlazni signal tada signal greške  $e(t)$  računamo kao

$$e(t) = x(t) - y(t),$$

Detektor signala greške se u strukturnoj blok šemi SAU predstavlja simbolom kao na slici 3.1.

#### 2.1.1. Vrste detektora signala greške (DSG)

Zavisno od fizičke prirode ulaznog i izlaznog signala, detektori signala greške mogu da budu električni, mehanički, hidraulični i pneumatski.

Matematičke operacije nad fizičkim veličinama najlakše se praktično ostvaruju kada su te veličine električne. Iz tog razloga najrasprostranjeniji su električni i elektronski detektori signala greške. U daljem tekstu biće opisane sledeće vrste detektora signala greške (DSG):

- Pomerajni DSG,
- Naponski DSG,
- Strujni DSG,
- Frekventni DSG,
- Vremenski DSG,
- Mehanički DSG i
- Pneumatski DSG.

## 2.2. Pomerajni detektori signala greške

Detektor signala greške koji se koristi za detekciju odstupanja objekta upravljanja u odnosu na referentni položaj naziva se *pomerajni detektor signala greške*.

Kada je regulisana veličina mehanički pomeraj, najjednostavniji način da se dobije električni signal srazmeran razlici zadate i stvarne vrednosti pomeraja jeste električna veza dva potencijometra. Potencijometri mogu biti bilo translatorsni bilo rotacioni, ili čak da je jedan translatorsni a drugi rotacioni. Simbol kojim se predstavlja potencijometar je u oba slučaja isti. U slučaju translatorsnog potencijometra, klizač potencijometra se pomera translatorsno. Napon na klizaču potencijometra je:

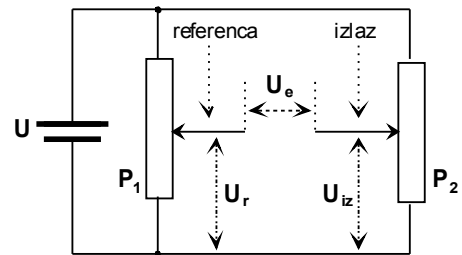
$$U_x = U \cdot \frac{x}{l},$$

gde je  $U$  – napon na krajevima potencijometra,  $l$  – ukupna dužina potencijometra (maksimalno moguće pomeranje klizača),  $x$  – rastojanje između klizača i referentnog kraja potencijometra (pomeraj klizača), a  $U_x$  – napon između klizača i referentnog kraja potencijometra. Za  $x=l$  (ako je klizač na kraju) imamo da je  $U_x=U$ . Za  $x=0$  (klizač na početku) je  $U_x=0$ . U slučaju kada imamo rotacioni potencijometar postoji samo rotaciono kretanje klizača. Napon na klizaču potencijometra je:

$$U_\alpha = U \cdot \frac{\alpha_x}{\alpha_{uk}},$$

gde je  $\alpha_{uk}$  – ukupno mogući pomeraj klizača (maksimalni ugao zakretanja),  $\alpha_x$  – trenutni ugaoni položaj klizača,  $U$  – napon na krajevima potencijometra, a  $U_\alpha$  – napon između klizača i referentnog kraja potencijometra. Postoje različite vrste potencijometara: translatorsni – različitih dužina i ukupnih otpornosti, rotacioni – sa različitim maksimalnim uglom zakretanja i različitom ukupnom otpornosti.

Dva potencijometra priključena na isti napon  $U$  formiraju potencijometarski most (slika 2.2). Krajevi oba potencijometra su vezani na isti napon. Klizač jednog potencijometra ( $P_1$ ) postavlja se u referentni položaj – položaj kojim se određuje željeni položaj objekta upravljanja. Klizač drugog potencijometra ( $P_2$ ) mehanički se spreže sa objektom upravljanja – sa izlazom. Napon između klizača predstavlja signal greške. Ako je objekat upravljanja u željenom položaju, na klizačima oba potencijometra imamo isti napon pa je napon greške jednak nuli,  $U_e = U_r - U_{iz} = 0$ . Ako objekat upravljanja nije u željenom položaju naponi na klizačima potencijometara će se razlikovati ( $U_r \neq U_{iz}$ ) i postojaće napon greške različit od nule,  $U_e = U_r - U_{iz} \neq 0$ .



Slika 2.2. Potencijometarski most

U opštem slučaju, uopšte nije bitno da li su potencijometri translatorsni, rotacioni, ili kombinacija translatorsnog i rotacionog. Recimo da se referentni potencijometar nalazi na radnom stolu, gde operater ručno podešava položaj klizača, dok je drugi potencijometar mehanički spregnut sa pokretnim delom neke mašine.

1. slučaj - kada se na radnom stolu nalazi translatorsni potencijometar ukupne dužine 10cm, a radni hod mašine je 1m (što odgovara dužini drugog potencijometra). Tada je

$$U_r = U \cdot \frac{x_r}{l_r}, \quad (l_r=10\text{cm}, x_r - \text{pomeraj klizača potencijometra na radnom stolu}),$$

$$U_{iz} = U \cdot \frac{x_m}{l_m}, \quad (l_m=1\text{m}, x_m - \text{pomeraj pokretnog dela mašine}),$$

$$U_e = U_r - U_{iz}.$$

2. slučaj – kada se na radnom stolu nalazi rotacioni potencijometar sa maksimalnim uglom pomeranja od  $110^\circ$  i ukupno  $1\text{k}\Omega$ , a u pitanju je ista mašina kao u prethodnom primeru:

$$U_r = U \cdot \frac{\alpha}{\alpha_{\max}}, \quad U_{iz} = U \cdot \frac{x_m}{\alpha_{\max}},$$

$$U_e = U_r - U_{iz}.$$

gde je  $\alpha_{\max} = 110^\circ$ ,  $\alpha$  - ugaoni pomeraj klizača potenciometra na radnom stolu,  $x_m$  – pomeraj pokretnog dela mašine.

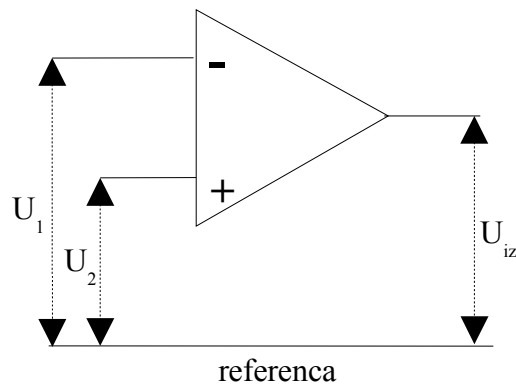
Princip je isti ako je kretanje objekta upravljanja rotaciono, a potenciometar na pultu bilo translatorski, bilo rotacioni. U suštini, radi se o istom: bitno je kolika je razlika napona između klizača potenciometra na mašini i klizača potenciometra na upravljačkom stolu. Na izlazu se dobija napon greške  $U_e$  koji se šalje na ulaz regulatora. Regulator na osnovu toga deluje na objekat upravljanja na takav način da se smanjuje razlika između željenog i stvarnog položaja pokretnog dela. Napon greške  $U_e$  postaje jednak nuli tek kada se mašina nađe u željenom položaju (koji je zadat pomoću potenciometra na upravljačkom stolu).

### 2.3. Naponski detektori signala greške

Detektor signala greške koji na svom izlazu daje signal koji je srazmeran razlici napona koje dobija na ulazu naziva se *naponski detektor signala greške*. Princip rada naponskog detektora signala greške objasnićemo u slučaju njegove realizacije pomoću operacionog pojačavača.

Operacioni pojačavač je pojačavač sa dva ulaza i jednim izlazom na kojem se dobija naponski signal čija je veličina određena razlikom napona na ulazu ( $U_1$  i  $U_2$ ), kao i pojačanjem pojačavača A:

$$U_{iz} = A \cdot (U_2 - U_1).$$



Slika 2.3. Operacioni pojačavač

Da bi operacioni pojačavač mogao da ima mogućnost pojačavanja napona, potrebno je da se napaja iz dodatnog izvora. Obično se vrši napajanje iz dva izvora  $U_-$  i  $U_+$ . Pojačanje operacionog pojačavača je veoma veliko tako da dolazi do sledećeg: ako postoji razlika između napona na ulazima i bez obzira kolika je ta razlika ona dovodi do zasićenja – napon na izlazu postaje jednak jednom od napona napajanja.

Ako je  $U_2 > U_1$  na izlazu imamo da je  $U_{iz} = U_+$ .

Ako je  $U_2 < U_1$  na izlazu imamo da je  $U_{iz} = U_-$ .

Kada su naponi na oba ulaza operacionog pojačavača jednaki ( $U_1 = U_2$ ), izlazni napon biće jednak nuli ( $U_{iz} = 0$ ).

Ako se za referentni napon uzme napon  $U_2$ , na izlazu operacionog pojačavača se dobija signal greške naponskog nivoa koji pokazuje da li je napon  $U_1$  manji ili veći od referentnog.

