

5. MJERENJE POMJERAJA, BRZINE I UBRZANJA

5.1. MJERENJE TRANSLACIONOG I ROTACIONOG POMJERAJA

Služe za pretvaranje promjena translacionog ili ugaonog pomjeraja u izlazni signal. Regulisana veličina pomjeraja može biti razlika nivoa tečnosti od početne vrijednosti, rastojanje između pokretnih djelova ili čvorova mašine, dimenzija dijelova koji se razvrstavaju ili dimenzije djelova koji se dobijaju u procesu automatske obrade.

5.1.1. Potenciometarski senzori

Ovi senzori pretvaraju translacioni ili ugaoni pomjeraj u konstantan ili promjenljivi napon na bazi promjene svoje električne otpornosti.

Najbolja rezolucija će se dobiti ako se potenciometar realizuje kao ravan provodnik i klizni kontakt vezan za objekat čije pomjeranje će se mjeriti. Uzmu li se u obzir specifična otpornost i čvrstoća otporne žice, pojavljuje se problem zbog potreba za vrlo malim poprečnim presjekom, da bi se za male pomjeraje dobila zadovoljavajuća promjena otpornosti (adekvatna osjetljivost senzora). Veoma tanka otporna žica nebi imala dovoljnu mehaničku čvrstoću potrebnu za dugotrajan pouzdan rad.

Da bi se ovaj problem prevazišao, uglavnom se koriste otporni elementi dobijeni namotavanjem žice na tјelo potenciometra. Namotaji oko tјela su međusobno izolovani za sprečavanje kratkih spojeva. Kontakt (klizač/ četkica) se kreće poprečno preko namotaja od jednog zavojka prema sljedećem. Otporna žica namotaja je obično od: konstantana, manganina, legura nikla i hroma, legura srebra i paladija, legura platine i iridijuma. Debljina žice je prečnika $(0,03 \div 0,1)[mm]$ za precizne potenciometre, odnosno $(0,3 \div 0,4)[mm]$ za potenciometre niže klase tačnosti. Tјelo

potenciometra je od izolacionog materijala (ebonit, tekstolit, oksidirani aluminijum i drugi).

Tijelo potenciometra može biti izrađeno i od otpornog filma (metalnog, ugljenog, plastičnog, keramičko-metalna smjesa itd.)

Vrijednost kontaktne sile između klizača i otpornog dijela iznosi (50-1500) [mN], a vrijednost prelaznog otpora na istom mjestu (10÷100) [mΩ].

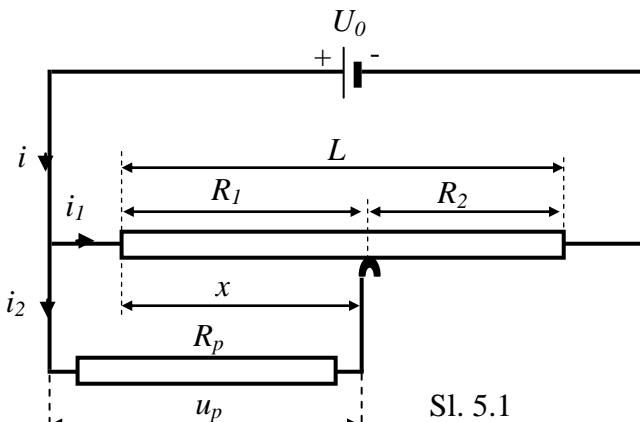
Mjerno područje za tralnslaciona pomjeranja je od 10 [mm] do nekoliko metara (obično do 10 [m]), a za ugaona pomjeranja $0^{\circ}\div 1^{\circ}$, zatim $0^{\circ}\div 360^{\circ}$ ili za pomjeranje više od jednog kruga $0^{\circ}\text{-}3600^{\circ}$ (desetoobrtni potenciometri).

Potenciometar na Sl.5.1. je dat u vezi sa izvorom za napajanje U_0 , za mjerjenje translacionog pomjeranja x . Izlazna veličina je napon u_p koji se dobija sa potenciometra. Sa slike je

$$i = i_1 + i_2$$

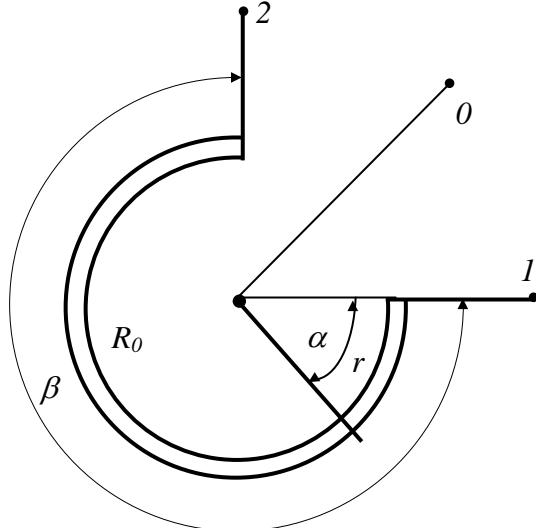
$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{x}{L} \quad (5.1)$$

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{R_p}{R_1} ; \quad u_p = i_2 \cdot R_p ; \quad U_0 = i_2 \cdot R_p + iR_2 .$$



Sl. 5.1

Iz zadnjih jednačina je :



Sl.5.5.

$$u_p = U_0 \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_1 R_2}{R_p (R_1 + R_2)}} = U_0 \cdot \frac{R_1}{R_0} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_1 R_2}{R_p R_0}}; \quad (5.2)$$

$$R_0 = R_1 + R_2$$

Ako je R_p vrlo veliko (za otvorene krajeve na mjestu potrošača je $R_p = \infty$), tada se zadnja jednačina može napisati u obliku:

$$u_p \cong \frac{U_0 R_1}{R_1 + R_2} = \frac{U_0}{L} \cdot x = K \cdot x; \quad K = \frac{U_0}{L},$$

Izlazna veličina (informacijski signal) u_p je proporcionalan ulazu (mjerni signal) x sa koeficijentom proporcionalnosti K . Parametar K je istovremeno osjetljivost ovog mjernog elementa jer vrijedi :

$$\frac{du_p}{dx} = \frac{U_0}{L} = K.$$

Vrlo slična analiza vrijedi za potenciometar prikazan na Sl.5.5. Ugaona promjena α pretvara se u promjenu otpornosti između priključaka 0 i 1.

Ova otpornost iznosi: $r = \frac{\alpha}{\beta} \cdot R_0 = \frac{R_0}{\beta} \cdot \alpha = K \cdot \alpha$.

Osjetljivost elementa je $\frac{dr}{d\alpha} = \frac{R_0}{\beta} = K$.

