

DR MLADEN POPOVIĆ

SENZORI I MERENJA

ČETVRTO IZDANJE



**ZAVOD ZA UDŽBENIKE I NASTAVNA SREDSTVA
SRPSKO SARAJEVO, 2004.**

Recenzenti:

Prof. dr Dragoljub Milatović

Prof. dr Arsen Šurlan

Direktor, glavni i odgovorni urednik:

Ranko Batinić

P R I M E R A K J E N U M E R I S A N

No.

MIRJANI I NIKOLI

PREDGOVOR

Merne informacije imaju veliki značaj u naučnim i tehničkim disciplinama jer sadrže kvantitativne vrednosti pomoću kojih se procenjuju stanja objekta istraživanja. Moderna merenja baziraju se uglavnom na pretvaranju fizikalnih veličina u električni signal. Pojačanje i obrada električnog signala, daljinski prenos i očitanje rezultata su usavršeni, a uz to se postiže visok metrološki kvalitet u pogledu tačnosti, osetljivosti i pouzdanosti merenja. Pretvaranje mehaničkih, hemijskih, biloških i procesnih veličina u električni signal vrši se pomoću različitih davača, pretvarača, transdijusera, transmitera i dr. U novije vreme za ove uređaje ustalio se termin senzor, što je koincidiralo sa razvojem materijala i tehnologija, primenom mikromehanike i visokog stepena integracije komponenata, te velikim mogućnostima u obradi informacija pomoću sredstava mikroelektronike.

Cilj ove knjige je da oblast savremene tehnike senzora predstavi širem krugu korisnika. Knjiga je prvenstveno namenjena studentima elektrotehnike, mašinstva i tehnologije, studentima posdiplomske studije, ali i stručnjacima različitih specijalnosti koji se u svojoj praksi bave merenjem fizikalnih veličina.

U knjizi su obrađene metode i inžinjerski postupci merenja fizikalnih veličina. Opisani su načini gradnje senzora i ukazano na mogućnosti njihove primene. Pored standardnih senzora koji se upotrebljavaju u inžinjerskim merenjima neelektričnih veličina, posebna pažnja posvećena je i specijalnim izvedbama, koje zasad imaju manju zastupljenost. Knjiga je podeljena u četiri tematske celine: Principi merenja, Principi tehnike senzora, Osnovni senzori i Senzori i metode merenja neelektričnih veličina.

Sa druge dve objavljene knjige, „Senzori u robotici“ (opisani principi rada, konstrukcija i obrada signala senzora u robotici) i „Senzori tečnosti i gasova“ (opisani principi rada analizatora i poluprovodničkih senzora tečnosti i gasova, uključujući i biosenzore), knjiga „Senzori i merenja“ predstavlja trilogiju kojom je autor zaokružio svoj višegodišnji rad u proučavanju tehnike senzora i merenja.

Četvrto izdanje dopunjeno je novim sadržajima, bez promene osnovne koncepcije. Zahvalnost za niz korisnih sugestija dugujem recenzentima prof. dr D.Milatoviću i prof. dr A.Šurlanu, kao i svim kolegama i čitaocima koji su pokazali interesovanje za ovu knjigu.

Beograd, juna 2004.

Autor

I

PRINCIPI MERENJA

1

UVOD U MERENJE

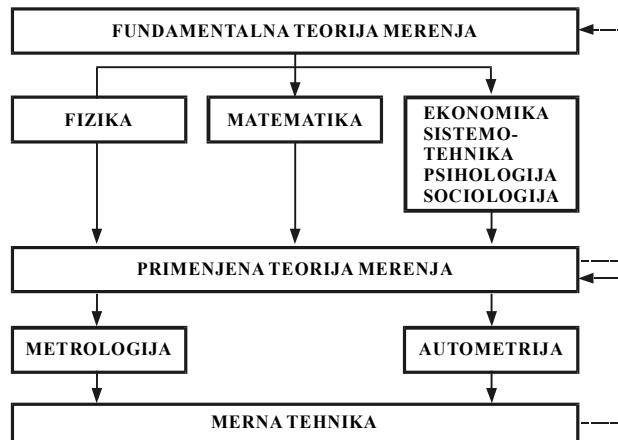
1.1. METROLOGIJA – NAUKA O MERENJU

Izučavanje pojmljova o fizikalnoj veličini i njenom merenju spada u osnovne predmete naučnog istraživanja. Teoretska istraživanja na ovom planu provode se u okviru različitih naučnih i tehničkih disciplina: filozofije, fizike, matematike, sistemoteknike, elektrotehnike, merne tehnike itd. U tom kontekstu nauka o merenju zauzima posebno mesto u sistemu savremenih nauka i tehnika.

Prirodne nauke posmatraju objekat istraživanja svojim specifičnim metodama, ali im je, manje ili više, zajednička potreba da se rezultati opažanja predstave i u kvantitativnoj formi. Merenje kao kvantitativni način predstavljanja svojstava objektivnog sveta poprima različita obeležja u zavisnosti od primene u pojedinim naukama, tj. u zavisnosti od toga koja svojstva su predmet istraživanja u pojedinim naukama. Zbog toga još uvek ne postoji sveobuhvatan i jedinstven pristup nauci o merenju, pa se ona deli na više segmenta. Teorija mernih pogrešaka tretira greške u merenjima, informaciona teorija posmatra pogreške merenja kao smetnje u informacionom kanalu, algoritamska teorija izučava merenja kao algoritme za dobijanje brojnog rezultata, reprezentaciona teorija merenja bavi se izborom adekvatne brojne skale za predstavljanje mernih veličina u psihologiji, lingvistici, kibernetici itd.

U svim dosadašnjim fazama razvoja nauke i tehnike prisutna su dva nivoa u izučavanju merenja: fundamentalni i primjenjeni. Fundamentalni nivo istražuje opšta svojstva i zakone merenja. Pri tome se polazi od pretpostavke da su problemi merenja suštinski problemi u svim egzaktnim naukama: fizici, matematici i drugim. U prilog tome ide činjenica da su otkrića opštih zakona merenja uvek bila snažan generator razvoja u egzaktnim naukama. Ilustrativan je primer otkriće principa neodredenosti u savremenoj fizici, koji u oblasti merenja predstavlja opšti zakon za ograničavanje tačnosti kvantno-mehaničkih merenja. Primjenjeni nivo u izučavanju merenja usmeren je na rešavanje praktičnih problema merenja u okviru inženjerskih disciplina i tehnika. Jedan od takvih problema je i zahtev za obezbeđivanje jedinstva merenja i mernih rezultata, čije je rešavanje na kraju dovelo do aktuelnog Međunarodnog sistema jedinica.

Fundamentalna teorija merenja u tesnoj je vezi sa osnovnim zakonima egzaktnih nauka, pa je zato po svome karakteru opštija od primjenjene teorije, koja je spona između fundamentalne teorije merenja i neposrednih praktičnih merenja, (slika 1.1). Primjenjena teorija merenja pripada nižem hijerarhijskom nivou u odnosu na fundamentalnu teoriju. Međutim, pojedina svojstva merenja ustanovljena praktičnim merenjima i potvrđena u primjenjenoj teoriji mogu preći na fundamentalni nivo i izvršiti određene uticaje na egzaktne nauke.



Slika 1.1. Odnosi između fundamentalne i primenjene teorije merenja

U vezi sa rešavanjem problema jedinstva merenja razvila se metrologija – nauka o merama, metodima i sredstvima merenja, te postupcima realizacije potrebne tačnosti merenja. Tako definisana metrologija odnosi se na teorijska i praktična merenja u svim oblastima nauke i tehnike, bez obzira na nivo željene tačnosti. U toku istorijskog razvoja u metrologiji je sa uspehom razrađen veliki broj metoda i tehničkih sredstava za rešavanje problema u mernoj tehnici. Međutim, sve veće uvođenje metoda kibernetike, digitalne merne tehnike, merno-informacionih sistema i stohastičkih postupaka u mernu tehniku dovelo je do formiranja autometrije, naučne discipline koja izučava procese kibernetizacije u mernoj tehnici i razvija metode analize i sinteze merno-informacionih sistema. Metrologija i autometrija kao segmenti primenjene teorije merenja odražavaju dva suštinska procesa u merenju: proces primene rezultata fizike radi razvoja sredstava i metoda merenja, te proces kibernetizacije.

Aktuelni problemi koji su predmet istraživanja u savremenoj metrologiji su:

- primena Medunarodnog sistema jedinica (SI);
- primena fundamentalnih fizikalnih zakona i atomskih konstanti s ciljem izgradnje novih i savršenijih etalona;
- razrada hijerahijske šeme mernih instrumenata, koja pokazuje redosled i tačnost operacija prenošenja jedinica mere za određenu veličinu od primarnog etalona, preko referentnog, do radnog etalona;
- proširivanje primene tačnog merenja i u oblast veoma malih i u oblast veoma velikih vrednosti merene veličine;
- realizacija metroloških zahteva u merno-informacionim sistemima;

- rešavanje metroloških problema u proizvodnji;
- standardizacija jedinica merenja, sistema etalona, metoda i sredstava merenja, te standardizacija postupaka za proveru metoda i sredstava merenja.

Aktuelni problemi koji su predmet istraživanja u autometriji su:

- primena teorije informacija u ocenjivanju karakteristika mernih sredstava;
- razvoj metoda automatske korekcije grešaka u mernim uredajima;
- razvoj algoritama i metoda merenja;
- primena teorije stohastičkih i spektralnih merenja.

Rezimirajući ova uvodna razmatranja o nauci o merenju, treba istaći da je ona u svom klasičnom obliku utemeljena na tradicionalnom naučno-tehničkom pristupu, zasnovanom na dualnosti mase i energije. Danas se ovoj dualnosti dodaju i informacije, tako da se moderna teorija i tehnika merenja sve više zasnivaju na trojstvu masa-energija-informacija. Tako shvaćena celokupna oblast saznanja koja se odnose na merenja naziva se (opšta) metrologija ili nauka o merenju.

1.2. OSNOVNI POJMOVI I JEDNAČINE METROLOGIJE

Merenje je određivanje vrednosti fizikalne veličine skupom eksperimentalnih operacija uz pomoć odgovarajućih tehničkih sredstava merenja. Zbog toga su veličina i merenje dva osnovna pojma u metrologiji.

Fizikalna veličina je opšte fizikalno svojstvo u kvalitativnom smislu za skup objekata (sistema, stanja ili procesa), a posebno svojstvo u kvantitativnom smislu za svaki pojedini objekat. Drugim rečima, fizikalna veličina je svojstvo koje se može kvalitativno opisati i kvantitativno odrediti.

Veličine u opštem smislu su: dužina, vreme, temperatura, tvrdoća, električna otpornost itd., a veličine u određenom smislu su: dužina olovke, električna otpornost žice itd.

Fizikalna veličina X podvrgнутa merenju označava se kao merena veličina. Rezultat procesa merenja je kvantitativno određenje fizikalne veličine, što se može predstaviti formulom

$$X = \{X\}[X], \quad (1.1)$$

koja se označava kao osnovna jednačina merenja. Ova jednačina ukazuje da je fizikalna veličina X , kao svojstvo tretiranog objekta, $\{X\}$ puta veća od jedinične

vrednosti $[X]$ te fizikalne veličine. Sa $\{X\}$ označena je brojna vrednost (iznos), a sa $[X]$ jedinica mere. Brojna vrednost $\{X\}$ utvrđuje se merenjem pomoću jedinice $[X]$.

U savremenim naukama primenjuju se stotine različitih veličina, a taj broj raste sa novim spoznajama. Najvećim delom ove veličine su izvedene, jer se mogu izraziti pomoću odabranog skupa osnovnih (nezavisnih) veličina $A, B, C \dots$ kao:

$$X = Z \cdot A^a \cdot B^b \cdot C^c \dots , \quad (1.2)$$

gde je faktor proporcionalnosti Z apsolutno tačan broj $(1, 1/2, 1, 4, \pi/2, \sqrt{2} \dots)$, budući da je rezultat prirodnog odnosa među veličinama. Veličinski stepeni a, b, c, \dots su celi brojevi (pozitivni ili negativni) ili nula. Algebarska zavisnost (1.2) označava se kao veličinska ili univerzalna jednačina, jer je neposredna interpretacija određenog fizikalnog zakona.

Ako se u veličinskoj jednačini sve veličine predstave svojom brojnom vrednošću i svojom jedinicom, tada se za jedinicu $[X]$ dobija:

$$\{X\} = u \cdot [A]^a \cdot [B]^b \cdot [C]^c \dots , \quad (1.3)$$

a za brojnu vrednost $\{X\}$ dobija se brojna jednačina, koja zavisi od odnosa upotrebljenih jedinica u :

$$\{X\} = \frac{Z}{u} \cdot \{A\}^a \cdot \{B\}^b \cdot \{C\}^c \dots . \quad (1.4)$$

Na primer, pređeni put L je proizvod brzine V i vremena T :

$$L = V \cdot T. \quad (1.5)$$

Uočava se da veličinska jednačina ne zavisi od upotrebljenih jedinica i da je $Z=1$. U koherentnom sistemu jedinica, kakav je SI, uvek je $u=1$, pa se tako, u konkretnom slučaju, jedinica dužine određuje kao proizvod jedinice brzine i jedinice za vreme:

$$[L] = u \cdot [V] \cdot [T] = [V] \cdot [T]. \quad (1.6)$$

Odgovarajuća brojna jednačina, zbog $u=1$, formalno ima isti oblik kao i veličinska:

$$\{L\} = \{V\} \cdot \{T\}. \quad (1.7)$$

U brojnoj jednačini slovne oznake predstavljaju vrednosti koje odgovaraju samo upotrebljenim jedinicama. Da bi se izbegli nesporazumi kada je $u \neq 1$, slovne oznake u brojnim jednačinama treba da se razlikuju od slovnih oznaka u veličinskim jednačinama. Na primer, brojna jednačina za linearnu (obodnu) brzinu osovine v :

$$\{v\} = \frac{\pi}{60} \{d\} \{n\} \quad (1.8)$$

daje linearnu brzinu v tačke na osovini prečnika d čija je brzina okretanja n . Pri tome su:

- $\{v\}$ brojna vrednost za v , za jedinicu m/s
- $\{d\}$ brojna vrednost za d , za jedinicu m
- $\{n\}$ brojna vrednost za n , za jedinicu o/min.

Brojna jednačina (1.6) može se napisati drugačije i kao

$$v_{\text{m/s}} = \frac{\pi}{60} d_m n_{\text{o/min}}, \quad (1.9)$$

gde indeksi označavaju upotrebljene jedinice.