## 2.4. Strujni detektori signala greške

Detektor signala greške koji na svom izlazu daje signal srazmeran razlici struja koje dobija na ulazima naziva se *strujni detektor signala greške*.

Ovde ćemo prikazati dva primera strujnih detektora signala greške.

Poređenje jednosmernog izlaznog strujnog signala  $I_{iz}$  i referentne struje  $I_r$  može se svesti na poređenje napona na dva identična otpornika (slika 2.4).

Naponi na otpornicima su

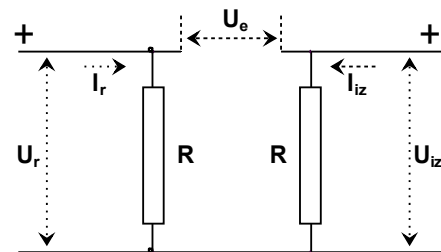
$$U_r = RI_r,$$

$$U_{iz} = RI_{iz},$$

pa je napon greške

$$U_e = U_r - U_{iz} = R(I_r - I_{iz}),$$

gde polaritet napona zavisi od smera greške.



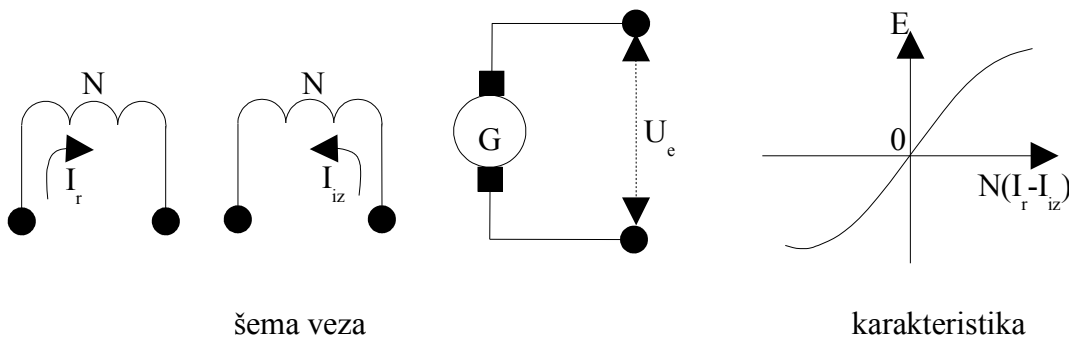
Slika 2.4. Poređenje jednosmernih strujnih signala

Drugi primer detektora greške jednosmernih strujnih signala je generator jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom (slika 2.5). Kroz dva galvanski odvojena pobudna namotaja sa istim brojem zavojaka  $N$  teku struje  $I_r$  i  $I_{iz}$  suprotnog smera. Pobudni fluks  $\phi$  potiče od razlike ovih struja. Elektromotorna sila indukovana u rotorskom namotaju generatora srazmerna je odstupanju izlazne struje od referentne:

$$E = k_e n \phi = k(I_r - I_{iz}),$$

gde je  $k_e$  konstrukciona konstanta, a  $n$  broj obrtaja generatora. Napon na izlaznim priključcima generatora predstavlja signal greške i jednak je ems  $E$ :

$$U_e = k(I_r - I_{iz}).$$



šema veza

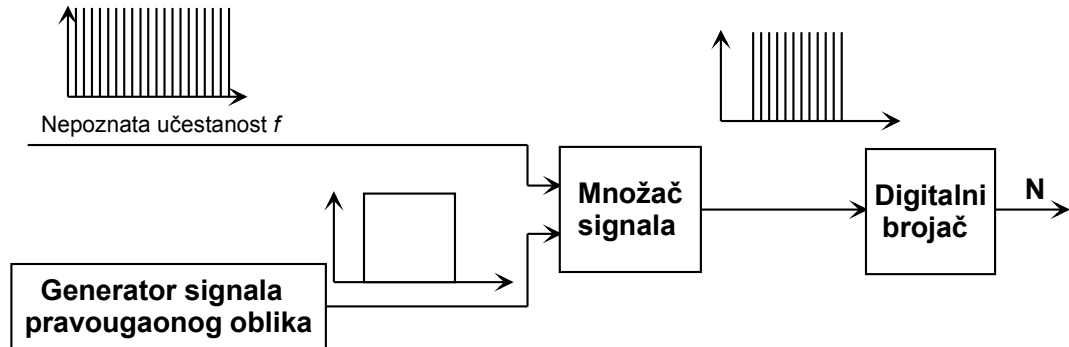
karakteristika

Slika 2.5. Generator jednosmerne struje kao strujni detektor signala greške



## 2.5. Frekventni detektori signala greške

Detektor signala greške koji na svom izlazu daje signal srazmeran razlici ili odnosu učestanosti (frekvencije) signala na ulazima naziva se *frekventni detektor signala greške*.



Slika 2.6. Frekventni detektor signala greške

Na slici je prikazan primer frekventnog detektora signala greške. Na jedan ulaz se dovodi povorka impulsa nepoznate učestanosti  $f_x$ . Na drugi ulaz se iz posebnog generatora signala dovodi samo jedna perioda pravougaonog signala poznate učestanosti  $f_r$ . Na izlazu množača dobiće se povorka impulsa nepoznate učestanosti u trajanju od pola periode signala učestanosti  $f_r$  ( $T_r = \frac{1}{2 \cdot f_r}$ ). Iz relacije  $N = f_x \cdot T_r$ , gde je  $N$  broj impulsa u povorki, a  $T_r$  je trajanje impulsa iz generatora signala, određuje se nepoznata učestanost  $f_x$ .

Ako uzmemo da je učestanost koju daje generator signala  $f_r=0.5\text{Hz}$ , tako da je  $T_r = 1\text{s}$  tada će na izlazu biti  $N=f_x$  izbrojano onoliko impulsa kolika je nepoznata učestanost.

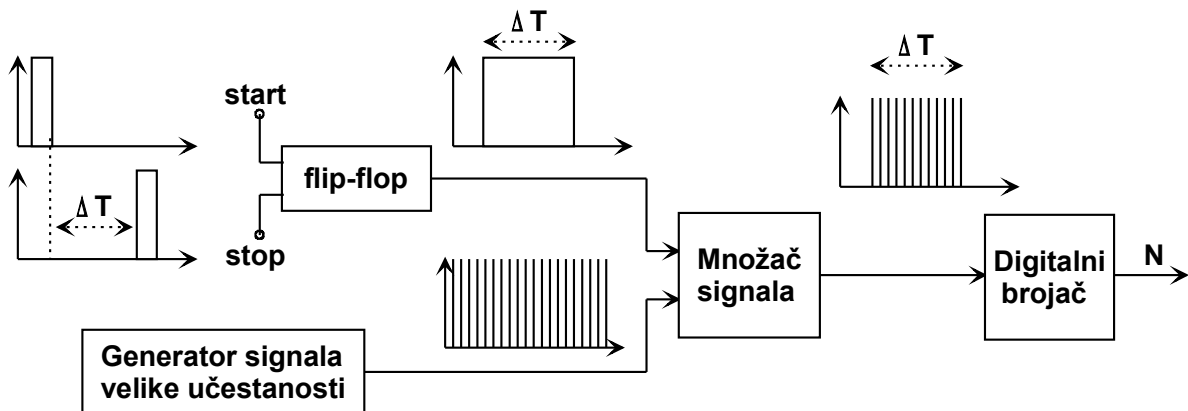
Ako su nepoznata i poznata učestanost jednake ( $f_x=f_r$ ) broj izbrojanih impulsa će biti jednak nuli ( $N=0$ ).

Pošto je poznato da je  $f = \frac{1}{T}$  i  $T = \frac{1}{f}$  za poznato vreme  $T_r$  dobijamo broj impulsa  $N_x$ , pa nam je nepoznata frekvencija  $f_x = N_x \cdot \frac{1}{T_r}$

Primer : Za  $f_r=0.5\text{Hz}$ ,  $T_r = 1\text{s}$  i sa digitalnog brojača dobijamo da je  $N_x = 25$ .

Prema formuli  $f_x = N_x \cdot \frac{1}{T_r}$  dobijamo da je  $f_x = 25 \cdot \frac{1}{1}$  odnosno  $f_x = 25\text{ Hz}$

## 2.6. Vremenski detektori signala greške



Slika 2.7. Digitalni detektor vremenskog kašnjenja

Detektor signala greške koji na svom izlazu daje signal srazmeran nekom vremenskom intervalu ili vremenskom periodu koji protekne između dva različita događaja naziva se *vremenski detektor signala greške*.

Na izlazu će postojati signal ako su se ta dva događaja desila u različito vreme, a ako su se desili istovremeno izlazni signal će biti jednak nuli.

Kao ilustracija vremenskog detektora signala greške može poslužiti detektor vremenskog kašnjenja, prikazan na slici 2.7.