Greške potenciometra zavise od više faktora. Kod žičanih potenciometara se otpornost ne može kontinualno mijenjati sa kontinualnom promjenom veličine x . Otpornost se mijenja skokovito pri prelasku klizača sa jednog zavojka na sljedeći. Ako je ukupan broj zavoja otporne žice N , maksimalna osjetljivost je $\Delta R_N = \frac{R_0}{N}$. *Rezolucija* potenciometra je

$$\frac{\Delta R_N}{R_0} = \frac{1}{N}$$

Greške uslijed neravnomjernosti karakteristika su posljedica promjenljivog presjeka otpornog materijala, promjenljivosti koraka itd. Greška zbog neravnomjernosti karakteristika je :

$$\Delta R = R_s - R_t$$

R_s - stvarna vrijednost otpornosti potenciometra na otpornom dijelu dužine x .

R_t - teoretska vrijednost otpornosti potenciometra na otpornom djelu dužine x (iz (5.1) je $R_t = R_1 = R_0 \cdot \frac{x}{L}$).

Greška zbog neravnomjernosti se takođe obično računa u relativnim jedinicama prema: $\varsigma = \frac{\Delta R}{R_0} \cdot 100[\%]$. Zavisno od klase tačnosti razlikujemo slučajeve:

- niska klasa tačnosti $\varsigma \in (1 \div 2)\%$
- srednja klasa tačnosti $\varsigma \in (0.25 \div 0.5)\%$
- precizni potenciometri $\varsigma \in (0.05 \div 0.1)\%$

5. Mjerenje pomjeraja, brzine i ubrzanja

65

Greška potenciometra u obliku prstena, uslijed radijalnog zazora, određuje se po formuli :

$$\Delta R_z = \frac{R_0 \cdot \Delta z}{\alpha \cdot r_p}$$

gdje je: Δz - radijalni zazor između ose i prstena ,

α - ugao zakretanja klizača potenciometra

r_p - radijus potenciometra (između ose i kontaktne površine).

$$\text{Relativna greška je } \varsigma = \frac{\Delta R_z}{R_0} = \frac{\Delta L}{\alpha r_p}$$

Za umanjenje grešaka izazvanih zazorom primjenjuju se specijalne opruge.

Greška uslijed opterećenja

Označimo sa $a = \frac{x}{L}$ relativni položaj klizača. Tada se uvrštavanjem odnosa $R_1 = aR_0$, $R_2 = R_0(1-a)$

u (5.2) dobije

$$u_p = U_0 \frac{R_1 R_p}{R_p R_0 + R_1 R_2} = \frac{U_0 \cdot a \cdot \rho}{\rho + a(1-a)} ; \quad \rho = \frac{R_p}{R_0}$$

Nelinearnost statičke karakteristike, uslijed uticaja opterećenja ρ , prikazana je na Sl.5.3. Očigledno je da smanjivanjem otpora R_p (povećanjem opterećenja) u odnosu na otpornost tijela potenciometra R_0 raste nelinearnost karakteristike.

Za određivanje ukupne greške potenciometra treba uzeti u obzir sve navedene komponente greške. U praksi se ove komponente greške mogu smatrati slučajnim, međusobno nezavisnim i sa Gausovom raspodjelom. Ukupna varijansa vrijednosti otpornosti jednaka je zbiru varijansi komponenata

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \sigma_N^2 + \sigma^2 + \sigma_z^2$$

Maksimalno odstupanje otpornosti zbog grešaka je

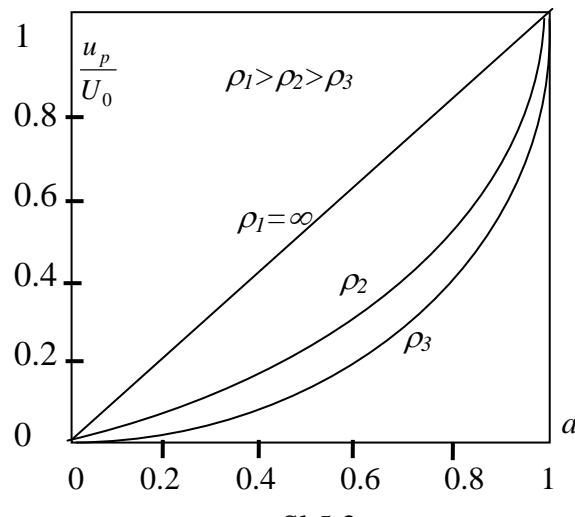
$$\Delta R_{\max} = 3\sigma_{\Sigma}. \text{ (99,7% vrijednosti je u ovim granicama)}$$

5.1.2 Kapacitivni senzori

Ovi senzori služe za pretvaranje translacionog ili ugaonog pomjeraja u električne signale čiji se parametri mijenjaju sa promjenom kapaciteta senzora. Princip ovih senzora je ilustrovan na Sl.5.5. Senzori sa slike 5.5. se nazivaju kondenzatorskim. Za slučaj sa Sl.5.5.a. kapacitivnost se određuje prema

$$C = \varepsilon \cdot \frac{S}{x}$$

gdje je :



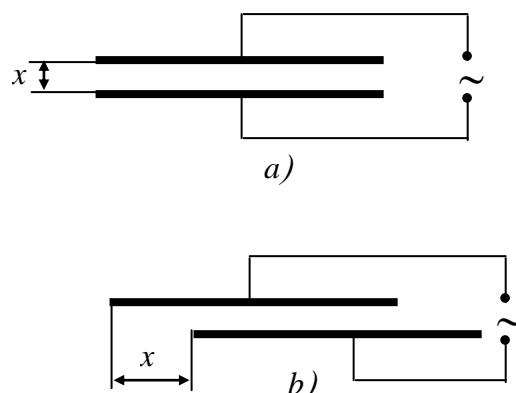
Sl.5.3.

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0; \quad \epsilon_0 = 8,87 \cdot 10^{-12} \left[\frac{F}{m} \right]$$

ϵ - dielektrička konstanta dielektrika.

S - aktivna površina obloga kondenzatora

x - rastojanje između obloga.



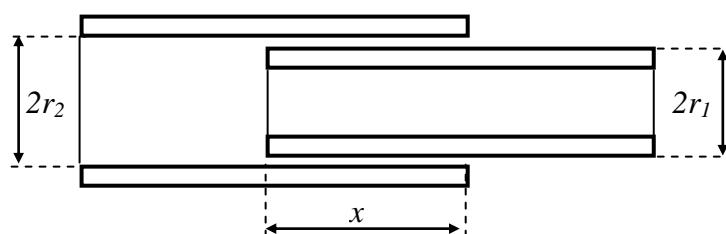
Sl.5.5.

Osjetljivost davača je

$$\left| \frac{dc}{dx} \right| = \epsilon \frac{S}{x^2} \text{ (zavisi od promjene } x \text{)}$$

Ovakvi davači se koriste za mjerenje pomjeraja $x < 1 [mm]$, kao što su, naprimjer progibi membrana kod transmitera pritiska. Generalno, kapacitivni davači se uglavnom primjenjuju pri mjeranjima vrlo malih pomaka reda μm ; za mjerenje dinamičkih pomjeraja frekvencija do $1 kHz$.