1.3. ZAKONSKA METROLOGIJA

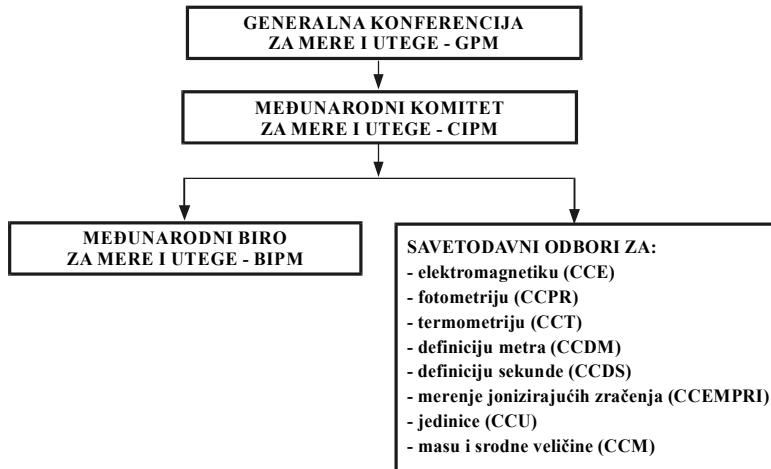
Temelj jedinstvenog Međunarodnog sistema jedinica (SI) postavljen je potpisivanjem Konvencije o metru (Convention du Mètre) 20.5.1875. u Parizu. Ovaj datum obeležava se kao Međunarodni dan metrologije. SI je koherentan sistem jedinica, zasnovan na sedam osnovnih jedinica:

- metar (m), jedinica dužine
- kilogram (kg), jedinica mase
- sekunda (s), jedinica za vreme
- amper (A), jedinica za jačinu električne struje
- kelvin (K), jedinica termodinamičke temperature
- mol (mol), jedinica količine materije
- kandela (cd), jedinica svetlosne jačine,

čije su definicije, šema materijalizacije, te dostignute granice prilikom materijalizacije dati u Dodatku 1.

Izvršni organi Konvencije o metru (slika 1.2) obezbeđuju međunarodnu komunikaciju na polju celokupne svetske metrologije. Tako na primer, Međunarodni biro za mere i utege (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM), sa svojim vrhunskim opremljenim laboratorijama, predstavlja naučnu instituciju Konvencije o metru.

Od 1955. godine deluje i Međunarodna organizacija za zakonodavnu metrologiju (Organisation Internationale de Métrologie Légale, OIML), čiji je cilj da preko

*Slika 1.2. Struktura izvršnih organa Konvencije o metru*

zemalja članica osigura jedinstvo i ispravnost merenja u međunarodnim razmerama. Zakonodavna (legalna) metrologija je deo metrologije koji se odnosi na merne jedinice, metode merenja i merne instrumente. U pogledu tehničkih zahteva i pravnih propisa obezbeđuje zakonsku garanciju u smislu sigurnosti i odgovarajuće tačnosti merenja.

Zakonska metrologija pomoći pravnih propisa i ispitno-nadzornih stanica utiče na industriju, trgovinu, školstvo, nauku i druge delatnosti tako što:

- propisuje merne jedinice i način njihove primene;
- određuje koja se merila (merni instrumenti, uredaji, sistemi), sa kojom tačnošću i u kojim rokovima moraju stručnim pregledom proveravati i overavati;
- obezbeđuje pregled i overu merila da bi se potvrdila njihova ispravnost;
- nadzire provođenje propisa o merenju.

Osim pomenutih organizacija, na planu jedinstva merenja u međunarodnim okvirima deluju Međunarodna komisija za elektrotehniku (International Electrotechnical Commission, IEC) i Međunarodna organizacija za standardizaciju (International Organization for Standardization, ISO). Značajnu ulogu imaju organi i organizacije OUN, međunarodne organizacije za pojedine uže oblasti (železnica, telekomunikacije), kao i regionalne organizacije za standardizaciju.

Naša zemlja je potpisnica Konvencije o metru i Konvencije o osnivanju OIML i aktivno sudeluje u radu svih međunarodnih organizacija o merenju. Merno jedinstvo u našoj zemlji osiguravaju zakoni i merna služba na čijem je čelu Zavod za

mere i dragocene metale u Beogradu. Zakon o mernim jedinicama i merilima donet je decembra 1984. Dopunjavan je 1996, 1998 (Službeni list SRJ br. 80/94, 28/96, 12/98 i 35/98. Uredba o uslovima za akreditovanje za pregled i nadzor radnih etalona i merila uređuje organizacione, kadrovske i tehničke uslove koje treba da ispunjavaju preduzeća i druga pravna lica da bi se bavila ovim poslovima. U Dodatku 1 prikazana je šema zakonskih jedinica, koja uključuje i tablicu dozvoljenih dekadnih prefiksa u skladu sa pomenutim Zakonom. Širi kontekst metrologije tretiran je u Zakonu o standardizaciji iz 1988. (dopune 1991.), a takođe i u nizu preporuka JUS ISO/IEC i JUS EN.

1.4. TEHNIČKA METROLOGIJA

Deo metrologije koji se bavi problemima merenja u tehnici naziva se tehnička metrologija. U tehničkoj metrologiji koriste se mnogobrojna tehnička merna sredstva, svrstana u dve velike skupine: materijalizovane mere i merne uređaje.

Materijalizovana mera je merni instrument koji reproducuje jednu ili više poznatih vrednosti date veličine. Karakteristično je da materijalizovana mera (teg, lenjir, električni otpornik) ne poseduje kazaljku niti elemente koji su pokretni tokom merenja.

Merni uređaj je merni instrument koji pretvara (transformiše) merenu veličinu, ili neku drugu veličinu vezanu za nju, u pokazivanje ili ekvivalentnu informaciju. Merni uređaj često ima dodatne elemente radi ispunjavanja specifičnih funkcija, kao što su automatska regulacija, signalizacija, odabiranje itd. Pretvaranje merene veličine u veličinu koju može da uoči posmatrač (dužina, zvuk, svetlosni kontrast), ili u veličinu koja služi za prenos informacije o merenju, obično se odvija u mernom (konverzionom) lancu. Merni uređaji nazivaju se prema veličini koju mere (manometar, termometar, voltmeter), prema primjenom principu merenja (komparator, kompenzator), prema imenu pronalazača ili konstruktora (Meklodor vakuummetar, Holova sonda) ili pak imaju komercijalne nazine, koje daje proizvođač (rotametar, minimetar).

Za rešavanje problema vezanih za tehničku metrologiju razvijen je veliki broj mernih postupaka i metoda. Merni postupak predstavlja skup operacija neophodnih za provođenje merenja. Pod operacijama se podrazumevaju i matematički proračuni neophodni za određivanje vrednosti merene veličine.

Metoda merenja je način poređenja primenjen u merenju. Metodom direktnog merenja vrednost merene veličine dobija se direktno, bez dopunskog proračuna, zasnovanog na funkcionalnoj zavisnosti te veličine od drugih, stvarno merenih veličina. Metodom indirektnog (posrednog) merenja vrednost veličine dobija se merenjem drugih veličina direktnom metodom, pri čemu su one povezane sa veličinom koju treba izmeriti poznatom relacijom. Tako se, na primer, merenje specifične otpornosti provodnika zasniva na merenju njegove otpornosti, te dužine i površine njegovog poprečnog preseka. Poseban tip merenja su osnovna (apsolutna) merenja zasnovana isključivo na merenjima osnovnih veličina (dužina, masa, vreme) koje ulaze u definicionu formulu merene veličine.

Zavisno od načina na koji se utvrđuje brojna vrednost merene veličine, razlikuju se:

- **metoda komparacije**, zasnovana na zameni nepoznate vrednosti merene veličine sa poznatom vrednošću tako da pokazivanja na indikacionom instrumentu budu jednaka (određivanje mase vagom i žigosanim tegovima, određivanje otpora pomoću mernog kola u kome se prvo nalazi mereni otpornik, a onda etalonski);
- **diferencijalna metoda**, zasnovana na merenju razlike dobijene poređenjem nepoznate i poznate vrednosti merene veličine, pri čemu je poznata vrednost odabrana tako da se malo razlikuje od nepoznate (merenje dveju dužina posredstvom komparatora, merenje dva električna napona pomoću diferencijalnog voltmetra);
- **nulta metoda**, poseban tip diferencijalne metode, gde se mala razlika između nepoznate i poznate vrednosti merene veličine svodi na nulu (merenje struje i napona pomoću komparatora, merenje električnog otpora pomoću Vitstonovog mosta i nul-indikatora);
- **metoda koincidencije**, poseban tip diferencijalne metode, gde se mala razlika između nepoznate i poznate vrednosti merene veličine određuje posmatranjem podudarnosti (koincidencije) izvesnih znakova ili signala (generisanje signala odluke ili alarma u sistemima automatskog upravljanja kada se vrednost regulirane (merene) veličine podudari sa unapred definisanim graničnom vrednošću);
- **metoda interpolacije**, sastoji se u računskom određivanju vrednosti merene veličine unutar intervala u kome su njene poznate vrednosti, pri čemu se polazi od prepostavljene zakonitosti koja povezuje te vrednosti;
- **metoda ekstrapolacije**, računska metoda, odnosi se na određivanje vrednosti merene veličine izvan intervala poznatih vrednosti, pri čemu se polazi od prepostavljene zakonitosti koja povezuje te vrednosti.

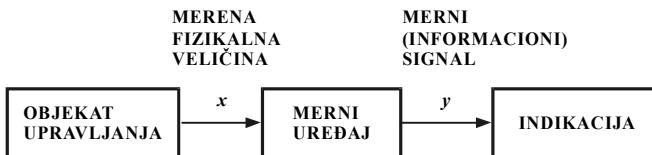
Nazivi metoda su termini tehničke metrologije, pa ih je potrebno upotrebljavati u skladu sa Rečnikom zakonske metrologije, koji izdaje OIML.

1.5. MERENJE I AUTOMATSKO UPRAVLJANJE

Merenje u automatskom upravljanju ima prvorazredni značaj, jer se za dobijanje neophodnih informacija o procesima koji se odvijaju u upravljanom objektu koriste razni merni uređaji. Sve veća primena računara i strožija ekonomski i tehnička ograničenja koja se postavljaju na upravljeni proces predstavljaju aktuelne izazove za konstrukciju savremenijih i tačnijih sredstava za merenje fizikalnih veličina relevantnih za upravljanje.

Merni uređaji u upravljanju primenjuju se na tri funkcionalno različita načina. Prvi način podrazumeva primenu specifičnih instrumenata za merenje fizičalnih veličina s ciljem utvrđivanja njihovih vrednosti u standardnim jedinicama. Ovaj način, zapravo, određuje uobičajenu primenu mernih uređaja uopšte. U upravljanju, ovaj način primenjuje se u kontroli kvaliteta sirovina, proizvodnje i kontroli gotovih proizvoda.

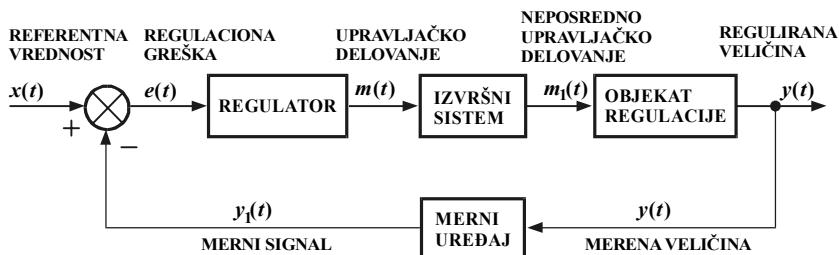
Drugi način je primena mernih uređaja u funkciji nadgledanja (monitoringa). Instrumenti sa takvom funkcijom (slika 1.3) daju informaciju koja čoveku-operatoru omogućava da preduzme odgovarajuću upravljačku akciju.



Slika 1.3. Merni uređaj sa funkcijom monitoringa

Na primer, u tehnološkom postrojenju razvoj hemijske reakcije indicira se merenjem temperature i pritiska u više tačaka, što omogućava operatoru da preduzme adekvatnu upravljačku akciju: promenu napona napajanja na električnom grejaču, promenu dotoka vode za hlađenje, promenu pozicije regulacionog ventila, ili neku drugu akciju.

Treći način odnosi se na primenu mernih uređaja koji su sastavni deo sistema automatskog upravljanja. Struktura sistema automatskog upravljanja može biti različita. Na slici 1.4 prikazana je strukturalna blok-šema jednokonturnog regulacionog kola sa negativnom povratnom spregom. Ovakav sistem automatske regulacije održava željeno kretanje reguliranog objekta, odnosno stabilizuje reguliranu veličinu $y(t)$ u skladu sa zadanim (referentnom) vrednošću $x(t)$. Merni uređaj meri trenutnu vrednost regulirane veličine $y(t)$, a rezultat u formi mernog signala $y_1(t)$ dolazi na komparator, gde se poređi sa referentnom vrednošću. Rezultat komparacije je regulaciona greška $e(t) = x(t) - y_1(t)$. U zavisnosti od veličine greške, regulator na izlazu generiše manipulativni signal $m(t)$, koji deluje na objekat kako bi se ostvarila jednakost $y(t) = x(t)$. Pošto je izlazni signal $m(t)$ iz regulatora male snage, potreban je

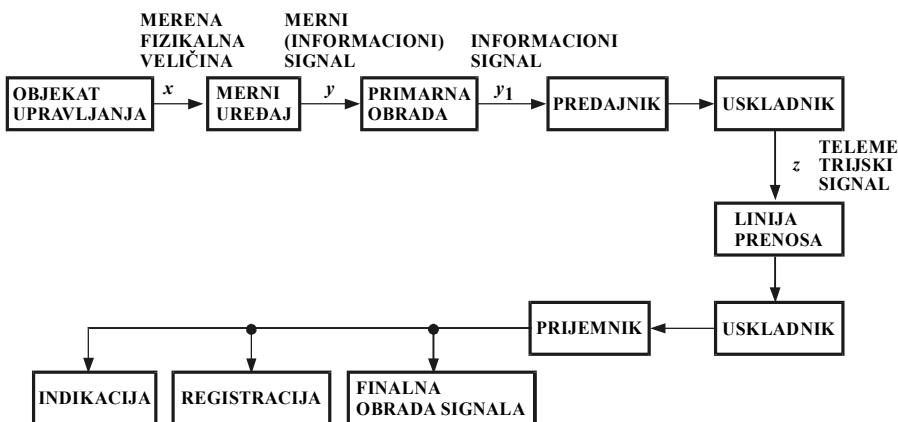


Slika 1.4. Strukturalna blok-šema sistema automatske regulacije sa negativnom povratnom spregom

izvršni sistem. Zahvaljujući velikom energetskom pojačanju, izvršni sistem na svom izlazu daje signal $m_1(t)$ za neposrednu promenu toka energije ili materijala na objektu u smislu da $e(t) \rightarrow 0$.