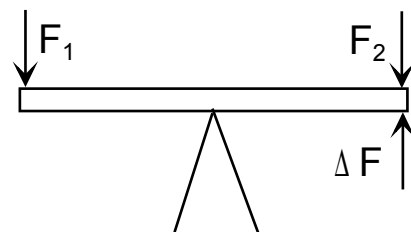
Digitalni tajmer, čiji je šematski prikaz dat na slici 2.7 predstavlja savremeno rešenje detektora vremenskog kašnjenja. Na ulaze bistabilnog multivibratora – flip-flopa, dovode se pobudni impulsi međusobno pomereni za vremenski interval  $\Delta T$ , tako da se na njegovom izlazu dobija pravougaoni impuls trajanja  $\Delta T$ . Ovaj pravougaoni impuls dovodi se na jedan ulaz množača signala (to je obično logičko „I“ kolo). Na drugi ulaz dovodi se povorka impulsa iz visokofrekventnog generatora poznate učestanosti  $f_0$ . Na izlazu iz množača dobija se povorka impulsa učestanosti  $f_0$ , trajanja  $\Delta T$ . Ovaj signal dovodi se u digitalni brojač. Iz relacije  $N=f_0\Delta T$ , gde je  $N$  broj impulsa u povorki, određuje se vremenski interval  $\Delta T$ .

## 2.7. Mehanički detektori signala greške

Detektor signala greške koji na svom izlazu daje signal srazmeran razlici nekih mehaničkih veličina naziva se *mehanički detektor signala greške*. Najjednostavniji primer mehaničkog detektora signala greške je poluga:

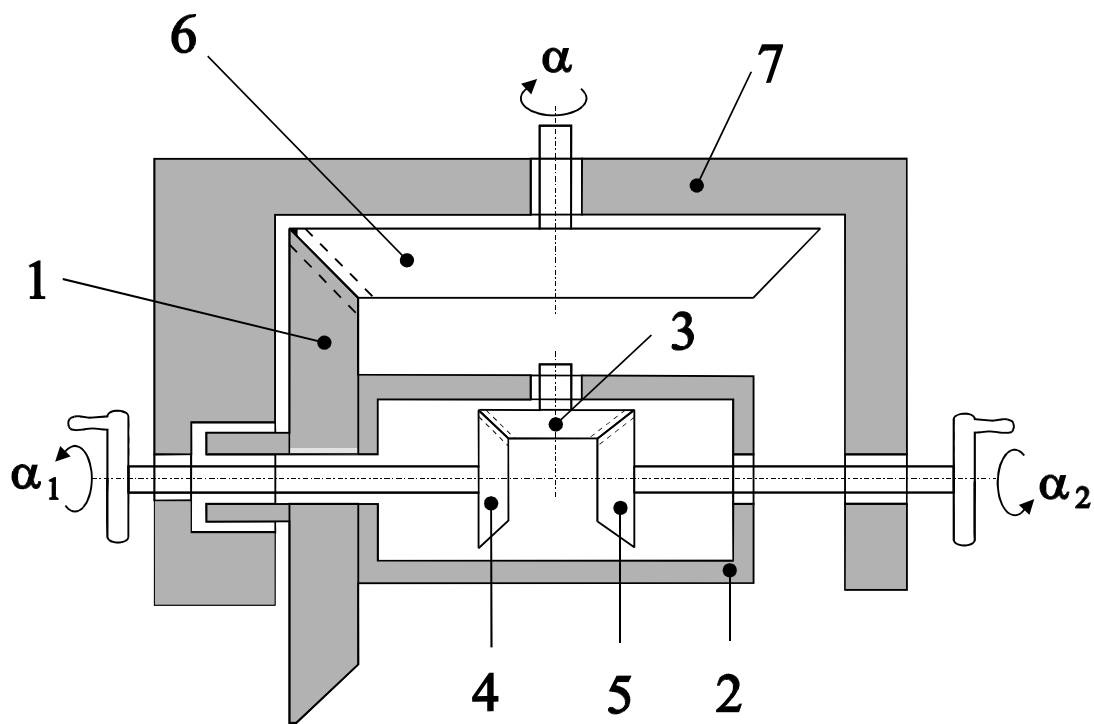
U ovom primeru poluga se koristi za poredenje sila:

$$\Delta F(t) = F_1(t) - F_2(t).$$



Slika 2.8. Poluga kao mehanički DSG

Drugi primer mehaničkog detektora signala greške je mehanički diferencijal.



Slika 2.9. Mehanički diferencijal

Na slici 2.9 prikazan je standardni tip mehaničkog diferencijala kod kojeg ugaoni pomeraj izlazne osovine zavisi od razlike pomeraja ulaznih osovine.

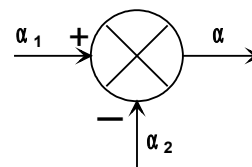
Dva konična zupčanika 4 i 5 istih poluprečnika, sa istim brojem zubaca, čvrsto su spregnuti sa odgovarajućim ulaznim osovinama koje nezavisno mogu da rotiraju u ležištima kućišta 2. Zupčanik 4 je čvrsto spregnut sa osovinom za zadavanje ugla  $\alpha_1$  a zupčanik 5 sa osovinom na kojoj se ostvaruje ugao  $\alpha_2$ . Pozitivni smerovi ugaonih pomeraja  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  su međusobno suprotni. U kućištu se nalazi prateći zupčanik 3 koji je spregnut istovremeno sa oba zupčanika 4 i 5. Prateći zupčanik 3 može da rotira oko svoje osovine čiji je ležište takođe smešteno u kućištu. Kućište 2 čvrsto je spregnuto sa koničnim zupčanikom 1, koji je spregnut sa izlaznom osovinom preko koničnog zupčanika 6.

Kada je  $\alpha_1 = \alpha_2$ , prateći zupčanik se obrće u mestu, tj. njegovo kućište 2 miruje. Kada se zupčanik 4 obrne za ugao  $\alpha_1$ , a zupčanik 5 za ugao  $\alpha_2$  ( $\alpha_1 \neq \alpha_2$ ), kućište 2 pratećeg zupčanika, a zajedno sa njim i konični zupčanik 1, okrene se za ugao

$$\alpha = \alpha_1 - \alpha_2.$$

Ovaj ugaoni pomeraj se preko zupčanika 6 prenosi na izlaznu osovinu.

Na slici 2.10 prikazan je simbol za mehanički diferencijal kao detektor signala greške, gde su tokovi signala prikazani isprekidanim strelicama da bi se naglasilo da se radi o mehaničkim veličinama. Ako je iz nekih razloga potrebno da ugaoni pomeraj izlazne osovine  $\alpha$  bude jednak zbiru pomeraja  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$ , ugao  $\alpha_2$  se dovodi preko posebne ulazne osovine i dva jednaka zupčanika koji služe kao invertor smer rotacije. U tom slučaju će kod strelice koja označava smer  $\alpha_2$  biti znak „+“.



Slika 2.10. Simbol za mehanički diferencijal

## 2.8. Pneumatski detektori signala greške

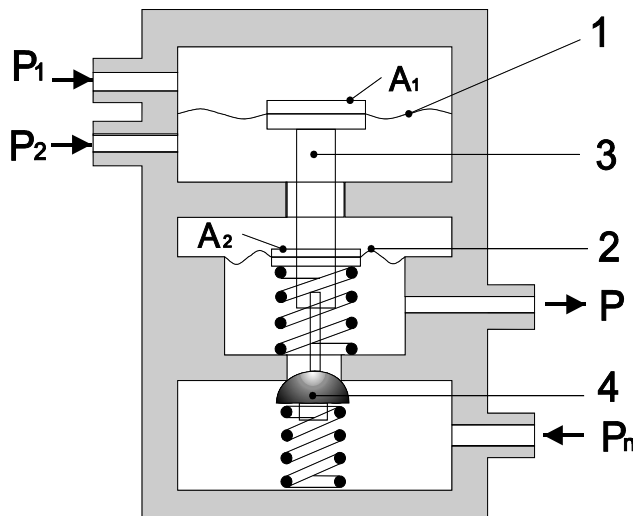
Pneumatski detektor signala greške je element pneumatskih sistema automatske regulacije koji daje na svom izlazu pritisak vazduha srazmeran razlici pritisaka na ulazu:

$$p = k(p_1 - p_2),$$

gde je  $k$  - pojačanje detektora signala greške.

Na slici 2.11 je prikazan pojednostavljen pneumatski detektor signala greške.

Vazduh pod pritiskom  $p_1$  ulazi u komoru iznad membrane (1), stvarajući na njenoj gornjoj strani silu pritiska  $F=A_1p_1$ , gde je  $A_1$  - površina membrane (1). Kroz drugi ulaz dolazi vazduh pod pritiskom  $p_2$ , stvarajući na donjoj strani membrane silu pritiska  $F_2=A_1p_2$ , koja je suprotnog smera od  $F_1$ . Na membranu (2) deluje sa donje strane pritisak  $p$ , koji je, u stvari, izlazni pritisak. Ovaj pritisak stvara silu pritiska na membranu (2)



$$F_2=A_2p,$$

gde je  $A_2$  - površina membrane (2).