Za mjerena pomjeraja većih od $1 [mm]$ mogu se koristiti davači kao na Sl. 5.5.b., ali se češće koriste cilindrični kao na Sl.5.5. Kapacitet se



Sl.5.5

određuje prema:

$$C = \frac{2\pi\epsilon x}{\ln \frac{r_2}{r_1}}.$$

Za kapacitivni davač na Sl.5.6. promjena kapaciteta C sa ugaonim pomjerajem α je data sa:

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right),$$

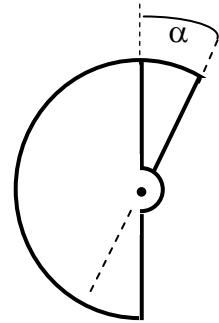
gdje je:

S - aktivna površina obloga pri $\alpha=0$,

d - rastojanje između obloga davača.

Osjetljivost davača je:

$$\frac{dC}{d\alpha} = \epsilon \frac{S}{\pi d}$$



Sl.5.6.

i ne zavisi od α .

Dobre karakteristike kapacitivnih davača su: jednostavnost konstrukcije (ne postoje klizni kontakti i slično), velika osjetljivost, mala inercija, relativno mali gabariti i težina, mala vrijednost privlačnih sila između obloga kondenzatora (za razliku od induktivnih kod kojih su sile mnogo veće).

U nedostatke ovih davača spadaju: uticaj parazitnih kapacitivnosti, uticaj vanjskih električnih polja (što nekada zahtijeva električno oklopljavanje), uticaj promjena temperature i vlažnosti, velika unutrašnja impedansa davača (pa se zahtijevaju izvori napajanja povećane frekvencije i do nekoliko MHz i upotreba pojačavača).

5.1.3. Induktivni senzori

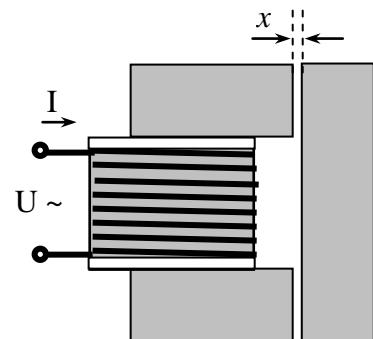
Djelovanje ovih davača je zasnovano na promjeni reaktansi kalema davača uslijed promjena induktivnosti. Šema jednostavnog davača je prikazana na Sl. 5.7. Ulazna veličina je pomjeraj x kotve u odnosu na jezgro davača. Za ovakve davače se sa dovoljnom tačnošću može pretpostaviti da

je ukupna magnetna otpornost kalema, u stvari otpornost vazdušnog zazora R_v , to jest da je

$$R_m = R_v + R_z \approx R_v$$

gdje je R_z magnetska otpornost jezgra i kotve koji su od feromagnetskog materijala. Magnetska otpornost vazdušnog zazora je data sa

$$R_m = \frac{2x}{\mu_0 S_v}$$



Sl.5.7.

gdje je x - dužina vazdušnog zazora, S_v - površina presjeka tog zazora i μ_0 - magnetska permeabilnost vakuma ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9} \text{ H/cm}$).

Ako se zanemari magnetsko rasipanje, induktivnost L davača se može odrediti (za nezasićeni magnetski sistem) za dati broj namotaja N kalema prema

$$L = \frac{N^2}{R_m}.$$

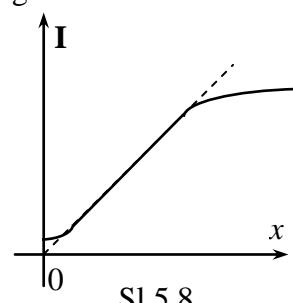
Odnosno

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S_v}{x} [H].$$

Omska otpornost kalema R je mnogo manja od njegove reaktanse $R \ll \omega L$, pa je efektivna vrijednost struje kroz kalem date sa

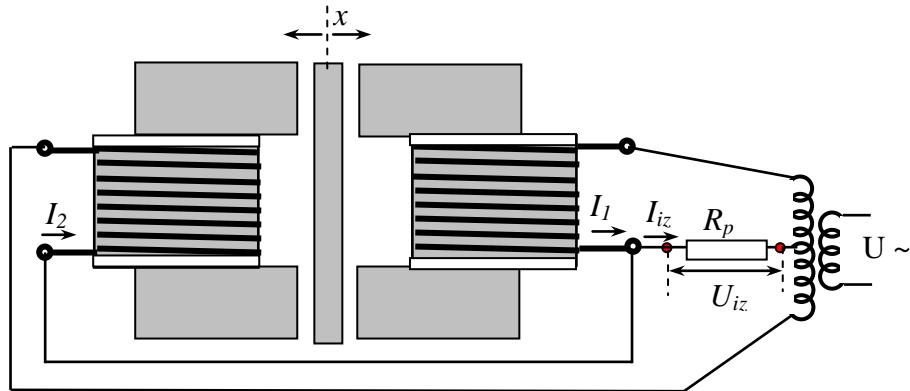
$$I = \frac{U}{Z_u} \approx \frac{U}{\omega L} = \frac{Ux}{\omega \mu_0 N^2 S_v}.$$

Stvarni izgled karakteristike I u zavisnosti od x je nelinearan i dat na Sl.5.8. Parametre induktivnog davača treba izabrati tako da opseg promjene x odgovara približno linearan dio karakteristike.



Sl.5.8.

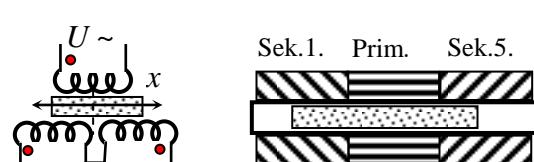
Da bi se poboljšala linearnost karakteristike i smanjio uticaj privlačne sile između kotve i jezgra, koja može da dostigne i nekoliko



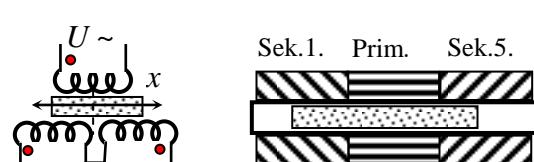
Sl.5.9.

desetaka N , koriste se češće diferencijalna sprega davača kao na Sl.5.9. Pošto su davači istih karakteristika to je pri $x=0$ naponska razlika na krajevima potrošača $U_{iz}=0$. Pri pomjeraju kotve u jednu stranu raste induktivnost davača na toj strani, odnosno njegova impedansa (za drugi davač opada) pa dolazi do porasta amplitudne izlaznog napona. Za dva pomjera ista po veličini ali suprotnih predznaka vrijednosti izlaznog napona se razlikuju samo po fazi za 180° . Karakteristika zavisnosti amplitudne izlaznog napona od veličine pomjera je dat na Sl.5.10. Sa Sl.5.10. je vidljiva veća osjetljivost diferencijalne sprege u odnosu na osjetljivost jednog davača. Takoče je razumljiva i kompenzacija djelovanja privlačnih sila na kotvu kao i manji uticaj promjena napona napajanja na karakteristike.

Linearni promjenljivi diferencijalni transformator (Eng. *linear variable differential transformer – LVDT*) sastoji se od namotaja primara i dva namotaja sekundara (Sl.5.11.).