Kvalitet upravljanja principijelno zavisi od karakteristika mernog uredaja u povratnoj grani. To znači da tačnost i rezolucija regulisanja procesne varijable nikad ne mogu biti veći od tačnosti i rezolucije upotrebljenog mernog uredaja. Za ovako strukturirane sisteme automatskog upravljanja u celosti važi konstatacija da bez merenja nema ni upravljanja.

Digitalna obrada informacija nalazi sve veću primenu u raznim oblastima nauke i tehnike, a naročito u informaciono-mernoj tehnici. Razlog je, u prvom redu, u brzini delovanja digitalnih mernih uredaja, koji se grade na bazi integralnih kola velikog ili srednjeg stepena integracije. Zahvaljujući tome oni imaju čitav niz prednosti u odnosu na analogne merne uredaje kada su u pitanju funkcionalnost, efikasnost, ekonomičnost, tačnost i pouzdanost. Primena digitalnih mernih uredaja u upravljanju prostorno razuđenim objektima ima dodatne prednosti koje su u vezi sa prenosom informacija na veća rastojanja. Po svojim funkcijama telemetrijski sistem (slika 1.5) identičan je lokalnom mernom sistemu u funkciji monitoringa. Strukturne razlike uslovljene su potrebotom prenosa informacija od objekta merenja (upravljanja) do udaljenog mesta, gde se te informacije obrađuju (komandni centar).

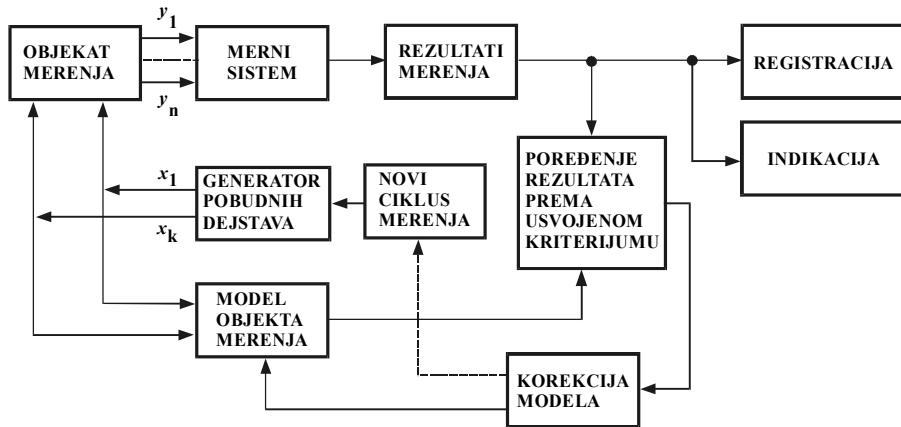


Slika 1.5. Struktura telemetrijskog sistema sa jednom linijom

Informacioni signal y kao rezultat merenja fizikalne veličine x najčešće nije pogodan za prenos na daljinu, pa ga je potrebno u predajniku prilagoditi tom zahtevu, tako da se dobije telemetrijski signal z . Na prijemnoj strani telemetrijskog sistema prijemnik prihvata takav signal i pretvara ga u formu pogodnu za indikaciju, registraciju ili obradu u računaru. Podela na primarnu i završnu (sekundarnu) obradu signala je uslovna, ali se može reći da se primarna obrada bazira na manjem, a završna na većem obimu sračunavanja.

Merenje u tehnici upravljanja uključuje i sistem za obradu signala i informacija. U tom smislu aktuelni problemi merenja koji sadrže i informacioni aspekt privlače veliku pažnju naučne i stručne javnosti. Zahvaljujući primeni računara

u upravljanju složenim objektima, razvijaju se automatizirani informacioni sistemi, koji realizuju merenje stanja objekta, te obradu i registraciju mernih informacija. Jedna od varijanti organizacije kompleksnih merenja prikazana je na slici 1.6.



Slika 1.6. Struktura automatizovanog informaciono-mernog sistema

Nezavisne promenljive x_1, x_2, \dots, x_k deluju na objekat merenja po nekom slučajnom zakonu ili na način definisan pomoću generatora pobudnog delovanja. Kao rezultat ovog delovanja menjaju se stanja objekta i odgovarajuće fizikalne veličine y_1, y_2, \dots, y_n , koje reprezentuju ta stanja. Funkcionalna zavisnost

$$\begin{aligned}
 y_1 &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_k) \\
 y_2 &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_k) \\
 &\dots\dots\dots \\
 y_n &= f_n(x_1, x_2, \dots, x_k)
 \end{aligned} \tag{1.10}$$

predstavlja opšti slučaj kompleksnih merenja, pri čemu funkcije y_i karakterišu različite pojavne oblike unutrašnjih svojstava objekta. Nakon završne obrade signala rezultat merenja se indicira ili registruje.

Strukturalna šema automatiziranog mernog sistema može da sadrži i model mernog objekta. Tačnost modela proverava se poređenjem mernih rezultata, dobijenih merenjem na objektu i rezultata testiranja modela. Koliko je model objekta dobar zavisi od prethodnih saznanja o objektu, tzv. apriornih informacija. Što je više apriornih informacija, merenje fizikalne veličine y biće tačnije i kvalitetnije. U praktičnim merenjima aporne informacije omogućavaju da se odredi model objekta sa najmanjim brojem veličina. Tako, na primer, pri određivanju frekvencije harmonijskog signala, o ispitivanom signalu poznato je sve osim njegove frekvencije (sve, jer je signal a priori harmonijski). Amplituda nema uticaja na frekvenciju, pa se može isključiti iz razmatranja ograničavanjem na bilo koju vrednost.

Kada se test-signali dovode samo na objekat, tada je reč o aktivnom merenju, a kada se oni dovode samo na model objekta, merenje je pasivno.

Razmotrena struktura automatiziranog merno-informacionog sistema pokazuje da su njegove metrološke karakteristike odredene karakteristikama mernog kanala (izbor fizikalnih veličina za merenje, dinamički i statički opseg merenja, tačnost merenja, inercionost mernih uredaja) i karakteristikama generatora test-signala (oblici test-signala, tačnost generisanja, dinamički opseg, inercionost).

PITANJA I ZADACI

- 1) Kakav je hijerarhijski odnos između fundamentalne i primenjene teorije merenja i neposrednih praktičnih merenja?
- 2) Zašto veličinska jednačina ne zavisi od upotrebљenih jedinica?
- 3) Šta je brojna jednačina? Je li jednačina $O=2r\pi$ brojna jednačina?
- 4) Kako se merni uredaji primenjuju u procesu upravljanja?
- 5) U čemu se ogleda značaj mernih uredaja u sistemima automatske regulacije sa negativnom povratnom spregom?
- 6) Objasnite strukturu jednokanalnog telemetrijskog sistema.

LITERATURA

1. I. Pfancangl: *Teorija izmerenij* (prevod sa engl.), Mir, Moskva, 1976.
2. M. Brezinščak: *Merenje i računanje u tehnički znanosti*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1966
3. M. Brezinščak: *Metrologija, zakonska*, Tehnička enciklopedija, tom 8 (496-525), Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb, 1987.
4. L.A. Sena: *Jedinicy fizičeskih veličin i ih razmernosti*, Nauka, Moskva, 1977.
5. A.G. Čertov: *Jedinicy fizičeskih veličin*, Visšaja škola, Moskva, 1977.
6. *Medunarodni rečnik metrologije (osnovni i opšti pojmovi)*, Savezni zavod za mere i dragocene metale, Beograd, 1985.
7. *Rečnik zakonske metrologije (osnovni termini)*, Savezni zavod za mere i dragocene metale, Beograd, 1983.
8. V.S. Malov, J.A. Kuperšmid: *Teleizmerenije*, Energija, Moskva, 1975.
9. A.S. Moris: *Principles of measurement and instrumentation*, Prentice Hall, 1988.
10. A.P. Stahov: *Vvedenie v algoritmčeskuju teoriu izmerenija*, Sovetskoe radio, Moskva, 1977.
11. S.R. Spiridonović: *Zadaci i uloga Saveznog zavoda za mere i dragocene metale u određivanju i održavanju jedinice vremena – sekunde*, Beograd, 1987.
12. M.S. Weiss: *Principles of measurement*, www.courses.wcupa.edu/weiss.203/files/Measure1.doc
13. *Medunarodni sistem jedinica (SI)*, (prevod 5. izdanja Le Systeme International d'Unites (SI) u izdanju BIMP), Savezni zavod za mere i dragocene metale, Beograd, 1986.
14. *Egipatske, grčke i rimske mere, jedinice SI*: www.vets.edu.yu/elektrometrologija/o%20merenju.htm
15. *Dokumenti medunarodnih organizacija za merenje*: <http://www.bipm.org/en/si/>
<http://www.oiml.org/>
<http://www.iso.ch/iso/en/>

2

PLANIRANJE I ORGANIZACIJA MERENJA

2.1. MERENJE I TEORIJA EKSPERIMENTA

Svako proučavanje procesa ili objekta u naučno-tehničkim disciplinama podrazumeva nužnost merenja fizikalnih veličina, koje odražavaju svojstva predmeta istraživanja. Praktična realizacija merenja zato je, u suštini, eksperimentalni proces. Velika zastupljenost eksperimentalnih metoda dovela je do konstituisanja teorije eksperimenta, u okviru koje se razmatraju:

- 1) organizacija eksperimenta s ciljem minimizacije troškova što se odnose na opremu, vreme i tačnost eksperimenta;
- 2) obrada rezultata s ciljem dobijanja maksimalne količine informacija o ispitivanom objektu (procesu);
- 3) analiza objekta na osnovu rezultata eksperimenta.

Osnova teorije eksperimenta je matematička statistika, jer su rezultati eksperimenta u načelu uvek neizvesni, pa se mogu tretirati kao slučajne veličine. Mnogobrojni su razlozi koji eksperiment čine neizvesnim: delovanje nekontrolisanih faktora, nekontrolisana promena uslova odvijanja eksperimenta i greške posmatranja. U greške posmatranja spadaju i greške merenja, koje nastaju zbog nesavršenih mernih uređaja i sredstava za prenos informacija, te neadekvatne metode merenja. Njihov uticaj na rezultat posmatranja (merenja) ima najčešće slučajni karakter.

Matematička statistika mnogo je doprinela razvoju metoda analize, ocene i predstavljanja rezultata merenja, a pod njenim okriljem izmenila se i sama strategija eksperimenta. Zbog toga se danas govori o matematičkoj teoriji eksperimenta, odnosno teoriji eksperimentalnih istraživanja baziranoj na aparatu matematičke statistike. Teorija eksperimenta je opšta teorija, jer su njeni principi, kao što su dobijanje rešenja (rezultata) u uslovima neodređenosti, obrada rezultata posmatranja, organizacija i planiranje eksperimenta, važeći za svaki naučni eksperiment, bez obzira na njegove specifičnosti.

U tabeli 2.1 data je klasifikacija inžinjerskog eksperimenta u odnosu na njegovu strukturu, nivo naučnog istraživanja, organizaciju, te u odnosu na način realizacije. Tip konkretnog eksperimentalnog istraživanja određuje složenost ispitivanog objekta, apriorne informacije o objektu (izučenost objekta) i detaljizacija njegovog opisa. Na toj osnovi razlikuju se eksperimenti u kojima se:

KRITERIJ KLASIFIKACIJE	TIP EKSPERIMENTA	OSNOVNE ODLIKE
NIVO NAUČNOG ISTRAŽIVANJA	PRIRODNI NA FIZIKALNOM MODELU	Neposredna veza sa objektom istraživanja Eksperiment se provodi na realnom modelu objekta kao njegovoj zameni (realna simulacija)
	NA MATEMATIČKOM MODELU	Eksperiment se provodi na matematičkom modelu objekta uz pomoć računara (matematička simulacija)
	LABORATORIJSKI NA ISPITNOM STOLU	Provodi se s ciljem provere naučnih hipoteza i teorija, te istraživanja opštih zakonitosti Izučavanje konkretnog objekta (tehnološkog procesa, proizvoda)
	INDUSTRIJSKI	Provera novog procesa ili proizvoda u skladu sa rezultatima laboratorijskog eksperimenta ili eksperimenta na ispitnom stolu (provera kvaliteta)
	STANDARNI	Obični (rutinski) eksperiment, provodi se u laboratorijskim uslovima na bazi jednostavne metode i opreme (višestruka i dugotrajna merenja)
	SPECIJALNI UNIKATNI	Inžinjerski eksperiment, koji se odnosi na aparate i sredstva posebne namene, npr. automatike Provodi se na složenom objektu sa velikim brojem mernih veličina koje se brzo menjaju, sa merenjem raznovrsnih karakteristika npr. na avionu, nuklearnoj centrali i sl.
REALIZACIJA	SLOŽENI	Sastoje se od različitih tipova eksperimenta, koji su povezani jedinstvenim programom istraživanja i zajedničkim rezultatima
	PASIVNI	Sastoje se od registracije ulaznih i izlaznih veličina, bez delovanja na eksperiment u toku njegovog odvijanja
	AKTIVNI	Eksperiment sa aktivnim delovanjem u toku njegovog odvijanja
	AKTIVNI SA PROGRAMSKIM UPRAVLJANJEM AKTIVNI SA POV RATNIM DELOVANJEM	Aktivni eksperiment koji se provodi po utvrđenom redosledu Moguća je interpretacija rezultata na svakoj etapi eksperimenta i u skladu s njima optimizacija strategije provođenja eksperimenta

Tabela 2.1. Klasifikacija eksperimenta

- uzima u obzir nehomogenost, npr. materijala ili sirovine;
- deluje na izazivanje određene pojave ili svojstva objekta (najčešće, pojava se provokira za dobro organizovane objekte, uz dovoljno apriornih informacija);
- uzima u obzir promena parametara objekta samo u opsegu koji odgovara ekstremu nekog kriterija optimalnosti, itd.

2.2. PLANIRANJE INŽINJERSKOG EKSPERIMENTA

U okviru teorije eksperimenta posebno mesto ima teorija inžinjerskog eksperimenta, koji se odnosi na istraživanja mehaničkih, hidrauličkih i električnih procesa. Merenje kao eksperiment u ovim istraživanjima ima više etapa, koje se sastoje od merne procedure i niza pripremnih i završnih procedura. Tri su osnovne etape svakog merenja:

- 1) pripreme i planiranje merenja,
- 2) realizacija merenja,
- 3) obrada i analiza dobijenih rezultata.