Jahač (3), koji je kruto vezan za obe membrane, pomera se pod dejstvom rezultante svih sila. Pri pomeranju naniže on pritiska na ventil (4) u smeru njegovog otvaranja. Pri otvaranju ovog ventila vazduh iz donje komore ulazi u srednju, povećavajući u njoj pritisak  $p$ . Ovo traje dotle dok se ne izjednače sve sile koje deluju na sistem membrana i ventila. Jahač (3) ce se zaustaviti u položaju za koji su sve sile u statičkoj ravnoteži.

Slika 2.11. Pneumatski detektor signala greške

oprugama  $k_1$  i  $k_2$ . Međutim, ove opruge se izrađuju tako da je potrebna neznatna sila za njihovo sabijanje, pa se ove sile ne uzimaju praktično u obzir. Statička ravnoteža navedenih sila može se izraziti relacijom:

Strogo uzevši, postoje i sile naprezanja u

$$A_1(p_1 - p_2) - A_2p = 0,$$

odakle nalazimo izlazni pritisak  $p$ :

$$p = \frac{A_1}{A_2}(p_1 - p_2).$$

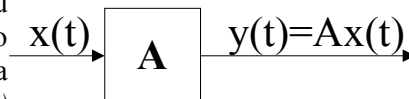
### 3. Pojačavači

#### 3.1. Funkcija pojačavača u sistemu automatskog upravljanja i regulacije

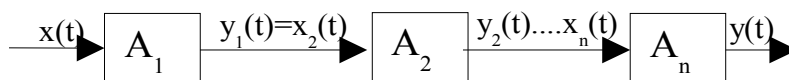
Izlazni signali koje daju merni pretvarači, kao i signal greške koji se formira u detektoru signala greške obično imaju malu snagu, nedovoljnu za ostvarivanje željenog efekta, pa se zato moraju pojačati. *Pojačavači* su uređaji u kojima se obavlja kvantitativno pretvaranje (pojačanje) ulaznog signala  $x(t)$  zahvaljujući postojanju pomoćnog izvora energije (slika 3.1). Izlazni signal pojačavača je

$$y(t) = Ax(t),$$

gde je  $x(t)$  ulazni signal, a  $A$  pojačanje pojačavača. Pojačanje  $A$  je neimenovan broj koji označava koliko puta je izlazni signal veći od ulaznog. Pojačavači mogu da budu jednostepeni i višestepeni. Princip rada višestepenih pojačavača je prikazan na slici 3.2.



Slika 3.1. Pojačavač



Slika 3.2. Višestepeni pojačavač

Izlazni signal iz prvog stepena  $y_1(t) = A_1x(t)$  vodi se na ulaz drugog stepena  $y_1(t) = x_2(t)$ , u kome se pojačava:

$$y_2(t) = A_2x_2(t) = A_1A_2x(t)$$

$A_1$  i  $A_2$  su pojačanja prvog i drugog stepena. Izlazni signal iz drugog stepena deluje na ulaz narednog stepena i tako sve do poslednjeg, izlaznog stepena, čiji je izlazni signal

$$y(t) = A_1A_2 \cdots A_n x(t) = Ax(t),$$

gde je  $A$  pojačanje višestepenog pojačavača

$$A = A_1A_2 \cdots A_n.$$

Prema energiji koja se dovodi iz spoljašnjeg izvora, pojačavači koji se koriste u sistemima upravljanja mogu biti električni, hidraulični i pneumatski. Hidraulični i pneumatski elementi automatizacije koriste energiju fluida, koji je kod hidrauličnih elemenata tečnost, najčešće ulje pod pritiskom, a kod pneumatskih elemenata komprimovani vazduh.

Osnovne karakteristike pojačavača su koeficijent pojačanja (ili kraće pojačanje pojačavača), energetska svojstva i vremenska konstanta.

*Koeficijent pojačanja* je odnos izlaznog i ulaznog signala.

U zavisnosti od prirode signala, definišu se:

- *pojačanje snage*, kao odnos izlazne i ulazne snage  $k_p = \frac{P_{iz}}{P_{ul}}$ ,
- *pojačanje struje*, kao odnos izlazne i ulazne struje  $k_i = \frac{I_{iz}}{I_{ul}}$ ,
- *pojačanje napona*, kao odnos izlaznog i ulaznog napona  $k_u = \frac{U_{iz}}{U_{ul}}$ .

*Energetska svojstva pojačavača* su snaga koja se dobija iz pomoćnog izvora, izlazna snaga pojačavača i koeficijent iskorišćenja.

*Vremenska konstanta* je dinamička karakteristika koja ukazuje na brzinu odziva pojačavača. Najjednostavnije rečeno, to je vreme koje je potrebno da se od momenta pojave signala na ulazu pojačavača, na izlazu pojavi signal odgovarajuće vrednosti (ništa se ne može desiti trenutno). Na primer, kod elektronskih pojačavača vremenska konstanta je reda  $10^{-6}$ s do  $10^{-10}$ s, dok je kod pneumatskih pojačavača reda 0.1s do 1s.

U okviru ovog poglavlja prvo ćemo se pozabaviti elektronskim (pojačavač jednosmerne struje,

operacioni pojačavač, fazno osetljivi pojačavač), zatim električnim (elektromašinski i magnetni) i na kraju neelektričnim pojačavačima (mehanički, pneumatski i hidraulični).

### 3.2. Elektronski pojačavači

Elektronski pojačavači su četvorokrajna elektronska kola (slika 3.3) koja imaju osobinu da je električna snaga  $P_2$  koju pojačavač odaje prijemniku  $R_p$ , veća od električne snage  $P_1$ , koju pojačavač prima od izvora ulaznog signala:



Slika 3.3. Četvorokrajno elektronsko kolo

$$P_2 > P_1$$

Kako se električna snaga može izraziti proizvodom napona i struje, matematička definicija pojačavača, izražena prethodnom relacijom, može se zameniti sledećom relacijom:

$$U_2 I_2 > U_1 I_1$$

Poslednju relaciju zadovoljavaju elektronska kola koja imaju jednu od sledećih osobina:

- $U_2 \gg U_1, I_2 \ll I_1$  - pojačavači napona,
- $I_2 \gg I_1, U_2 \ll U_1$  - pojačavači struje,
- $U_2 \gg U_1, I_2 \gg I_1$  - pojačavači snage.

Navedena podela pojačavača proizilazi iz same definicije pojačavača. Međutim, pojačavači se razlikuju i prema tome kakvi se električni signali pojačavaju. Prema obliku vremenske zavisnosti električnih signala pojačavači se razvrstavaju na pojačavače jednosmernih signala, pojačavače naizmeničnih signala niskih frekvencija (NF pojačavači za signale frekvencija od 20Hz do 20kHz), pojačavače naizmeničnih signala visokih frekvencija uskog opsega frekvencija (VF selektivni pojačavači) i pojačavače širokog opsega frekvencija (od 0Hz do više MHz) ili impulsne pojačavače.

Elektronski pojačavači jednosmernih električnih signala nalaze primenu u elektronskim mernim i regulacionim uređajima, u analognim računskim mašinama i drugde. Pojačavači naizmeničnih signala niskih frekvencija imaju najširu primenu. Gotovo da i nema oblasti primenjene elektronike u kojoj nisu zastupljeni. Selektivni pojačavači visokih frekvencija tipični su za žičane i bežične komunikacije, mada se mogu sresti i u nekim drugim oblastima. Pojačavači širokog opsega, ili impulsni pojačavači, primenjuju se u digitalnim sistemima, televiziji, radarskoj tehnici i drugim oblastima.

#### 3.2.1. Primer: elektronski pojačavač jednosmerne struje

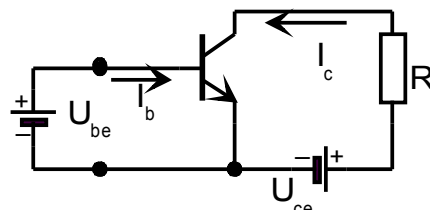
Osnovni pojačavački (aktivni) elementi elektronskih pojačavača su tranzistori. U elektronici se pokazuje da tranzistor ima osobinu pojačavaca struje. Moguće su tri osnovne veze tranzistora u kolo pojačavača: veza sa zajedničkim emitorom, veza sa zajedničkom bazom i veza sa zajedničkim kolektorom. Kao ilustraciju uzećemo pojačavač sa zajedničkim emitorom (slika 3.12).

Ako se struja baze posmatra kao ulazna struja, u kolu kolektora se javlja struja  $I_c$  koja je  $\beta$  puta veća od struje baze:

$$I_c = \beta I_b$$

gde je  $\beta$  koeficijent strujnog pojačanja tranzistora.

Pošto se elektronski pojačavači detaljnije obrađuju u okviru elektronike, ovde se nećemo upuštati u detaljan opis njihovog rada.