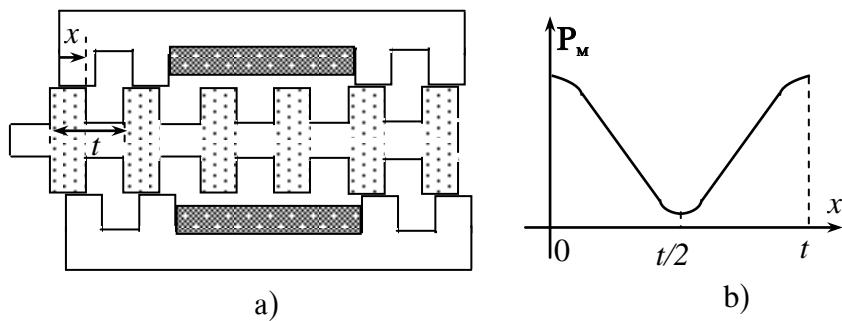


Sl.5.10.



Sl.5.11.

Sekundari su simetrično postavljeni u odnosu na primar. Namotaji su namotani na šuplje tijelo od izolatora unutar koga se pomjera kotva (jezgro) od feromagnetskog materijala. Za rad davača je potrebno da se primar napaja naizmjeničnim sinusnim naponom. U sekundarnim namotajima se takođe indukuje naizmjenični sinusni napon. Žica namotaja sekundara je namotavana tako da su indukovani naponi jednog i drugog namotaja sekundara suprotne faze. Zato će u slučaju kada je kotva u srednjem položaju ovi naponi biti u ravnoteži i dati da je efektivna vrijednost napona sekundara jednaka nuli. Povećanjem kotva u jednom smijeru povećava se napon na izlazu jednog sekundarnog namotaja (u pravcu kretanja), a opada napon drugog. Rezultantni efekat je da raste efektivna vrijednost napona sekundara sa fazom koja odgovara fazi dijela sekundarnog namotaja u pravcu kretanja kotve. Povećanje efektivne vrijednosti je proporcionalno



Sl.5.12.

pomaku kotve x . U slučaju kretanja u suprotnom smijeru se takođe dobija povećanje efektivne vrijednosti proporcionalno pomaku, sa suprotnim faznim stavom.

Kod dobrih senzora zavisnost između položaja i amplitude napona sekundara je linearna. Smjer kretanja se određuje po tome da li je napon sekundara u fazi sa primarom ili suprotne faze. Maksimalno mjerno područje je u granicama od -250 [mm] do $+250 \text{ [mm]}$, a minimalno od -0.1 [mm] do $+0.1 \text{ [mm]}$.

Za mjerenje većih translacionih pomjeraja koristi se induktivni davač sa zupčastim vazdušnim zazorom kao na Sl.5.12. Promjena magnetske otpornosti davača u opsegu pomjeraja kotve za jedan korak zuba t prikazana je na Sl.5.12.b. Prema tome veličina pomjeraja se ocjenjuje brojem impulsa koji se dobiju demodulacijom signala u kolu davača sa naizmjeničnim napajanjem.

Induktivni davači se mogu efikasno koristiti za mjerenje brzine obrtanja (nekada i ugaonog pomjeraja) osovine na koju je montiran zupčasti disk od feromagnetskog materijala kao što je ilustrovano na Sl.5.13. Pobudni kalem se napaja istosmernom strujom. Pri okretanju zupčastog diska mijenja se magnetski otpor davača. Usljed toga dolazi do modulacije fluksa proizvedenog strujom u pobudnom kolu i do indukcije elektromotorne sile na mjerljivom kalemu. Frekvencija izlaznog napona zavisi od brzine okretanja osovine na kojoj se nalazi disk.

Ako koraku zuba odgovara ugao φ i pod pretpostavkom da je u vremenskom intervalu T [sec] registrovano n impulsa izlaznog napona onda je ugaona brzina osovine:

$$\omega = \frac{n\varphi}{T} .$$

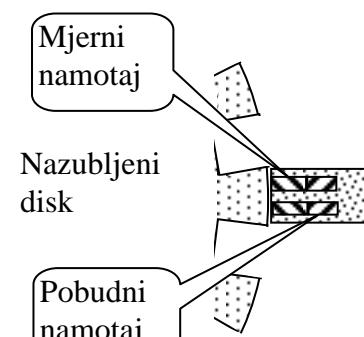
Kada je broj zubaca diska z , tada je brzina u obrtajima data sa:

$$\omega[\text{obr/sec}] = \frac{n\varphi}{zT} .$$

Induktivni davači su robustne i pouzdane komponente koje se upotrebljavaju vrlo često kod mjerenja pomjeraja i brzine pomjeraja.

5.1.5. Digitakni enkoderi

Digitalni enkoderi predstavljaju poseban tip elektromehaničkih pretvarača translacionog/ugaonog pomjeraja u odgovarajući digitalni izlaz sa dva naponska stanja koji obrazuju digitalne izlaze enkodera. Zato se digitalni enkoderi mogu smatrati digitalnim ekvivalentom običnom potenciometru u analognoj tehnici. NJihova osnovna razlika u odnosu na prethdne je što na svom izlazu daju digitalan signal koji se može direktno voditi u digitalni dio sistema za akviziciju (nije potrebna A/D konverzija signala)



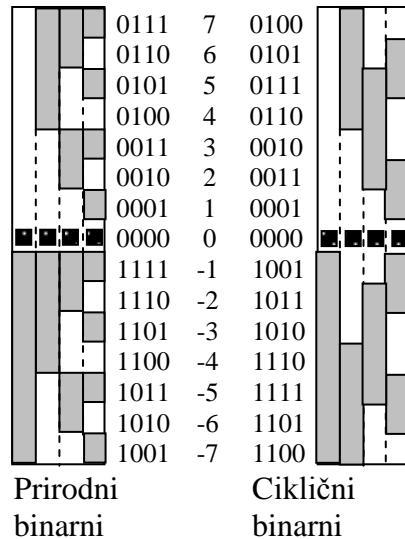
Sl.5.13.

5.1.5.1 Apsolutni enkoderi

Po fizikalnom principu na kome se zasniva njihov rad mogu se razlikovati tri vrste enkodera: sa četkicama, magnetni i optički. Takođe se mogu razlikovati po vrsti koda u kome daju digitalne signale na izlazu. Mjereni signal može biti translacioni ili rotacioni pomjeraj.

U cilju sistematičnosti iznošenja problematike prvo će biti razmatrani mehanički enkoderi (sa četkicama) za direktno mjerjenje translacionog pomjeraja. Kao ilustracija može poslužiti šematski prikaz maske za prirodni binarni kod ilustrovane na Sl. 5.15. Maska se sastoji od više staza (traka) sa provodnim i neprovodnim segmentima. Broj staza određuje rezoluciju enkodera (broj bita kojima se digitalno može predstaviti pomjeraj). Na svakoj stazi maske nalazi se po jedna četkica (naznačene tamnijim kvadratima za položaj 0) tako da su postavljene na zamišljenoj horizontalnoj pravoj liniji. Neka je osnova maske od provodnog materijala i na nju priključen neki jednosmjerni standardni napon. Kada se kreće maska u odnosu na četkice tada će na pojedinim četkicama postojati naponski signal dok na drugim neće, zavisno od toga da li je četkica na provodnom ili neprovodnom segmentu. Ovo će odgovarati logičkim stanjima nule ili jedinice. Enkoder na slici posjeduje 4 staze pa će izlazni signal sa četkica imati 4 bita (16 različitih stanja/položaja).