U okviru prve etape rešavaju se problemi u vezi sa pripremom, planiranjem i organizacijom merenja. Dobar ishod merenja ne zavisi samo od kvaliteta usvojenih rešenja već i od toga da li je u toku pripreme propušteno da se neki problem uoči i odredi njegovo rešenje. U pripremnoj fazi merenja treba definisati sledeće:

- **cilj merenja**, koji upućuje na to šta i zašto treba da se meri; (kod merenja fizikalnih veličina najčešće treba da se odrede: vrednosti skalarnih veličina (frekvencija, masa, prostorno-geometrijske dimenzije), vrednosti vektorskih veličina (magnetna indukcija, sila, brzina), promene mernog procesa u vremenu (zavisnost fizikalne veličine od vremena) ili promene mernog procesa u relevantnom kooordinatnom sistemu (volt-amperska karakteristika, kriva magnećenja, amplitudno-frekventna karakteristika));
- **objekt ili model objekta** i odgovarajuće fizikalne veličine koje ga predstavljaju (fizikalne veze između veličina, opseg promena, prethodni rezultat);
- **parametre objekta** koji će se meriti i koji treba da su adekvatni prethodno utvrđenim fizikalnim veličinama;
- **zavisnost** između definisanih veličina i onih koje se stvarno mere;
- **uslove** u kojima će se merenje obaviti, kao i veličine koje utiču na promenu tih uslova;

- **granice grešaka** za svaku merenu veličinu, a u skladu sa realnim potrebama i ekonomskim mogućnostima, tj. po kriteriju minimuma gubitaka zbog netačnosti merenja;
- **metod merenja** za svaku fizikalnu veličinu;
- **potrebne merne uređaje**, tj. metrološke karakteristike svih mernih uredaja koji će se upotrebiti tokom merenja, kao i način automatizacije merenja;
- **planiranje** merenja po nekoj od metoda planiranja eksperimenta (jednofaktorni eksperiment, ekstremalni eksperiment);
- **korekciju grešaka**, tj. metode za smanjivanje grešaka;
- **formu predstavljanja rezultata** (formulari, protokol merenja);
- **algoritme i sredstva** neophodne za obradu rezultata merenja i procenu grešaka;
- **potrebne i stvarno raspoložive resurse** (predračun troškova za opremu i ljudi koji će provesti merenje);
- **ekonomski efekti merenja** (sravnjivanje dobijenih rezultata i postavljenog cilja merenja).

Objekat istraživanja i cilj merenja obično su definisani ranije, u nekoj prethodnoj etapi istraživanja. U toku priprema za merenje, u takvom slučaju potrebno je proveriti postavljeni cilj (smisao dobijenih rezultata sa aspekta efikasnosti, funkcionisanja ili upravljanja istraživanim objektom) i eventualno ga korigovati.

PITANJA I ZADACI

- 1) Na osnovu kojih karakteristika se može izvršiti klasifikacija inžinjerskih eksperimenata?
- 2) Koje su bitne etape svakog merenja?
- 3) Zašto se pripremnoj fazi merenja poklanja velika pažnja?

LITERATURA

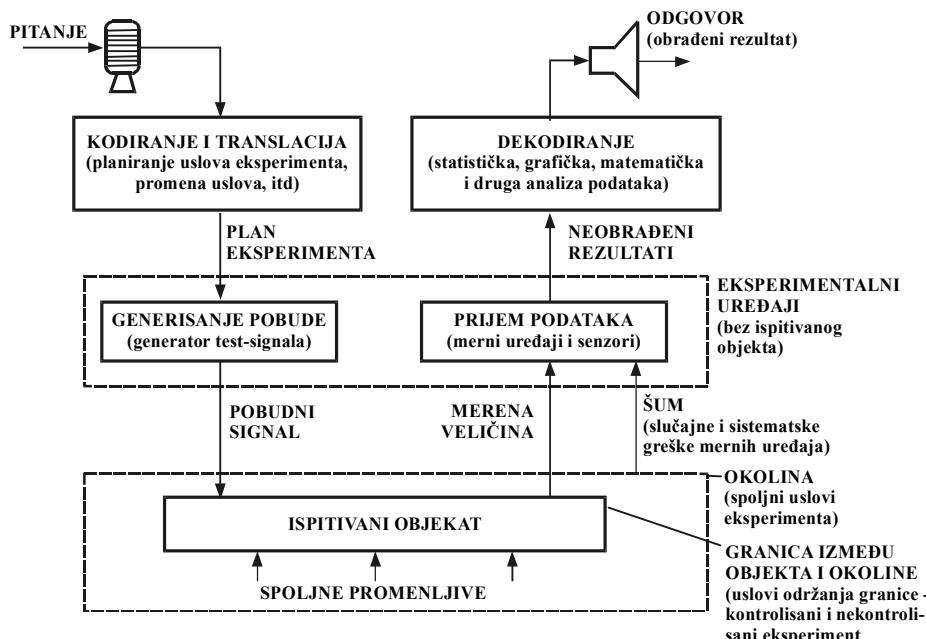
1. H. Šenk: *Teorija inžinernog eksperimenta* (prevod sa engl.), Mir, Moskva, 1972.
2. V.I. Barabašuk, B.P. Kredencer, V.I. Mirošničenko: *Planirovanie eksperimenta v tehnike*, Tehnika, Kijev, 1984.
3. *Experiment design*: <http://ei.cs.vt.edu/čcs5014/courseNotes/3.ExperimentDesign/abrams377.html>
<http://www.tcnj.edu/črgraham/rhetoric/experiment-design.html>

3

OBRADA MERNIH REZULTATA

3.1. VRSTE MERNIH GREŠAKA

Zbog delovanja mnogobrojnih faktora, čije se delovanje ne može kontrolisati, uslovi u kojima se odvija eksperiment neprekidno se menjaju. Zato rezultat merenja uvek sadrži neku grešku. Greške mogu nastati u bilo kojem segmentu mernog procesa, ali i u vezama između pojedinih segmenta, kako je to simbolički prikazano na slici 3.1.



Slika 3.1. Opšta struktura eksperimenta

Po načinu kako je merna greška izražena razlikuju se apsolutna i relativna greška. Apsolutna greška Δx mernog uređaja je razlika između njegovog pokazivanja x i usvojene stvarne vrednosti merene fizikalne veličine x_0 :

$$\Delta x = x - x_0 . \quad (3.1)$$

Relativna greška je količnik apsolutne greške i usvojene stvarne vrednosti merene veličine:

$$G = \frac{\Delta x}{x_0} \quad \text{ili} \quad G = \frac{\Delta x}{x_0} 100\% . \quad (3.2)$$

Stvarna vrednost x ostaje nepoznata i nakon merenja. U zavisnosti od raspoloživih uslova, njoj se može samo manje ili više približiti. Koliko je to približavanje uspešno izražava verovatnoća da se stvarna vrednost merene veličine nalazi u nekom intervalu širine 2Δ oko izmerene vrednosti x_0 :

$$x_0 - \Delta \leq x \leq x_0 + \Delta . \quad (3.3)$$

Kvalitet merenja ili njegova vrednost veći su što je interval 2Δ manji, tj. u obrnutoj su сразмери sa veličinom greške. Što su veće ekonomске i vremenske mogućnosti i znanje eksperimentatora u stručnom i metodskom smislu, učinjene greške biće manje. Međutim, bez obzira na to, postavlja se pitanje dokle se može ići sa ovim smanjenjem. Ono je konačno i može da ide do prirodne granice, postavljene fizikalnim principom neodređenosti. Sa ovom granicom vrhunска merna tehniku se već sukobila prilikom definicije jedinice za dužinu i vreme. U praktičnim merenjima nastoje se savladati greške koje su znatno iznad te granice.

Apsolutna greška može biti aditivna merenoj veličini, odnosno proporcionalna, multiplikativna ili nelinearna sa merenom veličinom.

Aditivna greška Δa javlja se na ulazu mernih uređaja nezavisno od merene veličine:

$$y = K(x + \Delta a) = Kx + K\Delta a . \quad (3.4)$$

Multiplikativna greška Δm nastaje zbog promene koeficijenta statičkog prenosa K linearog mernog uređaja i proporcionalna je merenoj veličini:

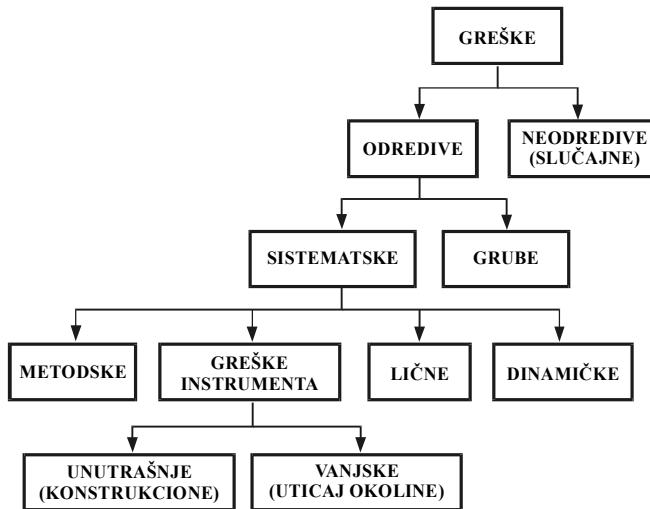
$$y = (K + \Delta K)x = Kx + \Delta m . \quad (3.5)$$

Nelinearna greška Δn javlja se kod mernih uređaja sa nelinearnom funkcijom, na primer:

$$y = Kx + ax^2 = Kx + \Delta n , \quad (3.6)$$

pri čemu je linearна komponenta Kx dominantna.

S obzirom na veliki broj uzroka koji ih uslovjavaju, greške nije lako klasifikovati. Po jednoj od mogućih klasifikacija (slika 3.2) greške se dele na dve velike skupine: odredive i neodredive. Odredive greške su one koje se na neki način mogu utvrditi – ponekad samo teoretski, a neodredive ili slučajne zapažaju se tek prilikom ponovljenih merenja iste veličine. Zbog toga, objektivno gledano, neodredivih grešaka nema, što znači da je podela na odredive i neodredive subjektivne prirode. Što su veće ekonomске i vremenske mogućnosti i bolja oprema i metode, veće su mogućnosti da neodredive greške postanu odredive. Zato se i kaže da je zbog prisustva slučajnih grešaka rezultat nepouzdan (neprecizan), a da je zbog prisustva sistematskih grešaka netačan.



Slika 3.2. Klasifikacija mernih grešaka

Odredive greške dele se na sistematske i grube. Sistematske nastaju usled nesavršenosti: mernog postupka, mernih instrumenata, mera, prirode merene fizikalne veličine, uticaja okoline i ličnog uticaja eksperimentatora. Grube greške nastaju prvenstveno zbog nepažnje ispitivača ili nedovoljnog stručnog iskustva. U tehnici automatske regulacije posebnu važnost imaju dinamičke greške mernih uredaja, koje se manifestuju prilikom merenja fizikalnih veličina promenljivih sa vremenom. Kod svih navedenih grešaka može biti izražen aditivni, multiplikativni, proporcionalni ili nelinearni karakter.

3.2. OBRADA REZULTATA NEPOSREDNIH MERENJA

3.2.1. Obrada slučajnih grešaka kod neposrednih merenja

Slučajne greške u rezultatima eksperimenta posledica su mnogobrojnih i neizbežnih promena koje nastaju u merama, mernim uredajima, okolini, objektu ispitivanja, te u samom ispitivaču. One se ne mogu odrediti, ali se mogu proceniti uz pomoć matematičke statistike i teorije verovatnoće. Zato je potrebno eksperiment ponoviti više puta pod istim uslovima. Tako se dobija niz mernih rezultata: x_1, x_2, \dots, x_n jedne te iste veličine, čija tačna vrednost nije poznata. Prilikom svakog merenja učinjena je greška:

$$a_i = x_i - x, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3.7)$$

Ako se sve greške saberu, iz dobijenog zbiru sledi da je stvarna vrednost:

$$x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i. \quad (3.8)$$

Prvi član jednačine (3.8) srednja je vrednost \bar{x} , a drugi član je greška srednje vrednosti, koja teži nuli za beskonačan broj merenja. Iz praktičnih razloga broj merenja je ograničen, pa se statističkim metodima procenjuje greška srednje vrednosti, tj. procenjuje se verovatnoća sa kojom se stvarna vrednost merene veličine x zamjenjuje srednjom vrednošću \bar{x} .

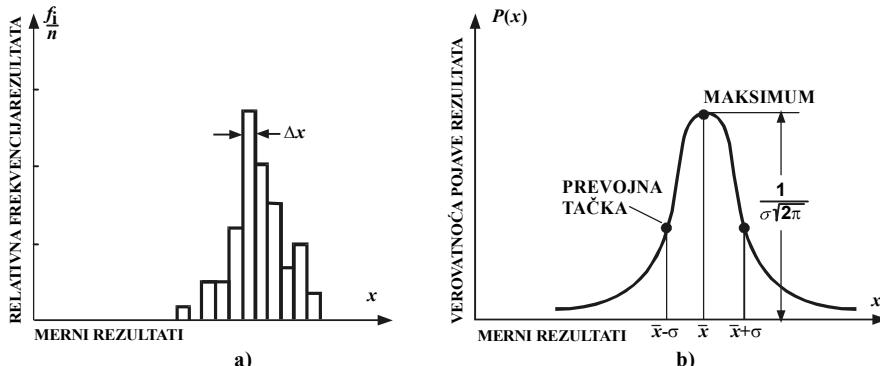
Ako se u toku eksperimenta rezultat x_i pojavio f_i puta, gde je $i = 1, 2, \dots, n$, tada je očigledno:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i x_i}{n}, \quad (3.9)$$

gde je f_i/n relativna frekvencija pojave rezultata x_i .

Ako se, dalje, prepostavi da se sve vrednosti veličine x u intervalu $x_i \pm (\Delta x)/2$, gde je Δx proizvoljno odabrani i dovoljno mali interval, javljaju sa istom frekvencijom f_i , odnosno relativnom frekvencijom f_i/n , dobija se histogram kao na slici 3.3a. Matematički zapis ove prepostavke je:

$$\frac{f_i}{n\Delta x} = \Psi_i. \quad (3.10)$$



Slika 3.3. Raspodela mernih rezultata: a) histogram, b) kriva normalne raspodele

Prema teoriji verovatnoće, relativna frekvencija f_i/n rezultata x_i interpretira se kao verovatnoća njegove pojave na intervalu Δx , tako da se iz (3.10) dobija:

$$P_i = \Psi_i \Delta x, \quad (3.11)$$

gde Ψ_i predstavlja gustinu verovatnoće.

Za povećani broj mernih rezultata, tj. za $n \rightarrow \infty$, interval $\Delta x \rightarrow 0$, te se umesto histograma dobija kontinualna kriva raspodele gustine verovatnoće $\Psi(x)$. Verovatnoća da rezultat x bude u intervalu x_1 do x_2 jednaka je površini ispod krive $\Psi(x)$ na tom intervalu:

$$P(x_1 < x < x_2) = \int_{x_1}^{x_2} \Psi(x) dx . \quad (3.12)$$

Kriva raspodele verovatnoće $\Psi(x)$ ima različit oblik. Ako se prepostavi:

- 1) da je veća verovatnoća pojave rezultata sa malom nego sa velikom greškom,
- 2) da su jednakoverojatni rezultati sa negativnom i pozitivnom greškom,

tada kriva $\Psi(x)$ ima oblik:

$$\Psi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-(x-\bar{x})^2/2\sigma^2}, \quad (3.13)$$

i naziva se normalna ili Gausova kriva raspodele.