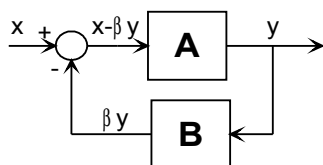


Slika 3.4. pojačavač sa zajedničkim emitorom

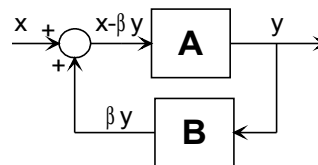
### 3.3. Pojačavači sa povratnom spregom

Pod povratnom spregom se kod pojačavača podrazumeva električna veza između izlaza i ulaza pojačavača, kojom se deo izlaznog signala vraća na ulaz tako da umanjuje ili povećava amplitudu signala na ulazu pojačavača. Povratna sprega kojom se povećava signal na ulazu naziva se pozitivna povratna sprega ili pozitivna reakcija, a ona kojom se umanjuje signal na ulazu negativna povratna sprega ili negativna reakcija.

Na slici 3.5 je prikazana blok šema za slučaj negativne povratne sprege, a na slici 3.6 blok šema za slučaj pozitivne povratne sprege.



Slika 3.5. Negativna povratna sprega



Slika 3.6. Pozitivna povratna sprega

Ukupno pojačanje  $A_r$  kola sa negativnom povratnom spregom će iznositi:

$$A_r = \frac{A}{1 + \beta A}$$

Analogno tome, ukupno pojačanje  $A_r$  za slučaj kada imamo kolo sa pozitivnom povratnom spregom će iznositi:

$$A_r = \frac{A}{1 - \beta A}$$

gde je:

- A – pojačanje kola u direktnoj grani (vrednost pojačanja kad ne bi bilo povratne sprege),
- $\beta$  – stepen reakcije ili stepen povratne sprege (pojačanje u kolu povratne sprege – koliko se pojača ili oslabi signal sa izlaza dok stigne na ulaz),
- x – ulazna veličina pojačavača,
- y – izlazna veličina pojačavača.

Ovo važi za sve tipove pojačavača – i električne i neelektrične. Neki pojačavači se koriste bez povratne sprege, a neki sa povratnom spregom.

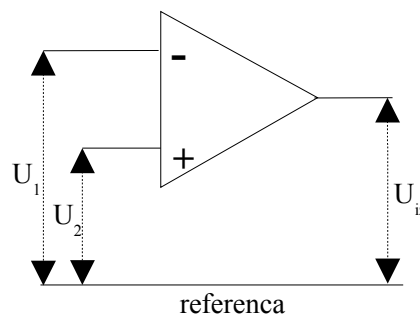
Pojačavači se, u opštem slučaju, sastoje od više različitih elemenata. Promenom spoljnih uslova, starenjem pojedinih elemenata ili čak sa većom promenom ulaznog signala pojačavača može da dođe do promene koeficijenta pojačanja pojačavača. Na promenu pojačanja mogu uticati i karakteristike i kvalitet pojedinih delova pojačavača. Povratna sprega se, između ostalog, koristi da bi se izbegle ili bar ublažile promene koeficijenta pojačanja u takvim situacijama. Najčešće se koristi negativna povratna sprega radi povećanja stabilnosti pojačanja pojačavača u odnosu na promene parametara pojačavačkih elemenata.

### 3.4. Operacioni pojačavači

Operacioni pojačavač je diferencijalni pojačavač sa dva ulaza i jednim izlazom. Na izlazi operacionog pojačavača se dobija signal čija je veličina određena razlikom ulaznih napona  $U_1$  i  $U_2$ , kao i pojačanjem A:

$$U_{iz} = A \cdot (U_2 - U_1).$$

Upotrebom negativne povratne sprege i dodatnih elemenata, kao što su otpornici, kondenzatori, kalemovi, uz pomoć operacionog pojačavača mogu da se izvode matematičke operacije sa električnim signalima (sabiranje, oduzimanje, množenje konstantom, ...).



Slika 3.7. Operacioni pojačavač

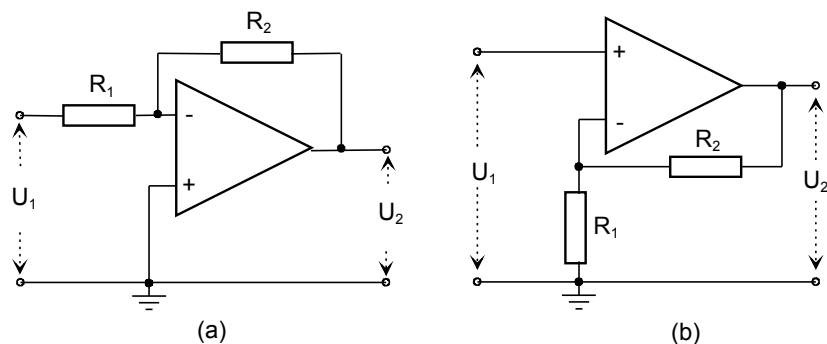
Radi uspešnog obavljanja ovih operacija operacioni pojačavači moraju posedovati sledeće osobine:

- veliko pojačanje bez reakcije (veće od 100000),
- veliku ulaznu otpornost (veću od 100 kQ),
- malu izlaznu otpornost (manju od 100 Q),
- veliku temperaturnu stabilnost jednosmernog režima rada tranzistora.

Usled tako strogih zahteva operacioni pojačavač je dosta složeno elektronsko kolo, sa velikim brojem tranzistora i drugih elemenata. Zato je dobro rešenje da se izrađuje u integrisanoj tehnologiji. Simbolička oznaka operacionog pojačavača prikazana je na slici 3.7. Ulaz označen znakom minus je invertujući. To znači da ako se na invertujući ulaz dovede napon pojačani napon je suprotnog znaka od ulaznog. Znakom plus označava se neinvertujući ulaz. Ako se na neinvertujući ulaz dovede napon pojačani napon je istog znaka kao napon doveden na ovaj ulaz. Takva osobina operacionih pojačavača omogućena je napajanjem iz dva izvora suprotnih polariteta.

### 3.4.1 Primer 1: Invertujući i neinvertujući pojačavač

Kod operacionih pojačavača redovno se primenjuje negativna povratna sprega ili negativna reakcija. Osnovni načini izvođenja negativne reakcije prikazani su na slici 3.8. Na slici 3.8a je prikazan invertujući, a na slici 3.8b neinvertujući pojačavač sa negativnom reakcijom.



Slika 3.8. Operacioni pojačavač sa negativnom povratnom spregom

Smatra se da je operacioni pojačavač idealan ako su mu ulazna impedansa i pojačanje beskonačno velike vrednosti, a izlazna impedansa jednaka nuli.

Prvo ćemo posmatrati invertujući pojačavač:

Na slici 3.8a se vidi da se ulazni napon dovodi na invertujući ulaz operacionog pojačavača. Ako kažemo da je operacioni pojačavač idealan, znači da smatramo da je ulazna impedansa skoro beskonačna, odakle sledi da struja ne ulazi u operacioni pojačavač već da se kreće kroz granu povratne sprege ka izlazu. To takođe znači da su oba ulaza operacionog pojačavača na istom potencijalu, odakle na osnovu šeme sledi da su oba ulazna kraja operacionog pojačavača na potencijalu mase. Zbog toga se može izračunati da je struja kroz otpornik  $R_1$  jednaka

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1}.$$

Pošto struja ne može da teče u operacioni pojačavač, ona ide kroz granu povratne sprege. Na osnovu toga što je invertujući ulaz operacionog pojačavača na potencijalu mase, a uspeli smo da odredimo kolika je jačina struje koja ide kroz granu povratne sprege u smeru od ulaza ka izlazu, možemo izlazni napon odrediti kao:

$$U_2 = -R_2 I_1 = -\frac{R_2}{R_1} U_1.$$

Prema tome, naponsko pojačanje invertujućeg pojačavača sa negativnom povratnom spregom iznosi:

$$A = \frac{U_2}{U_1} = -\frac{R_2}{R_1}.$$

Pojačanje neinvertujućeg pojačavača (slika 3.8b) se izračunava na sličan način. Opet važi pretpostavka da je operacioni pojačavač idealan. Pošto su ulazni krajevi operacionog pojačavača na istom



potencijalu, struja kroz otpornik  $R_1$  iznosi  $I_1 = \frac{U_1}{R_1}$ .

Napon na izlazu je

$$U_2 = (R_1 + R_2)I_1 = \frac{R_2 + R_1}{R_1}U_1,$$

$$U_2 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)U_1.$$

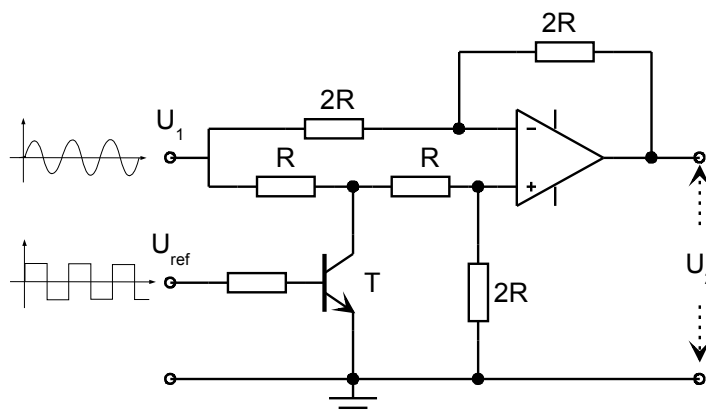
Na osnovu ovoga, naponsko pojačanje neinvertujućeg pojačavača sa negativnom povratnom spregom iznosi

$$A = \frac{U_2}{U_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}.$$

Na osnovu dobijenih izraza za pojačanje i invertujućeg i neinvertujućeg pojačavača sa negativnom povratnom spregom vidimo da se može relativno jednostavno ostvariti željena vrednost pojačanja, kao i da to pojačanje ne zavisi od parametara pojačavača.