Od vrlo velikog značaja za tačnost rada enkodera je način kodovanja staza na pokretnoj traci. Za ilustraciju su na Sl.5.15. predstavljeni slučajevi korišćenja prirodnog binarnog i ciklično binarnog (*Gray*) koda. Prvi kod nije pogodan za ovu primjenu jer se dva susjedna binarna broja mogu razlikovati u više bita. Neidealnost geometrije provodnih i neprovodnih dijelova, geometrijskog položaja četkica i drugi, mogu u tom slučaju dati vrlo velike greške u procesu mjerjenja položaja. U slučaju binarno cikličnog koda greška uslijed prisutne nepodešenosti elemenata za detekciju može biti najviše takva da se pogrešno očita prvi susjedbni položaj različit za jedan

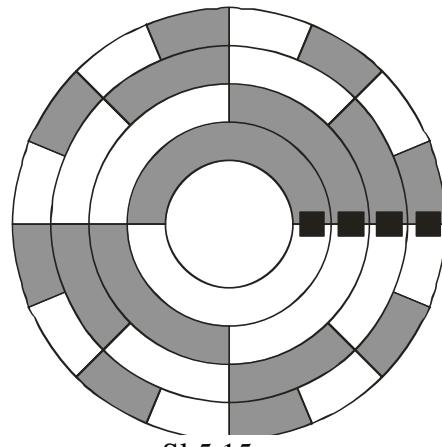


S1.5.15.

korak rezolucije. Kod postojećih standardnih enkodera je rezolucija relativno velika tako da je ovakva greška vrlo malena pa se može tolerisati.

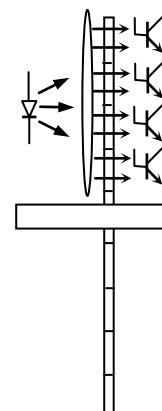
U slučaju mjerjenja **ugaonog pomjeraja** umjesto trakaste maske je osnovna komponenta disk. Disk se sastoji od više staza (koncentričnih prstenova) kao na Sl.5.15. Na svakoj stazi se nalazi po jedna četkica. Četkice su postavljene na pravcu tako da leže na pravcu poluprečnika diska. Pri rotaciji diska sa četkica se očitava binarni naponski signal koji je ekvivalent uglu zakreta diska.

Osnovni nedostatak mehaničkih enkodera (translacionih ili rotacionih) jeste postojanje mehaničkog kontakta između pokretnih i nepokretnih mehaničkih komponenata. Ovo ima za posljedicu nepouzdan rad i kratak vijek trajanja ovakvih enkodera u odnosu na druge kod kojih ne postoje mehanički kontakti. Iz istog razloga je takođe ograničena maksimalna brzina obrtanja diska. Nadalje, ovakvi enkoderi za veću rezoluciju (veći broj staza) imaju relativno veće gabarite, jer zbog postojanja četkica širine staza ne mogu biti manje od 2 mm.



Sl.5.15

Optički enkoderi imaju princip rada vrlo sličan enkoderima sa četkicama. Analogno provodnim i neprovodnim segmentima na stazama diska enkodera sa četkicama, segmenti optičkog enkodera su prozirni i neprozirni, tako da njihov disk ima izgled kao na Sl.5.15. Za očitavanje položaja na svakoj stazi se koriste po jedan svjetlosni izvor i svjetlosni detektor (opto par). Kao izvor svjetlosti se obično koriste foto diode (*LED*). Kao svjetlosni detektori se uglavnom koriste foto osjetljivi tranzistori, kao što je prikazano na Sl.5.15.a. Umjesto više foto dioda, komercijalne verzije optičkih enkodera koriste samo jednu foto diodu smještenu u fokus sabirnog sočiva. U tom slučaju sve svjetlosne zrake iz sočiva padaju okomito na staze diska.



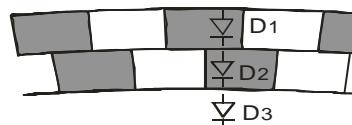
Sl.5.15.a

Zbog optičkog načina očitavanja stanja svake staze ne postoje ograničenja u pogledu brzine očitavanja (kretanja staza), a staze

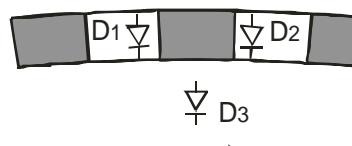
mogu biti širine svega 0.1 mm . Iz ovih razloga se optički enkoderi danas najviše koriste.

Magnetski enkoderi su takođe često u upotrebi. Princip se zasniva na postavljanju magnetnih segmenata na staze. Za očitavanje magnetnog stanja segmenata koriste se mala magnetna jezgra ili magnetne glave postavljene uz sve staze.

Ovi enkoderi su još robusniji, ali su manje maksimalne brzine detekcije, manje gustine pakovanja i skuplji od optičkih enkodera.



a)



b)

Sl.5.16.

5.1.5.2 Inkrementalni enkoderi

Svi naprijed navedeni enkoderi sapadaju u grupu apsolutnih (sa direktnim očitavanjem) jer se veličina analogne promjenljive neposredno detektuje i prevodi u digitalni oblik. U novije vrijeme sve češće se koriste takozvani inkrementalni enkoderi. Oni vrijednost ukupnog pomjeraja detektuju indirektno sabiranjem malih priraštaja promjenljive. Svakom impulsu sa takvog enkodera odgovara priraštaj promjenljive za odgovarajući kvant (inkrement). Mada i u ovom slučaju realizacije mogu biti sa četkicama i magnetske, ovdje zbog vrlo sličnog principa biti razmatrani samo optički.

Inkrementalni enkoderi se najčešće koriste za mjerenje ugaone brzine, a nekada i ugaonog pomjeraja. Ukupni broj impulsa pomnožen ugaonim inkrementom daje ukupni ugao zakreta. U osnovi je za određivanje inkrementa dovoljno da disk enkodera ima jednu stazu i jedan foto detektor. Ipak, da bi se mogao detektovati referentni položaj i smijer rotacije, sistem je nešto složeniji.