Parametar normalne raspodele je standardno odstupanje rezultata merenja σ , a njegova vrednost procenjuje se na osnovu:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} . \quad (3.14)$$

Normalna raspodela je simetrična i monotono opadajuća, sa maksimumom od $1/(\sigma\sqrt{2\pi})$ u $x = \bar{x}$ i prevojnima tačkama u $x = \bar{x} \pm \sigma$ (slika 3.3b). Njena normirana forma dobija se iz (3.13) uvođenjem bezdimenzionalne promenljive $z = (x - \bar{x}) / \sigma$:

$$\Psi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-z^2/2} . \quad (3.15)$$

Verovatnoća da je merena veličina u intervalu $x_1 < x < x_2$ sada se jednostavno može izračunati kao površina ispod normirane krive $\Psi(z)$ u intervalu $z_1 < z < z_2$:

$$P(x_1 < x < x_2) = P(z_1 < z < z_2) = \Phi(z_2) - \Phi(z_1), \quad (3.16)$$

gde su bezdimenzionalne granice $z_1 = (x_1 - \bar{x})/\sigma$ i $z_2 = (x_2 - \bar{x})/\sigma$ i gde je:

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-z^2/2} dz, \quad (3.17)$$

integral Laplasa koji je analitički nerešiv, pa se njegove vrednosti daju tabelarno, kao u Dodatku 2. Uz tabelu su prikazani tipični slučajevi koji se javljaju prilikom računanja površine ispod normalizovane krive, odnosno verovatnoće nalaženja rezultata merenja u zadatom intervalu.

Verovatnoća da je merena veličina u intervalu $\bar{x} \pm \sigma$ jest $P_1=0,683$, u intervalu $\bar{x} \pm 2\sigma$ je $P_2=0,954$, a u intervalu $\bar{x} \pm 3\sigma$ je $P_3=0,997$. Ukoliko se ustanovi da je neka vrednost x_i izvan intervala $\bar{x} \pm 3\sigma$, ona se smatra grubom greškom i odbacuje se. Preporučuje se da prilikom crtanja histograma raspodele broj intervala bude $m \approx \sqrt{n} + 1$, a širina intervala $\Delta x \approx (x_{\max} - x_{\min})/m$.

3.2.2. Odnos sistematskih i slučajnih grešaka

Rezultat inžinjerskog eksperimenta sadrži uvek neku grešku, koja je sumarna – sastoji se od dva dela, sistematske i slučajne greške. Njihov međusobni odnos zavisi od upotrebljenih mernih uređaja i uslova u kojima se eksperiment provodi. Kakav je doprinos sistematske, a kakav je slučajne greške ne može se zaključiti samo na osnovu jednog rezultata.

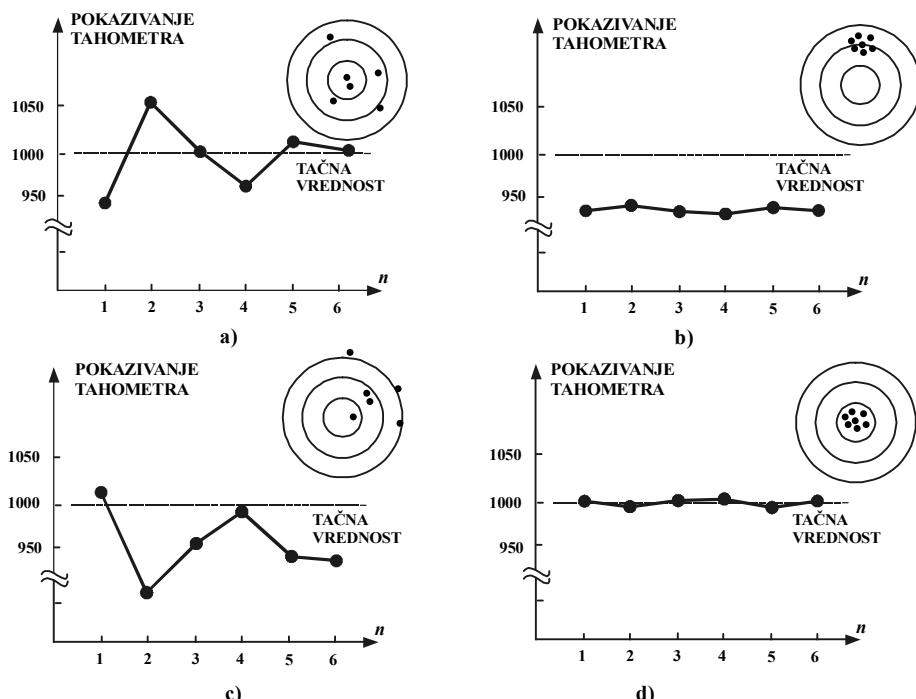
Slučajne greške odražavaju se kao rasutost rezultata merenja. U nizu merenja iste vrednosti merene veličine dobijaju se različita pokazivanja. Kvantitativna mera rasutosti može se izraziti pomoću standardnog odstupanja. Na primer, tahometrom se meri brzina električnog motora čija je stvarna vrednost $x = 1000$ o/min. U šest merenja dobijene su vrednosti 1050, 950, 1000, 1030, 990 i 980 o/min, (slika 3.4a). Srednja vrednost ovih merenja je $\bar{x} = 1000$ o/min, tj. jednaka je stvarnoj vrednosti. Međutim, rasutost rezultata zbog delovanja slučajnih faktora je velika ($\sigma = 36$ o/min). Prema tome, ovakav tahometar ima sistematsku grešku jednaku nuli ($x - \bar{x} = 0$), ali je slučajna greška velika – instrument je tačan i neprecizan.

Merenjem iste brzine od 1000 o/min pomoću drugog tahometra, izmerene su vrednosti: 950, 952, 949, 950, 951 i 948 o/min, (slika 3.4b). U ovom slučaju srednja vrednost je manja od stvarne za 50 o/min, što je rezultat sistematske greške. Rasutost pokazivanja ovog tahometra je mala ($\sigma = 1,4$ o/min), što znači da je slučajna greška zanemariva – instrument je netačan ali precizan.

Tahometar je netačan i neprecizan ako ima veliko odstupanje srednje vrednosti od stvarne i veliko rasturanje rezultata ($\sigma = 36$ o/min), (slika 3.4c). Najbolje bi bilo da tahometar daje rezultate sa malim rasturanjem ($\sigma = 1,4$ o/min) i srednju vrednost jednaku stvarnoj vrednosti – instrument je tačan i precizan, (slika 3.4d). Odnos tačnosti i preciznosti predstavljen je na slici 3.4 i u obliku pogodaka u metu.

U procesu automatske regulacije jedna vrednost obično se meri samo jedanput. Ako se merenje brzine realizuje nepreciznim tahometrom, (slika 3.4a i 3.4c), tada je mala verovatnoća da će merenje biti tačno. Takav instrument potrebno je popraviti ili zamjeniti. Tahometar koji ima samo sistematsku grešku, (slika 3.4b), potrebno je kalibrirati (baždariti) radi njenog otklanjanja, nakon čega se može upotrebljavati.

Kalibracija je utvrđivanje položaja znakova, ili eventualno samo glavnih znakova, na mernom uređaju u funkciji vrednosti merene veličine uz pomoć etalona ili tačnijeg instrumenta. Provera instrumenta u celom dijapazonu promene merene



Slika 3.4. Odnos sistematske i slučajne greške merenja: a) tačno i neprecizno, b) netačno i precizno, c) netačno i neprecizno, d) tačno i precizno

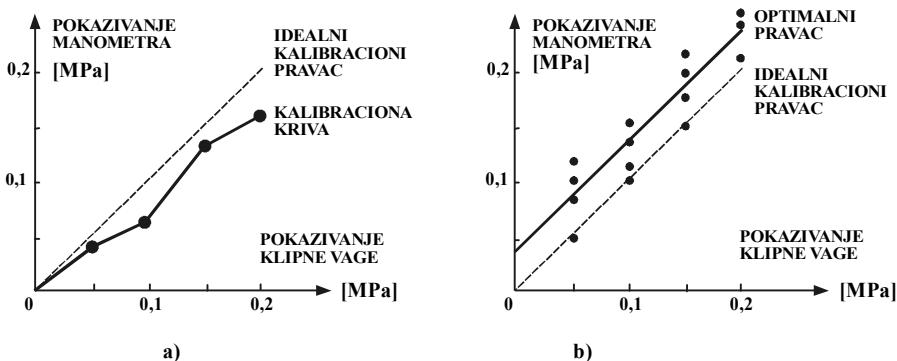
veličine uz pomoć nekog etalona radi smanjivanja grešaka, jedna je od najčešćih metoda u praksi. Kalibracijom se otklanjaju samo sistematske greške. Na primer, potrebno je kalibrirati senzor pritiska sa tenzometarskom trakom pomoću klijne vase, kao etalonskog instrumenta. Zadajući vrednosti pritiska 0, 0,05, 0,1, 0,15 i 0,2 MPa, koje odgovaraju glavnim oznakama na klijnoj vagi, zapisuju se odgovarajuća pokazivanja ispitivanog senzora. Tako se dobija skup kalibracionih tačaka, čije spajanje daje kalibracionu krivu (slika 3.5a). Razlika između idealnog kalibracionog pravca (pokazivanje klijne vase) i kalibracione krive (pokazivanje senzora) jest sistemski greški senzora, na osnovu kojih se može napraviti skala njegovog tačnog pokazivanja.

Da bi se uzeo u obzir i uticaj slučajnih grešaka, kalibracija se vrši više puta za svaku glavnu oznaku, (slika 3.5b). Kalibraciona kriva tada se dobija kao optimalni pravac metodom linearne regresije. Pravac

$$y = ax + b \quad (3.18)$$

je optimalan po kriterijumu da je suma kvadrata odstupanja mernih tačaka (x_i, y_i) od pravca minimalna. Pri tome su:

- x pokazivanje etalonskog instrumenta
- y pokazivanje instrumenta koji se kalibrira i
- a, b koeficijenti optimalnog pravca koji treba odrediti.



Slika 3.5. Kalibracija mernog instrumenta: a) bez ponovljenih merenja, b) sa ponovljenim merenjima

Zbog slučajnih uticaja prilikom svakog merenja ispolji se neko odstupanje pokazivanja između etalonskog i ispitivanog instrumenta. Zato se snimljene tačke (x_i, y_i) ne nalaze na optimalnom pravcu, već su od njega udaljene po vertikali za iznos:

$$e_i = y_i - (ax_i + b). \quad (3.19)$$

Iz uslova da je suma kvadrata ovih odstupanja minimalna:

$$S = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2 = \min, \quad (3.20)$$

sledi da je:

$$\frac{\partial S}{\partial a} = \sum_{i=1}^n 2(y_i - ax_i - b)(-x_i) = 0 \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = \sum_{i=1}^n 2(y_i - ax_i - b)(-1) = 0.$$

Rešenje ove dve jednačine daje koeficijente optimalnog pravca:

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} = \bar{y} - a\bar{x}. \quad (3.22)$$

Optimalni kalibracioni pravac minimizira uticaj slučajne greške. Razlika između idealnog i optimalnog pravca rezultat je delovanja sistematske greške.

Treba napomenuti da su jednačine (3.22) za proračun koeficijenata optimalnog pravca izvedene uz pretpostavku da slučajni uticaji deluju samo sa strane ispitivanog instrumenta. Pretpostavi li se da slučajni poremećaji deluju samo na stalniski instrument, tada je razlika pokazivanja ova dva instrumenta:

$$x = \frac{y}{a_1} - \frac{b_1}{a_1}. \quad (3.23)$$

Poređenjem jednačina (3.18) i (3.23) uočava se da važe relacije $a_1 = 1/a$ i $b_1 = -b/a$, tako da koeficijente optimalnog pravca nije teško izračunati i za ovaj slučaj.

3.2.3. Broj merenja i tačnost

Iz dosadašnjeg razmatranja još uvek se ne vidi koliko puta eksperiment treba ponoviti da bi rezultat bio precizniji. Idealno bi bilo eksperiment ponoviti beskonačan broj puta. Kada $n \rightarrow \infty$, na osnovu jednačine (3.8), može se smatrati da je stvarna vrednost merene veličine jednaka srednjoj vrednosti, jer je:

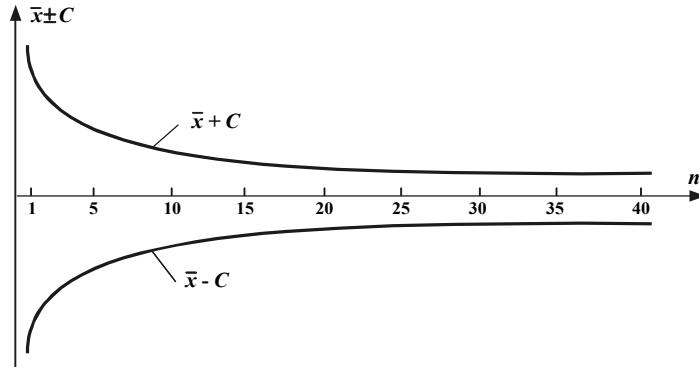
$$x = \bar{x} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i. \quad (3.24)$$

Ako se greška srednje vrednosti $1/n(\sum a_i)$ dovede u vezu sa standardnim odstupanjem σ , tada jednačina (3.24) dobija oblik:

$$x = \bar{x} \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \bar{x} \pm C, \quad (3.25)$$

gde C označava pouzdanost ili standardno odstupanje srednje vrednosti.

Na slici 3.6. prikazana je zavisnost pouzdanosti srednje vrednosti od broja merenja. Nije teško proveriti da je, uz pretpostavku da σ ostaje isto, potrebno obaviti 10 puta veći broj merenja da bi se C smanjilo za svega 3,14 puta. Za



Slika 3.6. Nepouzdanost srednje vrednosti u funkciji broja merenja

precizna merenja uzima se $n > 30$. Za manji broj mernih rezultata proračun pouzdanosti eksperimenta treba izvršiti po Studentovoj raspodeli, koja je opštija od Gausove.

3.2.4. Granična greška i klasa mernog instrumenta

Na raspodelu mernih rezultata oko srednje vrednosti utiču isključivo slučajne greške, ako se pretpostavi da su sistematske greške korigovane kalibracijom postupkom. Međutim, potpuna korekcija sistematskih grešaka je retko moguća. Te preostale sistematske greške uzrokuju da je konačni rezultat merenja uvek nesigurniji nego što pokazuje jednačina (3.24).

Najjednostavniji način da se procene preostale sistematske greške E je povećanje broja merenja ili obavljanje poredbenih merenja. Zbog preostalih sistematskih grešaka granica pouzdanosti srednje vrednosti se proširuje na

$$U = \pm \{ |C| + |E| \} \quad (3.26)$$

i naziva se merna nesigurnost.