### 3.5. Fazno osetljivi pojačavači

Fazno osetljivi pojačavači su takvi pojačavači kod kojih izlazni napon zavisi od faznog stava ulaznog napona. Postoji dosta različitih izvedbi fazno osetljivih pojačavača. Ovde ćemo prikazati način rada fazno osetljivog pojačavača koji je realizovan pomoću operacionog pojačavača i tranzistora. U ovom slučaju se na ulaz dovodi naizmenični napon, a na izlazu se dobija jednosmerni napon čija srednja vrednost i polaritet zavise od faznog stava ulaznog napona.



Slika 3.9. Fazno osetljivi pojačavač

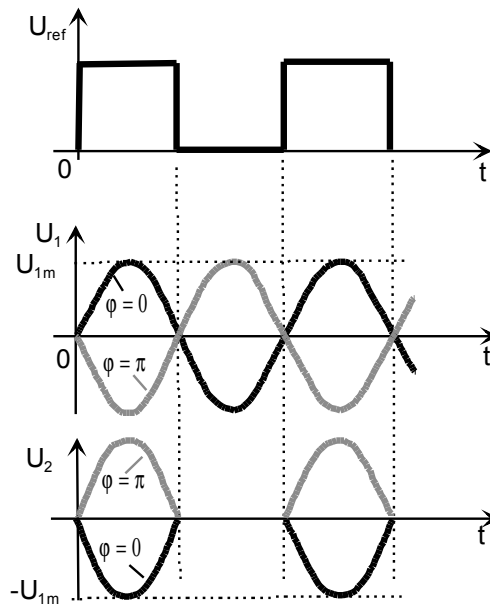
Na slici 3.9 prikazana je principna šema fazno osetljivog pojačavača sa operacionim pojačavačem i tranzistorom koji ima ulogu prekidača. Princip rada ovog pojačavača najlakše se objašnjava posmatranjem vremenskih dijagrama napona. Na slici 3.10 prikazani su vremenski dijagrami napona  $U_1$ ,  $U_{ref}$  i  $U_2$  za slučaj kada se  $U_1$  fazno poklapa sa  $U_{ref}$ .

Kada je napon  $U_{ref}$  veći od nule, tranzistor T provodi struju u režimu zasićenja, pa kratko spaja donji ulazni kraj operacionog pojačavača sa masom preko otpora R. Napon  $U_1$  je prisutan na invertujućem ulazu, pa se na izlazu dobija invertovani napon  $U_1$ . Kada je  $U_{ref}=0$  tranzistor T ne provodi struju, pa je napon  $U_1$  prisutan na oba ulaza operacionog pojačavača. Iz toga možemo da zaključimo da je tada izlazni napon jednak nuli. Sa dijagrama napona na slici 3.10, vidi se da je izlazni napon jednosmeran pulsirajući, čija je srednja vrednost:

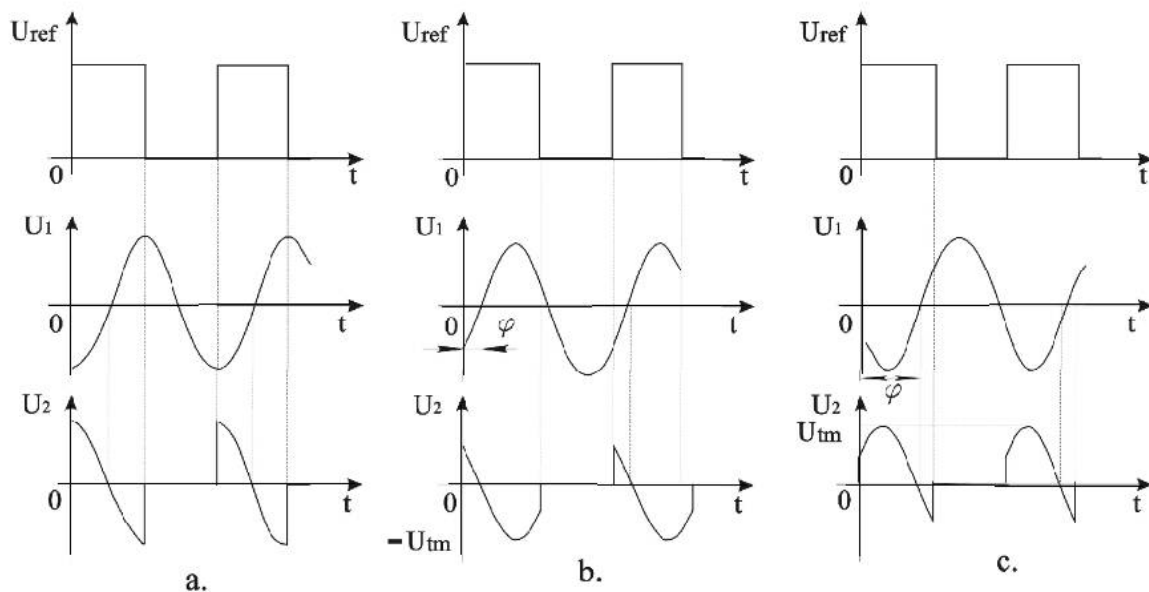
$$U_{2sr} = \frac{U_{1m}}{\pi},$$

dakle, srazmerna amplitudi ulaznog napona.

Kada ulazni napon promeni fazu za  $180^\circ$  električnih, njegov vremenski dijagram ima oblik koji je prikazan svetlijom linijom. Na izlazu pojačavača će postojati pozitivan pulsirajući napon, čija je srednja vrednost određena prethodnom relacijom.



Slika 3.10. Vremenski dijagrami napona fazno osetljivog pojačavača

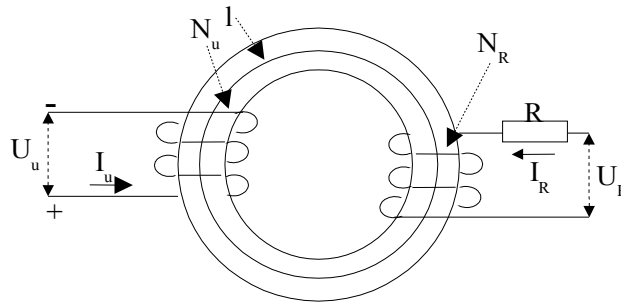


Slika 3.11. Vremenski dijagrami napona fazno osetljivog pojačavača

Kada je napon  $U_1$  fazno pomeren prema  $U_{ref}$  za  $90^\circ$  električnih, kao što je prikazano na slici 3.11a, na izlazu se javlja naizmeničan napon nepravilnog oblika, čija je srednja vrednost jednaka nuli. Kada je napon  $U_1$  fazno pomeren prema  $U_{ref}$  za fazni ugao  $\varphi < 90^\circ$  električnih, izlazni napon ima oblik kao na slici 3.11b. Srednja vrednost ovog napona je negativna, i po apsolutnoj vrednosti manja od srednje vrednosti  $U_2$  za slučaj kada je  $\varphi = 0$ . Kada je fazni pomeraj  $\varphi > 90^\circ$  električnih, vremenski dijagram izlaznog napona ima oblik kao na slici 3.11c. Srednja vrednost ovog napona je pozitivna, ali manja od one za  $\varphi = 180^\circ$  električnih. Uopšte, srednja vrednost napona  $U_2$  u zavisnosti od amplitude i faznog stava napona  $U_2$  određena je relacijom:

### 3.6. Magnetni pojačavači

Magnetni pojačavač je elektromagnetni uređaj koji ima svojstvo pojačavača električnih signala. Njegov rad se zasniva na svojstvu feromagnetnih materijala da menjaju magnetne osobine sa promenom jednosmerne struje koja se dovodi na namotaje koji su namotani oko tog materijala. Takvo delovanje jednosmerne struje na materijal naziva se predmagnetizirajuće dejstvo. Ono što se menja sa promenom te jednosmerne struje je magnetna permeabilnost (propustljivost)  $\mu$  feromagnetnog materijala.



Slika 3.12. Magnetni pojačavač

Najjednostavniji magnetni pojačavač je prigušnica sa jezgrom od feromagnetnog materijala (slika 3.12), čija se induktivnost može menjati pod dejstvom upravljačke jednosmerne struje. Na zajedničkom torusnom jezgrom magnetne permeabilnost  $\mu$  nalaze se ulazni – upravljački, i izlazni – radni namotaj. Na krajeve ulaznog namotaja priključen je jednosmerni upravljački signal  $U_u$ , a na krajevima izlaznog namotaja deluje naizmenični napon  $U_R$ , koji se dobija iz pomoćnog izvora energije.