Jedna varijanta diska je sa dvije staze i tri foto detektora. Osnovni princip je ilustrovan na Sl.5.16 (položaj foto detektora je simbolički predstavljen simbolom za diodu). Usvojimo da vanjska staza čini prsten 1, a unutrašnja prsten 2. Prozirni i neprozirni segmenti na obe staze neka su jednakih. Segmenti na jednoj i drugoj stazi su pomjereni za polovinu širine jednog segmenta (da bi se smanjila vjerovatnoća greške u očitavanju). Neka

se u jednom smjeru rotacije prvo aktivira foto detektor prstena 1 pa zatim prstena 2. Naizmjenično će se aktivirati detektor sa prstena 1, pa zatim prstena 2. U slučaju da se desi kretanje u suprotnom smijeru tada će se narušiti naizmjenično aktiviranje detektora. Dva puta će se aktivirati detektor jednog prstena, a da se drugi ne aktivira u međuvremenu. U tom slučaju se umjesto sabiranja inkremenata vrši oduzimanje od tekućeg stanja.

Druga varijanta diska inkrementalnog enkodera sadrži samo jednu stazu sa prozirnim i neprozirnim segmentima. Na istoj stazi se nalaze dva opto detektora razmaknuta za $k+0.5$ širine staza pri čemu k može uzimati vrijednosti 0,1,2,... Kada se disk obrće u istom smijeru naizmjenično se prebacuje jedan pa drugi opto detektor. Kada se promijeni smijer rotacije dva puta se uzastopno prebaci jedan opto detektor. Tada se tekuće stanje dekrementira umjesto inkrementiranja.

Za definisanje referentnog nultog položaja se koristi još jedan optički detektor sa samo jednim markerom na disku.

Inkrementali enkoderi su jednostavnije mehaničke strukture od apsolutnih enkodera. Osnovni njihov nedostatak u odnosu na apsolutne je što se u slučaju kratkotrajnog gubitka napajanja ili pogrešnog očitavanja gubi informacija o stvarnom položaju diska. U tom slučaju neophodno je disk dovesti u nulti položaj, ukoliko to primjena dozvoljava, i početi mjerjenje od početka.

5.2. Mjerenje brzine i ubrzanja pomjeranja

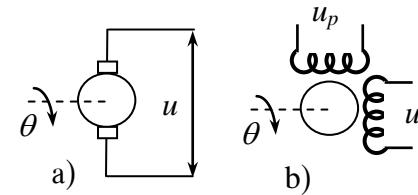
Pravilo je da se brzine translacionih pomjeranja ne mijere direktno, već se pretvaraju u odgovarajuće ugaono pomjeranje čija brzina se može mjeriti.

Mjerenje ugaone brzine u analognom obliku obično se mjeri tahogeneratorom. Ovakav način mjerjenja se obično koristi ako se ugaoni položaj mijerei obrtnim potenciometrom. U tom slučaju su informacije o uglu i ugaonoj brzini u analognom obliku pa se preko odgovarajućeg A/D konvertora obe veličine prevode u digitalni.

5.2.1. Tahogenerator

Govoreći uopšteno, pod tahogeneratorom se podrazumjeva uređaj čiji je izlazni signal proporcionalan brzini promjene veličine na njegovom ulazu. Najčešće je, međutim, riječ o pretvaraču uglovne brzine mehaničke osovine u odgovarajući napon.

U ulozi tahogeneratorsa kod sistema automatskog upravljanja obično se koristi mali jednosmjerni električni generator sa permanentnim magnetom, koji se označava kao na Sl.5.17.a. Takođe, tehogenerator se izvodi i kao naizmjenični električni generator (Sl. 5.17.b.), koji ima dvije faze na statoru: fiksnu, na čije je krajeve priključen naizmjenični napon napajanja $u_p(t)$, konstantne amplitude i izlaznu fazu, na krajevima koje se dobija napon $u_t(t)$, iste frekvencije kao i napon pobude i amplitude proporcionalne brzini obrtanja rotora. Ne koristi se standardni sinhro generator, jer bi tada i frekvencija izlaznog signala bila proporcionalna ugaonoj brzini rotora. Prema tome, u oba slučaja je



Sl.5.17.

gdje je K_t osjetljivost ili konstanta proporcionalnosti tahogeneratora. U poslednjem izrazu $u(t)$ predstavlja vremenske funkcije jednosmjernog napona ili amplitude naizmjeničnog napona, zavisno od toga da li se radi o jednosmjernom ili naizmjeničnom tahogeneratoru. Osjetljivost naizmjeničnih tahogeneratora se kreće u granicama od 0,1 V do 1 V po 100 obr/min na izlaznom opterećenju od 3 $k\Omega$. Jednosmjerni tahogeneratori imaju veću osjetljivost od naizmjeničnih i to za približno 0,5 V po 100 obr/min .

Za ulaz tahogeneratora se usvaja ugao $\theta(t)$, pa je prema relaciji (5.3) funkcija prenosa :

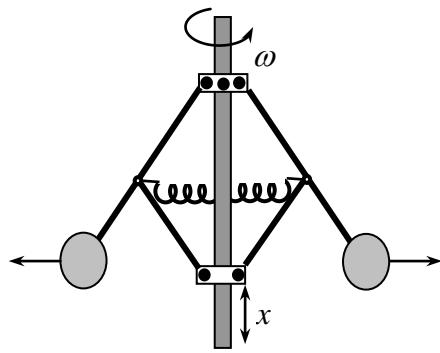
$$G(s) = \frac{U(s)}{\Theta(s)} = K_t s$$

U zadnjem izrazu $U(s)$ ima značenje kompleksnog lika napona tahogenaratora $u(t)$.

5.2.2 Centrifugalni regulator

Na osnovu ovog mjernog elementa je Xems Vat (*James Njatt*) 1784 godine napravio regulator obrtanja parne turbine. Ova se uzima za početak teorije automatskog upravljanja. U osnovi se radi o mehaničkom senzoru koji ugaonu brzinu pretvara u translacioni pomjeraj.

Promjenom brzine okretanja osovine mijenja se centrifugalna sila koja djeluje na tegove i preko njih na sistem poluga. Za veće brzine je sila veća, pa se tegovi više razmiču i pokretni držač poluga pomjera prema gore. Smanjenjem brzine se izaziva kretanje u suprotnom smjeru.



Sl.5.18.

Već je pokazano kako se translacioni pomjeraj može pretvoriti u odgovarajući električni signal.

5.2.3 Inkrementalni enkoder

Praktično je već objašnjen način mjerjenja ugaone brzine u digitalnom obliku pomoću inkrementalnih enkodera.

Uglavnom se koriste dva načina mjerjenja ugaone brzine :

1. Registruje se broj impulsa u jedinici vremena. Brzina je proporcionalna broju registrovanih impulsa.
2. Mjeri se vrijeme proteklo između dvije promjene nivoa. Brzina je obrnuto proporcionalna proteklom vremenu.

Postupak 1 se koristi ako su manje promjene brzine (brzina se polako i samo povremeno malo mijenja), a postupak 2 je složeniji i koristi se kod naglih i čestih promjena brzine.

5.2.5. Akcelerometri

Ubrzanje predstavlja brzinu promjene brzine. Vektorska je veličina pa se karakteriše intenzitetom i smijerom.

Akcelerometri su elementi za mjerenje ubrzanja (akceleracije). Jedinica za mjerenje ubrzanja u SI sistemu je m/s^2 . Takoće, vrlo često se za mjerenje ubrzanja kao osnovna jedinica koristi gravitacija Zemlje na nivou mora "g" koja iznosi $9.81 m/s^2$.