Za praktična merenja uvodi se granična greška $G = \Delta x_{\max}$ kao najveće dopušteno apsolutno odstupanje od stvarne (propisane) vrednosti. Za merni uredaj treba da je $U < G$, a obično je $U < 0,2G$. Na osnovu ovih razmatranja definisana je klasa tačnosti mernog instrumenta kao procentni odnos između najveće dopuštene apsolutne greške i kraja skale:

$$K = \frac{G_{\text{nda}}}{x} \cdot 100, \quad (3.27)$$

gde je $x = x_{\max}$ najveće pokazivanje instrumenta (kraj skale), s tim da se on upotrebljava u propisanim ambijentnim uslovima. Klasa instrumenta može biti samo iz standardizovanog niza: 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5 i 5.

3.3. OBRADA REZULTATA POSREDNIH MERENJA

3.3.1. Slučajne greške posrednih merenja

U automatskoj regulaciji često se vrše posredna (indirektna) merenja. Tada se veličina y dobija na osnovu funkcionalne zavisnosti:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (3.28)$$

gde su x_1, x_2, \dots, x_n merni argumenti. Svaki argument meri se više puta radi procene slučajnih faktora – za argument x_i ima se $x_i = \bar{x}_i + \Delta x_i$, gde je \bar{x} verovatna vrednost i Δx_i maksimalna greška sa kojom je određen taj argument. Zbog toga će i veličina y biti odredena sa greškom Δy . Linearizacijom nelinearne jednačine (3.28) pomoću razvoja funkcije f u Tajlorov red u okolini tačke $\bar{x} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$ dobija se:

$$y = \bar{y} + \Delta y = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)_{\bar{x}} \Delta x_i + R, \quad (3.29)$$

gde su: $\Delta x_i = x_i - \bar{x}_i$ slučajna odstupanja x_i od \bar{x}_i , $\bar{y} = f(x_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$ verovatna vrednost zavisne veličine i R ostatak Tajlorovog reda, koji teži nuli, čime se potvrđuje valjanost linearizacije.

Standardno odstupanje za posredna merenja sa nelinearnom zavisnošću između y i mernih argumenata x_1, x_2, \dots, x_n određuje se pomoću jednačine:

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2_{\bar{x}} \sigma_{x_i}^2}. \quad (3.30)$$

Umesto standardnog odstupanja ponekad se uzima relativno standardno odstupanje, $r_y = \sigma_y / \bar{y}$.

U teoriji grešaka posebno dobro je obraden slučaj sa linearnom funkcijom f i međusobno nezavisnim mernim argumentima:

$$y = \sum_{i=1}^n a_i x_i. \quad (3.31)$$

Verovatna vrednost veličine y tada je:

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^n a_i \bar{x}, \quad (3.32)$$

a standardno odstupanje je:

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2 \sigma_{x_i}^2}. \quad (3.33)$$

3.3.2. Sistematske greške posrednih merenja

Ako su direktna merenja veličine x_i ($i=1, 2, \dots, n$) obavljena sa sistematskim greškama Δx_i , tada će one prouzrokovati grešku Δy u veličini y :

$$y + \Delta y = f(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \dots, x_n + \Delta x_n). \quad (3.34)$$

S obzirom da su $\Delta x_i \ll x_i$ i $\Delta y_i \ll y_i$, može se smatrati da su $\Delta x_i = dx_i$ i $\Delta y_i = dy_i$. Razvojem funkcije f u Tajlorov red u okolini tačke (x_1, x_2, \dots, x_n) , dobija se:

$$y + dy = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \frac{\partial f}{\partial x_1} dx_1 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} dx_n + R, \quad (3.35)$$

gde su $\partial f / \partial x_i$ vrednosti parcijalnih izvoda u tački (x_1, x_2, \dots, x_n) i R ostatak, koji teži nuli. Imajući u vidu polaznu jednačinu (3.28), iz (3.35) sledi da je totalni diferencijal:

$$dy = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} dx_i , \quad (3.36)$$

iz čega se vidi da je absolutna greška posrednog merenja Δy jednaka sumi parcijalnih grešaka Δx_i :

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta x_i . \quad (3.37)$$

U slučaju da je funkcija f linearna, absolutna greška jednostavno se računa pomoću:

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n a_i \Delta x_i . \quad (3.38)$$

Očigledno je da je kod posrednih merenja, slično kao i kod direktnih, za otklanjanje sistematskih grešaka kalibracijom potrebno njihovo tačno poznavanje, kako po iznosu tako i po predznaku. S obzirom da su parcijalne greške $(\partial y / \partial x_i) \cdot \Delta x_i$ različitog predznaka, one se na taj način delimično kompenzuju.

3.3.3. Granice nepouzdanosti rezultata posrednih merenja

Preostale sistematske greške (koje nisu kompenzirane kalibracijom) kod direktnih merenja proširuju granicu nepouzdanosti srednje vrednosti, koja se definiše kao merna nesigurnost (3.26). Za indirektno merenu veličinu $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ merna nesigurnost procenjuje se na osnovu jednačine:

$$U_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial y}{\partial x_i} U_{x_i} \right]^2} , \quad (3.39)$$

koja je, što je sasvim razumljivo, slična jednačini za proračun standardnog odstupanja složene veličine (3.33).

U mernoj praksi često nisu poznate merne nesigurnosti U_{x_i} , pa se radije, na osnovu pravila o složenoj sistematskoj grešci, računa granična (maksimalna) greška posrednog merenja $G_y = \Delta y_{\max}$ kao:

$$G_y = \pm \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} G_{x_i} \right| , \quad (3.40)$$

gde su $G_{x_i} = \Delta x_{i \max}$ poznate granične greške pojedinih veličina x_i .

Prema tome, sada je:

$$y = \bar{y} \pm |G_y| . \quad (3.41)$$

Ovo je dosta širok interval, jer formula (3.41) predstavlja najnepovoljniji slučaj granične greške. Zato se obično uzima tzv. statistička (verovatna) granična greška, koja je manja od prethodne, a računa se pomoću formule:

$$G_y^* = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial y}{\partial x_i} G_{x_i} \right]^2}, \quad (3.42)$$

3.4. OBRADA REZULTATA PARAMETARSKIH MERENJA

3.4.1. Parametarska merenja

U tehniči automatske regulacije često se postavlja zadatak da se na osnovu direktnih merenja veličina procesa a_1, a_2, \dots, a_n odrede nepoznati parametri x_1, x_2, \dots, x_n , koji definišu funkcionalnu zavisnost između tih veličina, tj. matematički model procesa. Tipičan primer ovakvih merenja je određivanje temperaturnih koeficijenata α , β i γ električnog otpora nekog materijala na osnovu merenja temperature t i otpora R_t na toj temperaturi:

$$R_t = R_0 + R_0\alpha t + R_0\beta t^2 + R_0\gamma t^3, \quad (3.43)$$

gde je R_0 otpor materijala na 0°C .

Da bi se odredile vrednosti koeficijenata α , β i γ , potrebna su bar tri merenja, tako da se u odnosu na nepoznate koeficijente dobija sistem linearnih jednačina:

$$\begin{aligned} R_{t_1} &= R_0 + R_0\alpha t_1 + R_0\beta t_1^2 + R_0\gamma t_1^3 \\ R_{t_2} &= R_0 + R_0\alpha t_2 + R_0\beta t_2^2 + R_0\gamma t_2^3 \\ R_{t_3} &= R_0 + R_0\alpha t_3 + R_0\beta t_3^2 + R_0\gamma t_3^3. \end{aligned} \quad (3.44)$$

Prilikom merenja R_t i t uvek se čine greške, pa će zato i traženi temperaturni koeficijenti biti određeni sa nekom greškom. Za njen proračun neophodno je izvršiti veći broj merenja nego što je broj nepoznatih koeficijenata.

3.4.2. Greške parametarskih merenja

U opštem slučaju parametarska merenja mogu se predstaviti jednačinom:

$$f_k(x_1, x_2, \dots, x_n, a_{1k}, a_{2k}, \dots, a_{nk}) = a_{rk}, \quad (3.45)$$

gde su:

- x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) nepoznati parametri
- a_{ik} direktno merene veličine procesa
- $k = 1, 2, \dots, m$ broj ponovljenih merenja.

U praktičnim merenjima opšta jednačina (3.45) najčešće se svodi na sistem linearnih jednačina:

$$a_{1k}x_1 + a_{2k}x_2 + \dots + a_{nk}x_n + a_{n+1,k} = 0, \quad k = 1, 2, \dots, m. \quad (3.46)$$

Uvrštavanjem vrednosti izmerenih veličina a_{ik} , moguće je doći do rešenja. Međutim, kako je svako to merenje obavljeno sa nekom greškom, desna strana jednačina neće biti 0, pa se umesto (3.46) realno dobija modifikovan sistem:

$$a_{1k}x_1 + a_{2k}x_2 + \dots + a_{nk}x_n + a_{n+1,k} = \delta_k, \quad k = 1, 2, \dots, m, \quad (3.47)$$

gde δ_k predstavlja nepodudarnost merenja.

Zadatak se sada svodi na određivanje parametara x_i tako da suma kvadrata mernih nepodudarnosti bude minimalna:

$$S = \sum_{k=1}^m \delta_k^2 = \sum_{k=1}^m (a_{1k}x_1 + a_{2k}x_2 + \dots + a_{nk}x_n + a_{n+1,k})^2 = \min. \quad (3.48)$$

Minimum se traži iz uslova da parcijalni izvodi po svim parametrima budu jednaki nuli, odnosno da:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial x_1} &= 2 \sum_{k=1}^m (a_{1k}x_1 + a_{2k}x_2 + \dots + a_{nk}x_n + a_{n+1,k})a_{1k} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial x_2} &= 2 \sum_{k=1}^m (a_{1k}x_1 + a_{2k}x_2 + \dots + a_{nk}x_n + a_{n+1,k})a_{2k} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial x_n} &= 2 \sum_{k=1}^m (a_{1k}x_1 + a_{2k}x_2 + \dots + a_{nk}x_n + a_{n+1,k})a_{nk} = 0. \end{aligned} \quad (3.49)$$

Dobijeni sistem od n jednačina i n nepoznatih rešava se uobičajenim postupcima. Kao rezultat dobijaju se srednje vrednosti parametara:

$$x_i = \frac{D_{xi}}{D}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3.50)$$

gde je D determinanta sistema, a D_{xi} determinanta koja se dobija kada se u determinanti sistema i -ta kolona zameni kolonom koju čine nehomogeni delovi jednačina (3.49).

Tačnost određivanja parametara x_i opisanim metodom reprezentuje standardno odstupanje:

$$\sigma(\bar{x}_i) = \sqrt{\frac{1}{m-n} \sum_{i=1}^m \delta_k^2 \frac{A_{ii}}{D}}, \quad (3.51)$$

gde je A_{ii} algebarski komplement i-tog dijagonalnog elementa determinante sistema. Pri proračunu se uzima u obzir osrednjavanje rezultata merenja zahvaljujući većem broju merenja m od broja n nepoznatih parametara.

PITANJA I ZADACI

- 1) Merne greške senzora pritiska raspodeljene su po normalnom zakonu, a sastoje se od sistematske komponente, koja iznosi $0,12 \text{ MPa}$ i slučajne komponente, čije je srednje kvadratno odstupanje $\sigma = \pm 0,08 \text{ MPa}$. Odrediti verovatnoću da merna greška po apsolutnoj vrednosti ne bude veća od $0,15 \text{ MPa}$.

Rešenje: Primenom jednačine (3.16) i tablične vrednosti integrala (3.17), dobija se $P = 0,6458$.

- 2) Senzor temperature meri temperaturu sa slučajnom greškom. Parametri normalne raspodele srednja vrednost $\bar{T} = -10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ i srednja kvadratna greška $\sigma^2 = 144 (\text{ }^{\circ}\text{C})^2$. Odrediti standardno odstupanje rezultata merenja σ i verovatnu grešku ρ , tj. verovatnoću $P(\bar{T} - \rho < T < \bar{T} + \rho) = 0,5$.

Rešenje: Standardno odstupanje $\sigma = 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$, a verovatna greška $\rho = 0,68\sigma$ sledi iz integrala

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\rho}^{\rho} e^{-z^2/2} dz = 0,5.$$

- 3) U 46 uzastopnih merenja temperature pomoću optičkog pirometra dobijeni su sledeći podaci:

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	925	950	975	1 000	1 025	1 050
Broj merenja	1	9	6	18	10	2

Odrediti srednju vrednost, standardno odstupanje i pouzdanost srednje vrednosti (standardno odstupanje srednje vrednosti).

Rešenje: $\bar{T} \approx 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\sigma = 31 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $C = 4,57 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

- 4) Analizom je utvrđeno da vek trajanja katodne cevi za televizore ima normalnu raspodelu, da je srednji vek trajanja 5 godina i da je standardno odstupanje 500 dana. Proizvodač cevi daje garanciju od jedne godine. Odrediti procenat zamenjenih cevi u garantnom roku. Ako bi proizvodač htio da produži garantni rok na dve godine, s tim da procenat zamene ostane isti, koliki bi trebalo da bude srednji vek trajanja?

Rešenje: $P = 0,18\%$, $\sigma = 371$ dan.

- 5) Odrediti standardno odstupanje veličine y , koja je linearno zavisna od veličine x , tj. $y = ax + b$, gde su a i b konstante.

Rešenje: Pošto se radi o posrednom merenju, dobija se $\sigma_y = a\sigma_x$.

- 6) Za jednosmerni električni motor, koji je upravljan strujom armature, koeficijent prenosa određuje se kao $K\omega/U$, gde je ω [o/min] ugaona brzina rotora i U [V] napon na armaturnom krugu. Ugaona brzina meri se tahogeneratorom, a napon voltmetrom. Merenje se provodi u stacionarnom stanju brzine $\omega = 4000$ o/min i napona $U = 100$ V pri čemu su prisutne slučajne greške procenjene standardnim odstupanjima: $\sigma_\omega = 400$ o/min, $\sigma_U = 5$ V. Odrediti standardno odstupanje koeficijenta prenosa σ_K .

Rešenje: $\sigma_K = 4,47$ o/min·V.

- 7) Eksperimentalno je izmerena zavisnost termoelektromotorne sile za termoelement kromel/konstan:

T	$^{\circ}\text{C}$	300	400	500	600	700	800
EMS	V	21	28.6	37.2	45.2	53	61

Odrediti linearnu zavisnost $T = aE + b$ metodom linearne regresije.

Rešenje: $a = 12$ i $b = 58$.