Struja u izlaznom kolu je naizmenična, efektivne vrednosti:

$$I_R = \frac{U_R}{\sqrt{R_{iz}^2 + (\omega L)^2}}$$

gde su:  $R_{iz} = R + r$  ukupna otpornost u izlaznom kolu,  $R$  – otpornost opterećenja,  $r$  – otpornost gubitaka izlaznog namotaja,  $\omega$  – ugaona učestanost izlaznog napona i  $L$  – induktivnost izlaznog namotaja. Kada je  $R_{iz} \ll \omega L$ , približna jačina struje u izlaznom kolu zavisi od induktivnosti izlaznog namotaja:

$$I_R \approx \frac{U_R}{\omega L} = f(L).$$

Induktivnost izlaznog namotaja je:

$$L = \mu \frac{N_R^2 S}{l} = f(\mu)$$

Induktivnost izlaznog namotaja zavisi od magnetne permeabilnosti  $\mu = \mu_0 \mu_r^*$ , kao i od broja zavojsa  $N_R$ , poprečnog preseka  $S$  izlaznog namotaja i srednje dužine magnetnih linija  $l$ . Očigledno, jačina struje u izlaznom kolu zavisi od vrednosti magnetne permeabilnosti  $\mu$ .

Feromagnetici su nelinearni magnetni materijali čija vrednost magnetne permeabilnosti  $\mu$  zavisi od predmagnetizujućeg dejstva jednosmerne struje. Magnetna permeabilnost se računa kao odnos magnetne indukcije  $B$  i magnetnog polja  $H$ :

$$\mu = \frac{B}{H}.$$

Magnetno polje u jezgrom sadrži dve komponente:  $H = H_u + H_r$ , gde je

$$H_u = \frac{N_u I_u}{l}$$

jednosmerno polje koje potiče od struje  $I_u$  kroz upravljački namotaj, a

$$H_r = \frac{N_R I_R}{l}$$

naizmenično polje koje stvara naizmenična struja  $I_R$  kroz prigušnicu.

Kada je upravljački napon jednak nuli,  $U_u=0$ , na ulazu magnetnog pojačavača nema signala i jačina

\*  $\mu_0$  je magnetna permeabilnost vakuuma, a  $\mu_r$  je relativna magnetna permeabilnost feromagnetnog materijala.

jednosmernog magnetnog polja je takođe jednaka nuli,  $H=0$ . Tada je magnetna permeabilnost maksimalna,  $\mu=max$ , pa je i induktivnost izlaznog namotaja maksimalna,  $L=max$ . Izlazna struja  $I_R$  ima malu jačinu i naziva se *struja praznog hoda*  $I_{R0}$ . Veći deo izlaznog napona je na namotaju, a manji deo na opterećenju otpornosti R.

Kada se na ulaz dovede upravljački signal  $U_u$ , kroz ulazno kolo protiče jednosmerna struja  $I_u$ . Sa porastom jačine  $I_u$  jačina jednosmernog magnetnog polja  $H$  raste. Jezgro se namagnetiše i njegova magnetna permeabilnost  $\mu$  opada. Reaktivna otpornost izlaznog namotaja  $\omega L$  se smanjuje, pa izlazna struja  $I_R$  raste. Sada veći deo izlaznog napona ide na prijemnik R, a manji deo na namotaj.

Iz ovoga možemo da zaključimo da se pomoću jednosmerne struje  $I_u$  na ulazu, koja potiče od upravljačkog signala, upravlja jačinom struje u izlaznom kolu  $I_R$ .

Ako je broj zavoja ulaznog namotaja  $N_u$  mnogo veći od broja zavoja izlaznog namotaja  $N_R$ ,  $N_u \gg N_R$  (princip rada transformatora):

$$\frac{N_u}{N_R} = \frac{I_R}{I_u},$$

Pa se može pisati izraz za struju na prijemniku:

$$I_R = I_u \frac{N_u}{N_R} \gg I_u$$

Izlazna struja je mnogo veća od ulazne: dobija se pojačanje struje, odnosno veliki napon na prijemniku R.

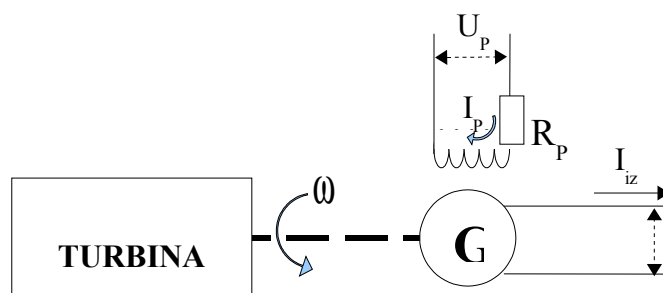
Jedna od važnih osobina magnetnih pojačavača je u tome što je električno kolo ulazne struje galvanski izolovano od kola izlazne struje. Kod elektronskih pojačavača ovaj zahtev se rešava dodavanjem dosta složenih elektronskih kola. Pored toga, magnetni pojačavači se odlikuju jednostavnošću konstrukcije, velikom stabilnošću rada i mogućnošću korišćenja u različitim uslovima (širok opseg temperaturnih promena, promena pritiska i vlažnosti, sigurnost od požara, jer nema izvora varničenja...). Nedostatak im je ograničena primena na pojačanje jednosmerne struje, kao i naizmeničnih, ali niskih učestanosti. Pored toga, magnetni materijali uzrokuju radio-smetnje, što je opasno u avionima ili brodovima.

### 3.7. Elektromašinski pojačavači

Elektromašinski pojačavači su uređaji koji pretvaraju mehaničku energiju u električnu, s tim da je električna energija koja se dovodi na ulaz mnogostruko manja od dobijene energije na izlazu.

Električna energija koja se dovodi na ulaz upravlja procesom transformacije mehaničke energije u električnu.

Postoji mnogo raznih izvora mehaničke energije. Kao ilustrativni primer izvora mehaničke energije uzećemo turbinu u hidroelektrani. Pojačavački element je u ovom primeru generator jednosmerne struje\*.



Slika 3.13. Elektromašinski pojačavač

\* Princip rada generatora jednosmerne struje opisan je u okviru gradiva prethodnog razreda: tahogenerator jednosmerne struje

Generator jednosmerne struje ima spoljašnju pobudu: na pobudni, statorski namotaj dovodi se ulazni napon  $U_p$ . Izlazni napon generatora zavisi od brzine obrtanja rotora  $\omega$ , odnosno od broja obrtaja u minuti  $n$ :

$$U_{iz} = k_e \cdot \phi \cdot n,$$

gde je  $k_e$  konstrukciona konstanta generatora, a  $\phi$  pobudni fluks.

Rotor generatora obrće se pomoću izvora mehaničke energije (u našem slučaju to je turbina) koji ima konstantan broj obrtaja u minuti ( $n=const$ ). Pobudni fluks generatora  $\phi$  zavisi od pobudne struje  $I_p$ :

$$\phi = k_\phi I_p,$$

gde je  $k_\phi$  koeficijent proporcionalnosti. Ako ovo uzmemo u obzir, izlazni napon će biti:

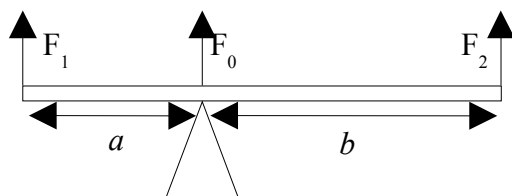
$$U_{iz} = k I_p.$$

Jačina pobudne struje može se menjati pomoću promenljivog otpornika u pobudnom kolu,  $R_p$ , odakle sledi da se izlazni napon može menjati u širokim granicama.

U primeru koji je naveden vrši se pretvaranje mehaničke energije koju daje turbina u električnu energiju na izlazu generatora, s tim da ulazni električni signal određuje veličinu energije na izlazu. U ovom slučaju je ulazna snaga  $P_{ul} = U_p \cdot I_p$  mnogostruko manja od izlazne snage. Pojačanje snage se može izraziti sa:

$$k_p = \frac{P_{iz}}{P_{ul}} = \frac{U_{iz} \cdot I_{iz}}{U_p \cdot I_p}$$

### 3.8. Mehanički pojačavač



Slika 3.14. Poluga kao mehanički pojačavač

Najjednostavniji primer mehaničkog pojačavača je poluga, čiji je osnovni princip izvedbe i delovanja pokazan na slici 3.14.