Najčešće korišteni principi na kojima se zasniva rad akcelerometara su mehanički, kapacitivni, piezoelektrični, piezorezistivni, na bazi Holovog efekta, magnetootporni i na bazi prenosa toolute.

Prvi su se počeli koristiti mehanički akcelerometri koji rade na principu mjerenja sile inercije ($F_{in} = m*a$). Osnovni dijelovi ovog akcelerometra su kruto tijelo mase $m[kg]$ (obično se naziva seizmičkom masom), koje je pomoću opruge krutosti $k[N/m]$ i prigušivača sa koeficijentom viskoznog trenja $b[N/m/s]$ pričvršćeno za kućište Sl.5.19. Tijelo mase m ima ulogu primarnog osjetljivog elementa i njegovo kretanje je proporcionalno ubrzaju. Označimo sa x_m i x_k pomjeranje mase m i kućišta akcelerometra respektivno kao na slici. Tada vrijedi

$$k(x_k - x_m) + b(\dot{x}_k - \dot{x}_m) = m\ddot{x}_m$$

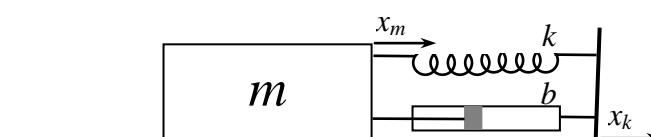
ili

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_k$$

gdje $x = x_m - x_k$ označava relativni pomjeraj mase.

Dijeljenjem zadnje jednačine sa m i ako se za ubrzanje kućišta \ddot{x}_k uvede oznaka a tada vrijedi:

$$\ddot{x} + \frac{b}{m}\dot{x} + \frac{k}{m}x = -a$$



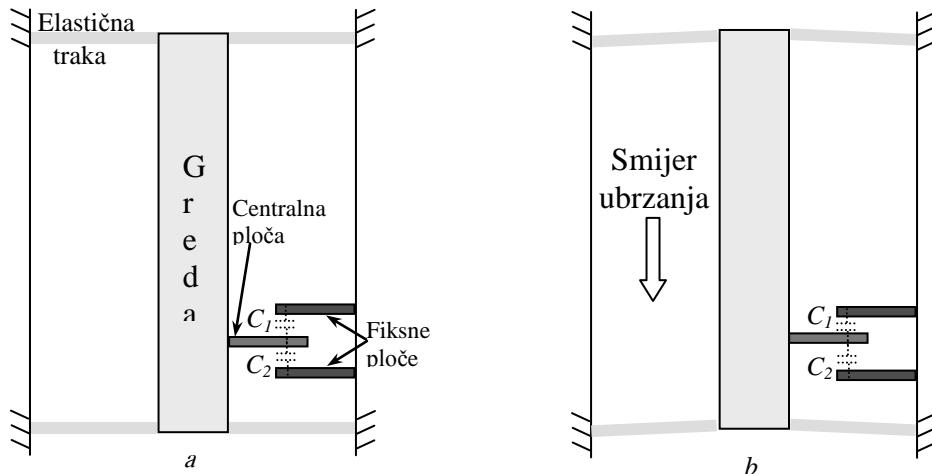
Sl.5.19.

Funkcija prenosa inercijalnog senzora je :

$$G_a(s) = \frac{X(s)}{A(s)} = -\frac{1}{s^2 + \frac{b}{m}s + \frac{k}{m}}$$

Znak - označava da je smijer kretanja x mase m suprotan od smijera ubrzanja. Dakle, kod mehaničkih akcelerometara je pomoćna promjenljiva pomjeranje mase m u odnosu na tijelo kućišta. Ova promjenljiva se pomoću već opisanih senzora može konvertovati u električni signal. Ovakvi akcelerometri su relativno komplikovani za izradu, skupi i nisu visoko pouzdani. Iz tih razloga se sve manje koriste.

Kapacitivni senzori predstavljaju vrlo precizno izrađene poluprovodničke planarne strukture tako da svaka može da mjeri pozitivno i negativno ubranje u pravcu jedne ose. Svaki senzor se sastoji od jedne glavne "grede" vezane pomoću četiri elastične trake za kućište senzora, kao što je prikazano na Sl.5.20. Pod pravim uglom je na glavnu "gredu" vezana centralna ploča. Centralna ploča je postavljena između dvije naspramne fiksne ploče tako da formira kapacitivni djelitelj. Fiksne ploče se pobuđuju kvadratnim signalom jednakog amplituda ali suprotnog polariteta. Kada ne postoji ubrzanje u smjeru "grede" tada su oba kondenzatora približno jednakog kapaciteta pa će centralna ploča biti na približno 0 V, kao što je predstavljeno na Sl.5.20.a. Svako ubrzanje će izazvati pomjeranje centralne ploče, a time do narušavanja ravnoteže kapacitivnog djelitelja. Raste kapacitet kondenzatora na strani približavanja ploča, a istovremeno se smanjuje kapacitet na drugi strani. Ukoliko je ubrzanje senzora u pravcu strelice na Sl.5.20.b tada će biti $C_1 > C_2$. Rezultat je da se može detektovati napon na centralnoj ploči. Nivo signala je proporcionalan intenzitetu ubrzanja a na osnovu faze u odnosu na signal napajanja je poznat smjer ubrzanja.



Sl.5.20

Postoji grupa senzora za mjerenje ubrzanja čiji je princip rada zasnovan na korištenju *piezoelektričnog efekta*. Ovaj efekat označava svojstvo da neki materijali, pod djelovanjem mehaničkog naprezanja, na svojim krajevima stvaraju potencijalnu razliku.

U grupi piezoelektričnih materijala posebno često se koriste: kvarc, Rošelova (*Rochelle*) so, turmalin, barijum-titanat. Po pravilu se za dobijanje intenzivnijeg piezoelektričnog efekta, materijali izlažu posebnoj termičkoj obradi i jakom električnom polju.

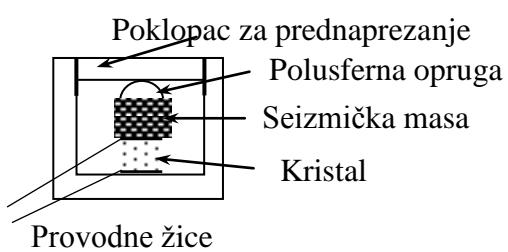
S obzirom na smjer u kojem sila djeluje na kristalnu strukturu materijala, razlikuje se paralelni (Eng. *longitudinal*) i poprečni (Eng. *transverse*) efekat.