LITERATURA

1. M. Brezinščak: *Merenje i računanje u tehnički i znanosti*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1966.
2. A.S. Moris: *Principles of measurement*, Prentice Hall, 1988.
3. H. Šenk: *Teorija inžinernog eksperimenta*, (prevod sa engleskog), Mir, Moskva, 1972.
4. D. Stanković: *Fizičko-tehnička merenja*, Naučna knjiga, Beograd, 1987.
5. P.P. Ornatskij: *Teoretičeskie osnovy informacionno-izmiritel'noj tehniki*, Višča škola, Kijev, 1983.
6. N.D. Kuznecov, V.S. Čistjakov: *Sbornik zadač i voprosov po teplotehničeskim izmerenijam i priboram*, Energiya, Moskva, 1978.
7. A.P. Voščin, A.Z. Ivanov: *Učebnoe posobie po kursam Vvedenie v special'nost i Metody samostajatel'nyh занятий - Metody obrabotki eksperimental'nyh dannyh*, MEI, Moskva, 1977.
8. V. Bego: *Merenja u elektrotehnici*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1988.
9. *Guide to the expression of uncertainty in measurement*, ISO, 1993.
10. *Principi merenja*: <http://faculty.vassar.edu/lowry/PDF/c1p1.pdf>
11. *Statistička obrada rezultata*: termini, metode, proračun: www.irtools.com/fts/fastening_statistical.html
12. *Indirektna merenja*: <http://www.shokhirev.com/nikolai/abc/indirect/ABCindirect.html>

4

PREZENTACIJA REZULTATA EKSPERIMENTA

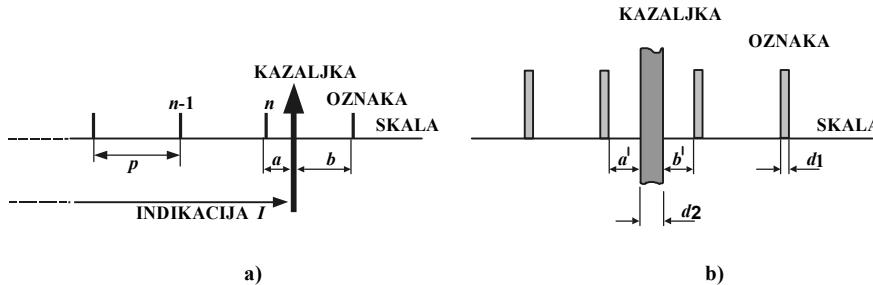
4.1. POKAZIVANJE INSTRUMENTA

Način pokazivanja rezultata na instrumentu zavisi od tipa instrumenta. Principijelno, razlikuje se pokazivanje rezultata na analognim i digitalnim instrumentima.

Analogni instrumenti, koji se u automatskoj regulaciji primenjuju u funkciji monitoringa, imaju kazaljku čiji položaj odgovara trenutnoj vrednosti merene veličine. Kazaljka može biti: čvrsta, tečna i optička. Problem tačnog očitanja rezultata na analognim instrumentima javlja se onda kada je položaj kazaljke između oznaka na skali (slika 4.1a). Pokazivanje (indikacija) instrumenta može se predstaviti izrazom:

$$I = np + \frac{a}{a+b}p, \quad (4.1)$$

gde su: p interval osnovne podele na skali, n broj punih intervala od početka skale do položaja kazaljke, a i b delovi intervala na kojem se kazaljka nalazi.



Slika 4.1. Pokazivanje instrumenta: a) kazaljka između oznaka, b) stvarno očitanje

Skala sa gustim oznakama nije preporučljiva, jer je tada teško očitati broj n . Kada je $a \ll b$ ili $b \ll a$, poteškoće u očitanju nastaju zbog toga što i kazaljka i oznaka imaju određenu debljinu. U tom slučaju obično se očitavaju $a' < a$, $b' < b$ i $p' < p$ (slika 4.1b). Prilikom konstrukcije indikacionog instrumenta traži se najpovoljniji odnos d_1/p i d_2/p kako bi se postigla što veća tačnost očitanja, koja odgovara minimumu:

$$\left| \frac{a'}{b'} - \frac{a}{b} \right| = \min. \quad (4.2.)$$

Najbolje očitanje na laboratorijskim instrumentima se postiže kada je $p = 1 - 2 \text{ mm}$ i $d_1 = d_2 = 0,1 - 0,12 \text{ mm}$. Za pogonske instrumente povoljniji su veći iznosi zbog potrebe da se očitanje obavi sa većeg rastojanja.

Sabirni instrumenti (integratori) jesu posebna klasa instrumenata, čije pokazivanje odgovara kumulativnoj vrednosti merene veličine u nekom vremenskom intervalu:

$$I = \int_{t_0}^{t_1} y \, dt. \quad (4.3)$$

Klasični integratori imaju elektromehaničke brojače, a savremeni elektronske brojače, sa optičkim pokazivanjem cifara.

Digitalni instrumenti najčešće imaju displej sa n digita (dekadnih mesta), a svaki digit može da poprими bilo koju cifru od 0 do 9. Ako instrument ima $n \frac{1}{2}$ digita, tada digit sa najvišim dekadnim mestom obično može da pokazuje samo 0 ili 1, a na ostalim mestima mogu biti cifre od 0 do 9.

4.2. TABELARNI PRIKAZ REZULTATA

Rezultati merenja predstavljaju se u cifarskoj, grafičkoj i zvučnoj formi. Način predstavljanja važan je ne samo za analizu nego i za kasniju upotrebu mernih podataka. Sastavni deo svakog inžinjerskog eksperimenta je izveštaj, u kome su rezultati prezentirani tabelarno, grafički i kombinovano.

POMERAJ $x[\text{mm}]$	JAČINA STRUJE $I [\text{mA}]$	INDUKTANSA $\omega L[\text{k}\Omega]$	OTPOR $R [\text{k}\Omega]$	IMPEDANSA $Z [\text{k}\Omega]$
0	47,1	2,3	1,4	2,7
20	50,2	2,0	1,4	2,5
40	53,1	1,6	1,4	2,2
60	62,4	1,2	1,4	1,9
80	70,5	0,9	1,4	1,8
100	75,8	0,8	1,4	1,6
MAKSIMALNA GREŠKA [%]	$\pm 0,5$	$\pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,001$

Tabela 4.1. Tabela izmerenih vrednosti pomeraja, očitane struje, te izračunatih vrednosti otpora, induktanse i ukupne impedanse

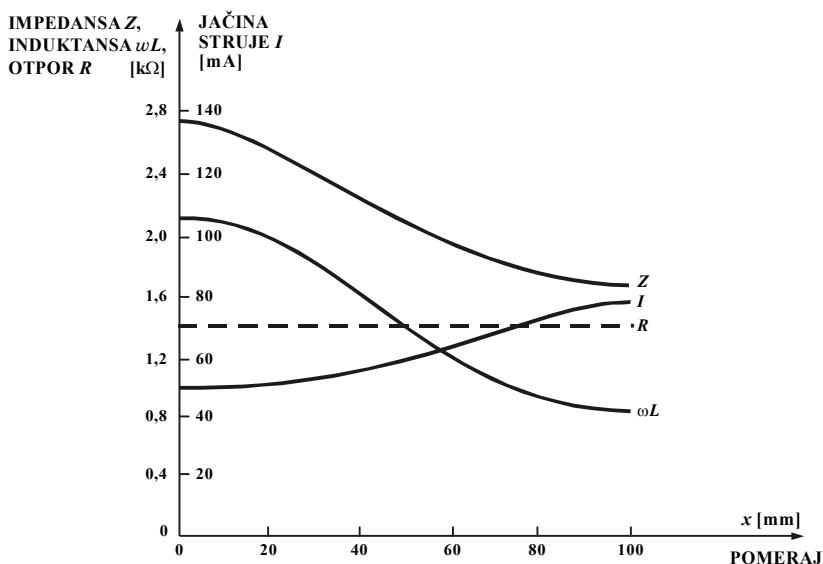
Izmerene vrednosti, koje su neposredni rezultat eksperimenta upisuju se u tabele. Osim osnovnih podataka, u tabele se unose i rezultati sračunavanja obavljenih nad tim podacima. Za ilustraciju tabelarno su prikazani rezultati merenja mehaničkog pomeraja x pomoću induktivnog senzora pomaka (solenoida), (tabela 4.1). Ovaj primer pokazuje koje zahteve treba da ispuni svaka tabela:

- tabela treba da ima naslov ili potpis gde se objašnjava koje podatke tabela sadrži;

- svaka kolona treba da se odnosi samo na jednu izmerenu ili izračunatu veličinu;
- svaka kolona treba da ima svoj naslov koji identificira veličine u toj koloni;
- na vrhu kolone treba da budu označene jedinice za veličine u toj koloni;
- tabela, po mogućnosti, treba da sadrži i vrednosti greški za sve veličine.

4.3. GRAFIČKA PREZENTACIJA REZULTATA

Rezultate inžinjerskog eksperimenta često je najpovoljnije predstaviti u grafičkom obliku. Mada graf gubi egzaktnost prezentacije rezultata u odnosu na tabelu, njegove prednosti su u tome što daje kompaktniju i jasniju predstavu o skupu podataka. Za ilustraciju, na slici 4.2. prikazane su krive koje pokazuju zavisnost jačine struje I , otpora R , induktanse ωL i impedanse $Z = (R^2 + \omega^2 L^2)^{1/2}$ od pomeraja jezgra x kod induktivnog senzora pomeraja. Krive su nacrtane prema podacima iz tabele 4.1. Konstrukcija grafa počinje markiranjem tačaka koje odgovaraju vrednostima struje, otpora, induktivnog otpora i impedanse, a zatim se ove tačke povezuju kontinualnom krivom.



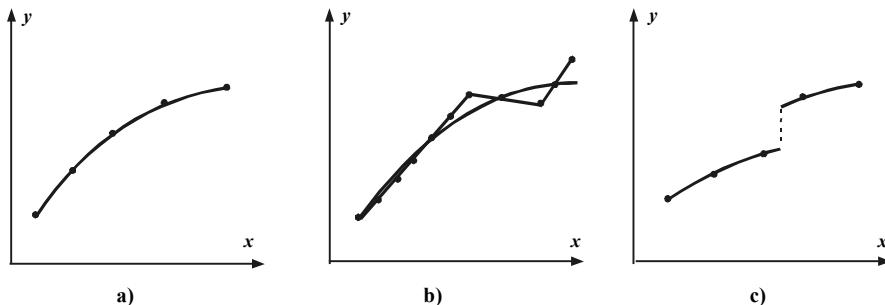
Slika 4.2. Zavisnost struje, otpora, induktanse i impedanse od pomeraja jezgra kod induktivnog senzora pomeraja

Za crtanje grafa važe sledeća pravila:

- tekstom ispod grafa objašnjava se koji su podaci predstavljeni na grafu;
- ose koordinatnog sistema u kojem je graf nacrtan moraju biti označene da bi bilo jasno koja veličina i u kojim jedinicama je pridružena kojoj osi;
- broj oznaka duž svake ose ne treba da bude prevelik; obično je dovoljno naneti pet podeoka u razmeri koja omogućava da graf ne bude niti previše razvučen niti sabijen;
- graf ne treba produžavati preko granica određenih minimalnom i maksimalnom izmerenom vrednosti.

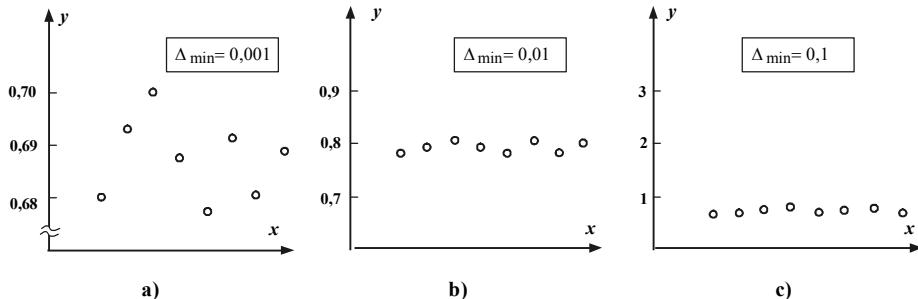
Ako je neprekidnost izučavanog procesa očigledna, tj. ako se veličine procesa menjaju postupno, tada će funkcionalna zavisnost među promenljivim veličinama na grafu biti reprezentirana kontinualnom krivom. Takva je, na primer, promena termonapona termoelementa u funkciji temperature, (slika 4.3a). Odstupanja tačaka od te krive nastaju zbog grešaka merenja. Što je greška manja, ova odstupanja će biti manja, (slika 4.3b).

Medutim, za procese koji su praćeni brzim ili skokovitim promenama nekih veličina može se očekivati prekid, izrazit minimum ili izrazit maksimum. Takva je, na primer, promena volumena nekih materijala u trenucima faznih prelaza (kristalizacija tečnosti), (slika 4.3c).



Slika 4.3. Crtanje grafa: a) kontinualna kriva, b) odstupanja od krive, c) skokovita promena

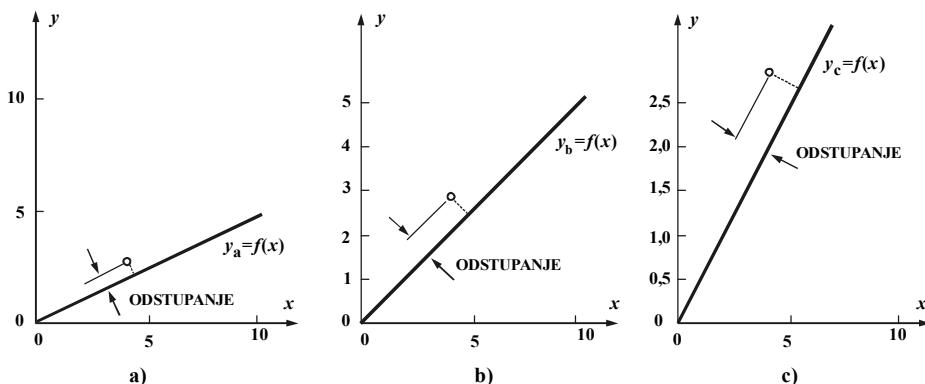
Na osnovu izgleda krive donose se zaključci o funkcionalnoj zavisnosti mernih veličina, koja može biti linearna, kvadratna, logaritamska, itd. Upotreba grafika, slično kao i mernih instrumenata, povezana je sa izvesnom neodređenošću. Na primer, u eksperimentu u kome se primenjuje neki instrument sa odgovarajućom kalibracionom krivom, greška koja će se pripisati instrumentu rezultat je kako netačnog pokazivanja tog instrumenta tako i pogrešno očitanih podataka sa kalibracione krive. Budući da je svaki graf konstruisan sa određenim greškama, njegovom primenom za nalaženje pripadnih odrezačaka na osama, koeficijenata nagiba pravca i sličnih konstanti stvaraće se dodatne greške. Zato je važno sagledati puteve minimiziranja grešaka prilikom konstrukcije grafa, grešaka očitanja podataka sa grafa kao i grešaka proračuna na osnovu grafa.