Prema zakonu poluge moment sile  $F_1$  i kraka  $a$  jednak je momentu sile  $F_2$  i kraka  $b$ , odnosno

$$F_1 \cdot a = F_2 \cdot b$$

Na osnovu toga, sila  $F_2$  može da se dobije kao proizvod koeficijenta krakova  $a$  i  $b$ , i sile  $F_1$ :

$$F_2 = \frac{a}{b} \cdot F_1 = K \cdot F_1.$$

Koeficijent krakova je zapravo pojačanje poluge  $K$ . Pojačanje poluge je veće ako je odnos krakova  $a$  i  $b$  veći, odnosno ako je oslonac poluge bliži sili  $F_2$ . Ukupna sila koja opterećuje oslonac poluge iznosi:

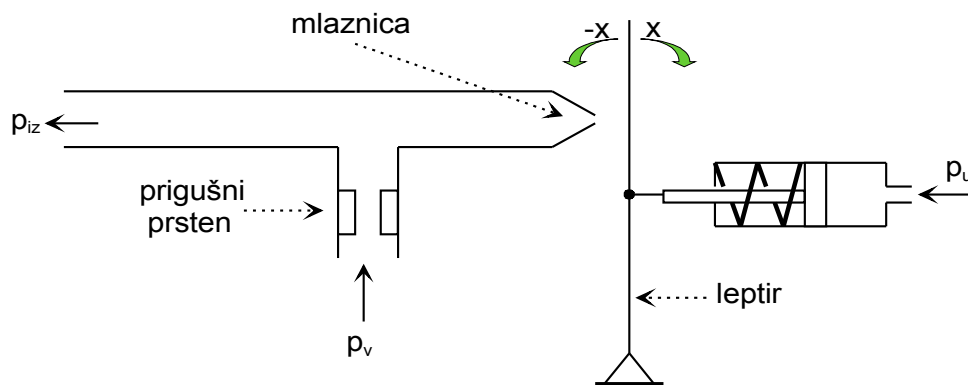
$$F_0 = F_1 + F_2.$$

Mehanički pojačavač sa polugom u načelu je analogan svim drugim izvedbama pojačavača. Ulazna veličina pojačavača može se uporediti sa silom  $F_1$ , izlazna sa silom  $F_2$ , a ukupno opterećenje i snaga koju troši pojačavač mogu se uporediti sa silom  $F_0$ , odnosno snagom kojom deluje pojačavač.

### 3.9. Pneumatski pojačavači

Pneumatski pojačavači su pojačavači kod kojih se za prenos energije koristi vazduh pod pritiskom. Imaju jednostavnu konstrukciju. Mogu da rade pri niskim i pri visokim temperaturama. Kao i kod svih drugih pojačavača, mali ulazni signali, koji se dovode na ulaz, pretvaraju se u signale na izlazu koji imaju veću snagu. Velika izlazna snaga je potrebna za upravljanje nekim izvršnim elementom. Ako je potrebno dobiti još veću izlaznu snagu, može se koristiti kaskadna veza dva ili više pojačavača (izlaz prvog se dovodi na ulaz drugog i tako redom).

U cilju ilustracije rada pneumatskih pojačavača posmatraćemo *pneumatski ventil* (sl.3.15).



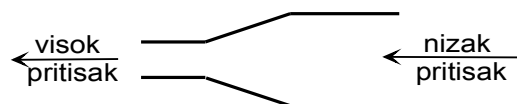
Slika 3.15. Pneumatski ventil

Princip rada pneumatskog ventila zasniva se na promeni zazora između leptira i mlaznice pod dejstvom upravljačkog pritiska  $p_u$ . Vazduh iz pomoćnog izvora ulazi u ventil pod visokim pritiskom  $p_v$ . Prilikom prolaska kroz prigušni prsten pritisak opada, tako da je izlazni pritisak  $p_{iz}$  niži od pritiska  $p_v$ ,  $p_{iz} < p_v$ . Izlazni pritisak  $p_{iz}$  zavisi od veličine zazora između leptira i mlaznice. U slučaju smanjenja zazora, otpor prolaska vazduha kroz mlaznicu se povećava i izlazni pritisak raste. Obrnuto, sa povećanjem zazora izlazni pritisak opada. Upravljački pritisak je pritisak vazduha na izlazu mlaznice.

Ono što može da bude nedostatak pneumatskih pojačavača su strogi zahtevi za sušenjem i čišćenjem vazduha od nečistoća. Sem toga, prilikom prenosa signala javlja se i kašnjenje. Brzina promena signala je jednaka brzini zvuka u vazduhu, dok je brzina prenosa signala kod elektronskih pojačavača bliska brzini svetlosti.

### 3.10. Hidraulični pojačavači

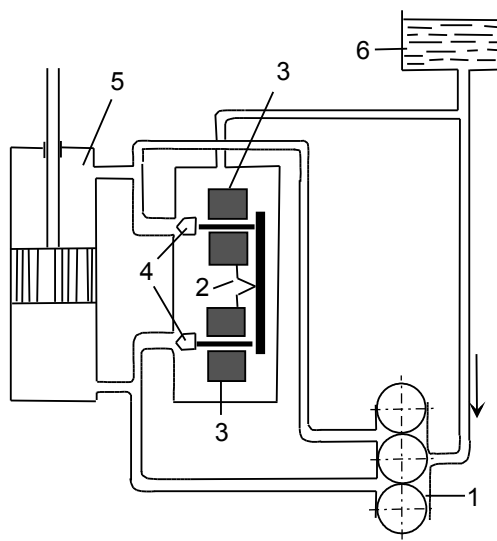
Hidraulični pojačavači su oni pojačavači kod kojih se za prenos energije koristi tečnost pod pritiskom. Najjednostavniji primer hidrauličnog pojačavača predstavlja suženje u cevi (sl.3.16). U ovom slučaju na ulaz se dovodi hidraulična tečnost pod određenim pritiskom, a na izlazu se dobija pojačan pritisak. Pojačanje pritiska zavisi od toga koliko je presek druge cevi manji od preseka prve cevi.



Slika 3.16. Suženje cevi kao hidraulični pojačavač

Hidraulični pojačavači su u praksi dobili široku primenu zbog neznatne snage koja se troši na upravljanje, visokog koeficijenta iskorišćenja izvora energije, kao i mogućnosti dobijanja velike snage na izlazu pojačavača.

Drugi primer hidrauličnog pojačavača dat je na slici 3.17.



Slika 3.17. Hidraulični pojačavač

Ovaj hidraulični pojačavač se sastoji iz pumpe sa rezervoarom za ulje, razvodnika, koji reguliše kretanje ulja, i izvršnog elementa (hidrocilindra ili hidromotora). Radna tečnost hidrauličnog pojačavača je mineralno ulje. Zahvaljujući tome što je ulje praktično nestišljivo, inercija i kašnjenje pojačavača su relativno mali.

Rad hidrauličnog pojačavača se odvija na sledeći način: pumpa koju pokreće pomoćni elektromotor, potiskuje ulje iz rezervoara, preko cevovoda, u hidrorazvodnik, a iz njega u hidropogon. Menjajući protok ulja pomoću hidrorazvodnika može se regulisati brzina hidropogona, pa, prema tome, i snaga na osovini. Hidrorazvodnik je u ovom slučaju upravljački element. Kako je za pomeranje pokretnog dela razvodnika potrebna neznatna snaga, a na osovini hidro pogona se može razviti velika snaga, koeficijent pojačanja snage hidrauličnog pojačavača može da dostigne velike vrednosti (od  $10^3$  do  $10^4$ ). Ako se zna da hidromotor može da razvije velike obrtne momente, može se vezati za osovinu upravljanog objekta neposredno, bez mehaničkog reduktora.

Na slici 3.17. je prikazana principska šema hidrauličnog pojačavača sa pumpom koja daje tečnost čiji je proizvod pritiska i protoka konstantan i elektromagnetnim razvodnikom kao upravljačkim elementom. Namena sistema jeste upravljanje pomeranjem klipa hidrocilindra (5) u zavisnosti od promene signala koji se dovodi na namotaj (3) elektromagneta razvodnika. Sistem se sastoji iz sledećih osnovnih elemenata: zupčaste pumpe (1) sa dvojnim izlazom, diferencijalnog razvodnika (2), pokretanog elektromagnetima, hidrocilindra (5) kao izvršnog elementa i rezervoara za ulje (6). U odsustvu ulaznog signala kroz namotaje elektromagneta protiču jednake struje (čija vrednost može biti jednaka nuli). Pri tome su igle ventila u srednjem položaju, tako da su pritisci u kompresionim šupljinama pumpe jednaki. Zbog toga klip cilindra ostaje nepomičan. Kada postoji signal upravljanja, struje namotaja su različite. Usled toga se javlja momenat elektromagnetnih sila, koji iglu jednog ventila približava sedlu, a drugu udaljava od sedla. Ovi ventili rade kao prigušnice u hidrauličnom kolu pumpe. Ventil koji se zatvara smanjuje protok ulja iz pumpe u rezervoar, pa se u toj grani povećava pritisak. Ventil koji se otvara povećava protok ulja iz pumpe u rezervoar, pa se u toj grani hidrauličnog kola smanjuje pritisak. Usled toga se u jednoj komori cilindra povećava pritisak, a u drugoj smanjuje. Rezultat svega je pomeranje klipa cilindra u skladu sa ulaznim signalom.