5. Mjerenje pomjeraja, brzine i ubrzanja

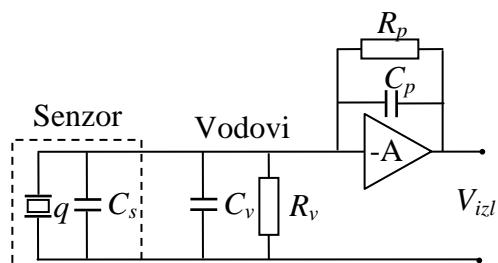
Paralelni efekat se postiže u slučaju djelovanja sile u pravcu električnog polja kristala (Sl.5.21.a), a nastalo nanelektrisanje zavisi od sile koja djeluje na kristal i piezoelektričnog koeficijenta kristala. Da bi se povećalo nominalno nanelektrisanje potrebno je vezati više pločica kristala u serijsku mehaničku i paralelnu električnu vezu.

Pri djelovanju sile okomito na električno polje nastaje poprečni efekat (Sl.5.21.b). U ovom slučaju nanelektrisanje zavisi od dimenzija pločice kristala.

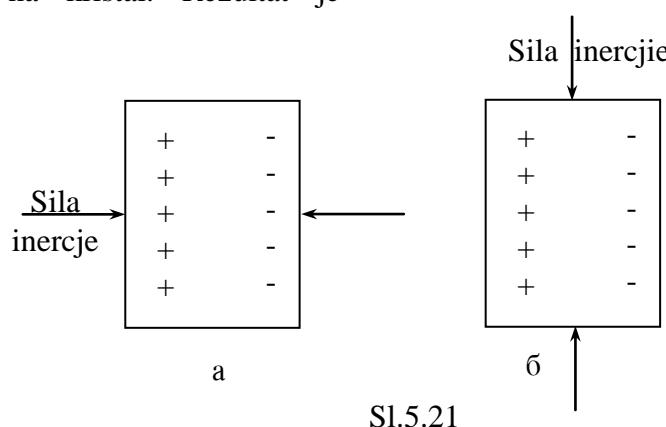
Standardna konstrukcija akcelerometra čiji je rad zasnovan na piezoelektričnom efektu prikazana je na Sl.5.22. Kristal je fiksiran između seizmičke mase i kućišta senzora. Fiksiranje je izvršeno tako što se pomoću poklopca za prednaprezanje napne polusferne opruge tako da lagano pritišće na seizmičku masu. Ukoliko je senzor u stanju mirovanja ili ravnomernog kretanja na kristal djeluje samo konstantna sila naprezanja. Kada dođe do promjene brzine kretanja senzora kao rezultat sile inercije mijenja se sila kojom seizmička masa djeluje na kristal. Rezultat je



Sl.5.22



Sl.5.23



Sl.5.21

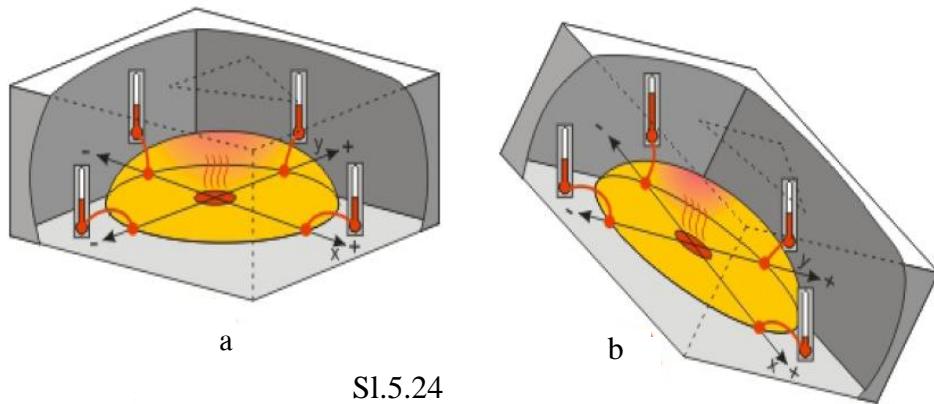
izdvajanje nanelektrisanja na krajevima kristala. Za korištenje piezoelektričnog senzora bitno je naglasiti da je izdvojeno nanelektrisanje proporcionalno brzini promjene sile a ne njenoj apsolutnoj vrijednosti. Takođe, stvorena naponska razlika brzo isčezava ako je sila konstantna. Zbog ovakvih svojstava se ovi senzori mogu "direktno" koristiti za dinamička mjerenja, naprimjer vibracija koje su posljedica brzih promjena sile. Kada se mjeri ubrzanje tada se izlaz senzora vodi na integrator sa vrlo velikom ulaznom impedansom (Sl.5.23). Prioritet je integracija i vrlo velika ulazna impedansa u odnosu na pojačanje pojačavača koji se koriste za realizaciju ove transformacije signala. Iz tog razloga se u kolima sa Sl.5.23 koriste isključivo pojačavači realizovani sa ulaznim kolima u *FET* tehnologiji.

Za dovoljno veliko pojačanje pojačavača (A) mogu se zanemariti kapacitivnosti senzora (C_s) i vodova (C_v) tako da izlazni napon zavisi samo od količine nanelektrisanja na ulazu (q) i kapacieta kondenzatora paralelnog sa pojačavačem (C_p):

$$V_{izt} = -q/C_p.$$

Piezorezistivni, na bazi Holovog efekta i magnetorezistivni akcelerometri rade na principu vrlo bliskom piezoelektričnim. Razlika je što se efekat sile inercije ne transformiše direktno u električni signal nego u pomoćnu promjenljivu, npr. električnu ili magnetnu otpornost.

Akcelerometri *na bazi prenosa topote* imaju dugačiji princip rada od prethodnih. Osnovni dio senzora je komora sa grijačem u sredini i četiri senzora temperature rasporećena na krajevima komore. Ukoliko je akcelerator u stanju mirovanja i horizontalno postavljen svi senzori temperature će biti na istoj temperaturi, kao što je prikazano na Sl.5.25.a. Ukoliko se komora akcelerometra nagne na jednu stranu topli vazduh će se sakupljati bliže jednom ili dva senzora temperature zavrsiti od naginjanja komore. Kada se komora kreće u *XOY* ravni tada će zavisno od pravca i smjera ubrzanja/usporenja topli vazduh strujati prema nekim senzorima temperature više nego prema drugim. Poređenjem signala sa svih senzora ima se informacija u komponentama ubrzanja u *XOY* ravni.



Sl.5.24

Inaceino se svi akcelerometri mogu pojaviti prema više kriterija. Prema obliku informacionog signala svi se mogu podijeliti na analogne ili digitalne.

Takođe, zavisno od izvedbe akcelerometri mogu mjeriti ubrzanje u jednom dva ili tri pravca. Ukoliko je potrebno mjeriti ubrzanje u više pravaca nego što to omogućava sensor koji posjedujemo tada se postavljanjem više senzora u pravcima odgovarajućih osa može realizovati zahtjevano mjerjenje. Pri postavljanju je nužno senzore postaviti u pravcu pojedinih osa da se ne dobiju pogrešna očitavanja.

Sa stanovišta mjernog područja senzori se uglavnom razlikuju po maksimalnoj vrijednosti ubrzanja koju mogu mjeriti. U mnogim primjenama se koriste senzori koji mogu mjeriti ubrzanja do $2g$ ili $3g$. Bolji senzori imaju gornju granicu mjerene veličine do $10g$.