Slika 4.4. Zavisnost y od x za različite razmere na osi x : a) najmanji interval manji od verovatne greške, b) najmanji interval jednak verovatnoj grešci, c) najmanji interval veći od verovatne greške

Prvi princip koji važi za konstrukciju grafa je da minimalni interval koji je označen na osi treba približno da odgovara verovatnoj grešci za veličinu koja je pridružena toj osi. Verovatna greška odgovara grešci sa verovatnoćom pojave $p=0,5$, tj. verovatnoća pojave grešaka većih od nje jednaka je verovatnoći pojave grešaka koje su od nje manje. Na slici 4.4. nacrtana su tri moguća odnosa razmere na osi y i pripadne verovatne greške, koja je 0,01. U prvom slučaju, (slika 4.4a), najmanji interval na y osi je 0,001, i deset puta je manji od verovatne greške. Zbog razbacanosti rezultata teško je ustanoviti kakva je funkcionalna zavisnost između y i x . Na slici 4.4c razmera na y osi je takva da je najmanji interval 0,1 deset puta veći od verovatne greške. Kriva se ovde lako konstruiše, ali je zbog izabrane razmere svako slučajno odstupanje nemoguće uočiti, te se ne može izračunati nikakav pokazatelj tačnosti. U tom smislu najpovoljniji odnos razmere i verovatne greške prikazan je na slići 4.4b.

Drugi princip konstruisanja grafa sastoji se u pokušaju da se merni podaci predstave u obliku pravca. Razlozi su u jednostavnosti proračuna matematičke forme pravca i odstupanja od pravca, te proračuna vezanih za ekstrapolaciju, statističku obradu itd. Poželjno je, u načelu, da pravac ima koeficijent nagiba jednak jedinici, pa se u skladu s tim bira razmara po y . U praksi je često bitno da se što jasnije uoče i odrede odstupanja od pravca, zbog čega je povoljnije odabratи što veću razmeru po ordinati, slika 4.5. Funkcionalne zavisnosti koje nisu linearne često je moguće



Slika 4.5. Uticaj razmara po osi y na odstupanja od pravca. Najuočljivije odstupanje je od pravca $y_c = f(x)$

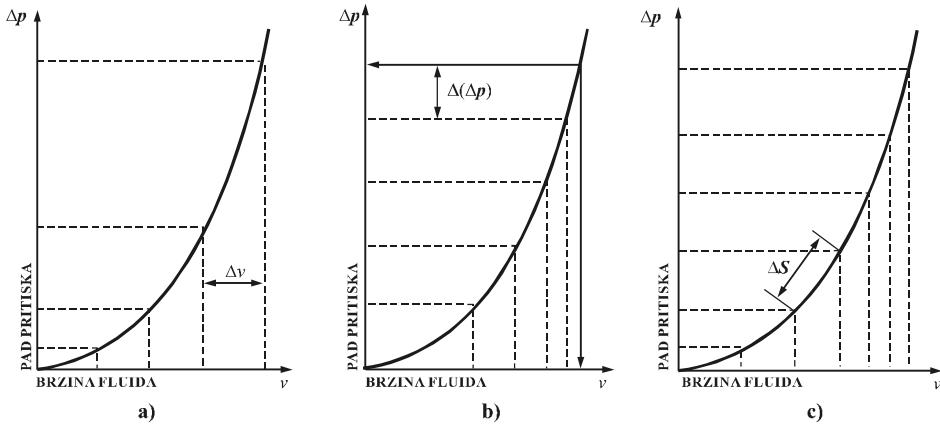
jednostavnim transformacijama prikazati u obliku pravca. Koordinatni sistem u komе pravac biti prikazan zavisi od upotrebljene transformacije (tabela 4.2).

FUNKCIJA	ORDINATA	APSCISA	KOORDINATNI SISTEM	GRAF
$y=ax+b$	y	x	lin-lin	
$y=ax^b$	$\log y$	$\log x$	log-log	
$y=ax^{b+c}$	$\log(y-c)$	$\log x$	log-log	
$y=a e^{bx}$	$\log y$	x	log-lin	
$y=\frac{1}{ax+b}$	$\frac{1}{y}$	x	inverzno-lin	

Tabela 4.2. Transformacija osnovnih funkcionalnih zavisnosti u pravac

Treći princip koji treba poštovati prilikom konstrukcije grafa odnosi se na određivanje intervala među eksperimentalnim podacima. Traži se, naime, da je tačnost podataka jednaka u svakom delu grafa, te da su podaci ravnomerno raspoređeni na grafu.

O prvom zahtevu retko se vodi računa, mada je izvesno da će kod mnogih sistema tačnost merenja biti manja za manje vrednosti opterećenja ili snage. Važi opšte pravilo da u intervalima gde se sumnja u tačnost podataka treba povećati broj merenja. Za koliko – stvar je procene i iskustva eksperimentatora. Drugi zahtev nije jednostavno ispuniti kada između mernih podataka postoji nelinearna funkcionalna zavisnost. Na primer, pad pritiska na suženju cevovoda proporcionalan je kvadratu brzine fluida $\Delta p = kv^2$. Ako su tokom eksperimenta podaci mereni za jednakе intervale promene brzine Δv , dobija se graf kao na slici 4.6a. Vidi se da je u oblasti velikih brzina broj tačaka nedovoljan. U suprotnom slučaju, kada se merni podaci uzimaju u jednakim intervalima promene pada pritiska $\Delta(\Delta p)$ nedovoljan je broj tačaka za male vrednosti brzine, slika 4.6b. Najbolji graf u smislu ravnomerne rasporedenosti podataka dobija se tako što se podaci uzimaju u jednakim intervalima duž krive, (slika 4.6c).



Slika 4.6. Crtanje nelinearne zavisnosti: a) jednaki razmaci po ulaznoj veličini, jednaki razmaci po izlaznoj veličini, c) jednaci razmaci po krivoj

PITANJA I ZADACI

- 1) Elektromehaničko brojilo meri potrošnju električne energije W kao integrator snage P u vremenu od t_0 do t_1 , pri čemu je snaga proporcionalna brzini vrtnje brojila $P = k\omega$. Izvesti izraz za očitanje potrošnje.
Rešenje: $W = \int_{t_0}^{t_1} P dt = \int_{t_0}^{t_1} k\omega dt = \int_{t_0}^{t_1} k(d\alpha/dt)dt = k(\alpha_1 - \alpha_0) = k2\pi N$,
gde je N broj punih okretaja brojila u posmatranom vremenu.
- 2) Objasniti principe crtanja grafa na osnovu mernih podataka.
- 3) Eksperimentalno je ustanovljeno da se veličina x menja po eksponencijalnom zakonu $y = 10x^{1,73}$. Ako se izvrši logaritmovanje, zavisnost je moguće predstaviti kao pravac u log–log koordinatnom sistemu: odsečak na ordinati je $\log a$, a koeficijent pravca je b . Na sličan način mogu se predstaviti u obliku pravca sledeće funkcije: $y = 10x^{1,73} + 5$, $y = 10e^{5x}$ i $y = 10 \cdot 2^{3x}$.

LITERATURA

1. H. Šenk: *Teorija inžinernog eksperimenta* (prevod sa engl.), Mir, Moskva, 1972.
2. A.P. Voščina, A.Z. Ivanov: *Učebnoe posobie po kursam Vvedenie v special'nost' i Metody samostajatel'nyh занятий - Metody obrabotki eksperimental'nyh dannyh*, MEI, Moskva, 1977.
3. *Uputstvo za tehničku obradu diplomskog rada*: <http://www.vets.edu.yu/elektrometrologija/diplomski.htm>
4. *Guidelines for experiment design*: <http://www.cs.colostate.edu/~chowe/EMAI/ch3/node15.html>
5. *The graphical presentatin of data straight line graphs*: www.cpes.sussex.ac.uk./hc/graphs2002.pdf

5

REGISTRACIJA PODATAKA

5.1. REGISTRACIJA MERNE INFORMACIJE

Skup podataka koji se odnose na vrednosti merenih veličina dobijenih u toku merenja je merna informacija. Mernu informaciju kao rezultat inžinjerskog eksperimenta potrebno je registrovati u pogodnoj formi radi analize, obrade rezultata ili preduzimanja određenih akcija. U automatskom upravljanju informacija o merenju ima tri oblika:

- operativni oblik, sledi tok merenja i primenjuje se neposredno (on-line) u upravljanju objektom, u praćenju dogadaja na objektu, u promeni režima rada objekta, u promeni algoritma merenja itd.;
- statistički oblik, služi za statističku obradu i uopštavanje mernih rezultata;
- dokumentacioni oblik, upotrebljava se za formiranje trajnih dokumenata o merenju, odnosno o upravljanju u celini.

Dokument o merenju je skup cifarskih, slovnih, znakovnih ili grafičkih informacija o merenju pohranjenih na nekom nosiocu (papir, film, magnetna traka) radi kasnije višekratne upotrebe. Razlikuju se neprekidni i pojedinačni dokumenti. Neprekidni dokumenti su na trakama koje su namotane na rolne, a pojedinačni su segmenti neprekidnih dokumenata u obliku formulara, tabele, grafika, fotografije itd.

Efikasnost delovanja operatora na sistem automatskog upravljanja zavisi od njegovih psihofizičkih osobina i upotrebljenog registracionog uređaja. Zato je prilikom izbora metoda i sredstava registracije neophodno utvrditi koja su sredstva i u kojim situacijama najpogodnija. To znači da treba odrediti: broj neophodnih uređaja za praćenje dinamičkih promena u objektu, nomenklaturu uređaja i njihov raspored na komandnom pultu, te formu, razmer i boju znakova na uređajima. Nužno je takođe uskladiti rad sistema sa mogućnostima delovanja operatora po primitku informacije, tako što će se:

- izabrati informacije koje dovoljno dobro karakterišu ponašanje upravljanog objekta;
- uskladiti protok informacija s realnim mogućnostima operatora kako u pogledu prijema tako i u pogledu obrade tih informacija;
- odrediti način i sredstva za predstavljanje informacija;
- razraditi opštu strukturu registracionih uređaja;

- izabrati tip skale i mnemoničkih oznaka, razmer, boje, intenzitet osvetljenja skale itd.

Kod indikacionih uređaja posebno je važno uskladivanje protoka informacija C_1 sa propusnom sposobnošću čoveka. Protok informacija koji dolazi do operatora je

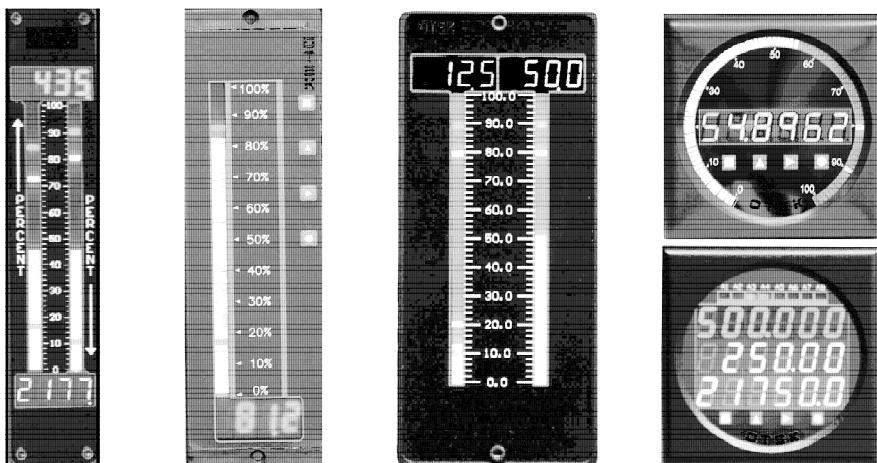
$$C_1 = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^n I_i, \quad (5.1)$$

gde su: I_i količina informacije koja se predaje operatoru i-tim uredajem, t vremenski period u kojem traje predaja informacija i n broj uredaja čija pokazivanja operator treba istovremeno da prati. Propusna sposobnost čoveka zavisi od mnogih faktora a kreće se najviše $40 - 50$ bit/s. Kod pojedinačnih instrumenata obično je zadovoljeno $C_1 < C_{1\text{doz}}$, ali je informacija sa jednog instrumenta nedovoljna za ocenu stanja objekta.

5.2. INDIKACIONI INSTRUMENTI

Registracija podataka je važna etapa svakog inžinjerskog eksperimenta. U nekim slučajevima dovoljna je samo vizuelna indikacija signala na izlazu mernog instrumenta. U drugim slučajevima potrebno je trajno zapisivanje podataka kako bi se kasnije mogla obaviti njihova analiza i obrada. Postoji veliki izbor različitih tehnika i instrumenata za registraciju podataka (slika 5.1.).

Indikacioni instrumenti koji služe samo za indikaciju (pokazivanje) jesu različiti analogni ili digitalni „metri“: ampermetri, voltmetri, termometri, manometri, oftametri i mnogi drugi. Analogni služe za kontinualnu indikaciju merene veličine. U sistemima automatskog upravljanja izlazni signal sa mernog instrumenta najčešće je električni, pa je indikacioni instrument u suštini avometar (indukcioni, elektrodinamički, elektrostatički, sa pomičnim svitkom ili sa pomičnim magnetom), na čijoj su

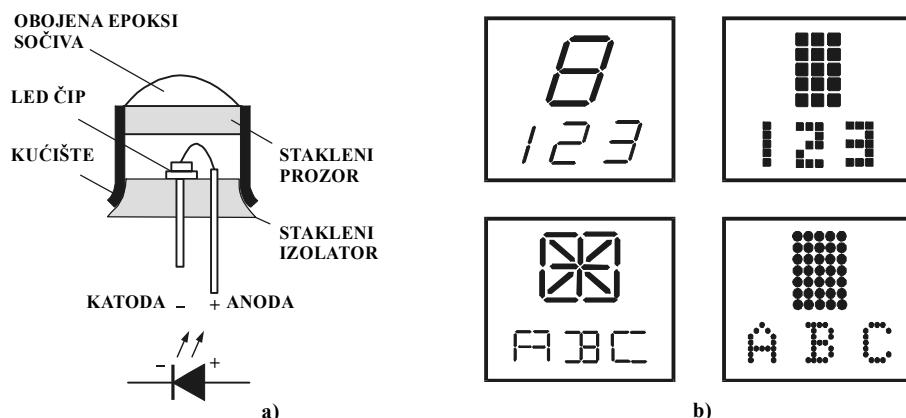


Slika 5.1. Indikatori i displeji

skali označene jedinice merene fizikalne veličine. Tačnost mu je $\pm 0,1 - 3\%$ mernog opsega. Za registraciju brzih procesa upotrebljava se osciloskop, čija je tačnost obično $\pm 1 - 10\%$. Digitalni indikacioni instrumenti imaju digitalni displej i tačnost $\pm 0,05 - 2\%$ mernog opsega.

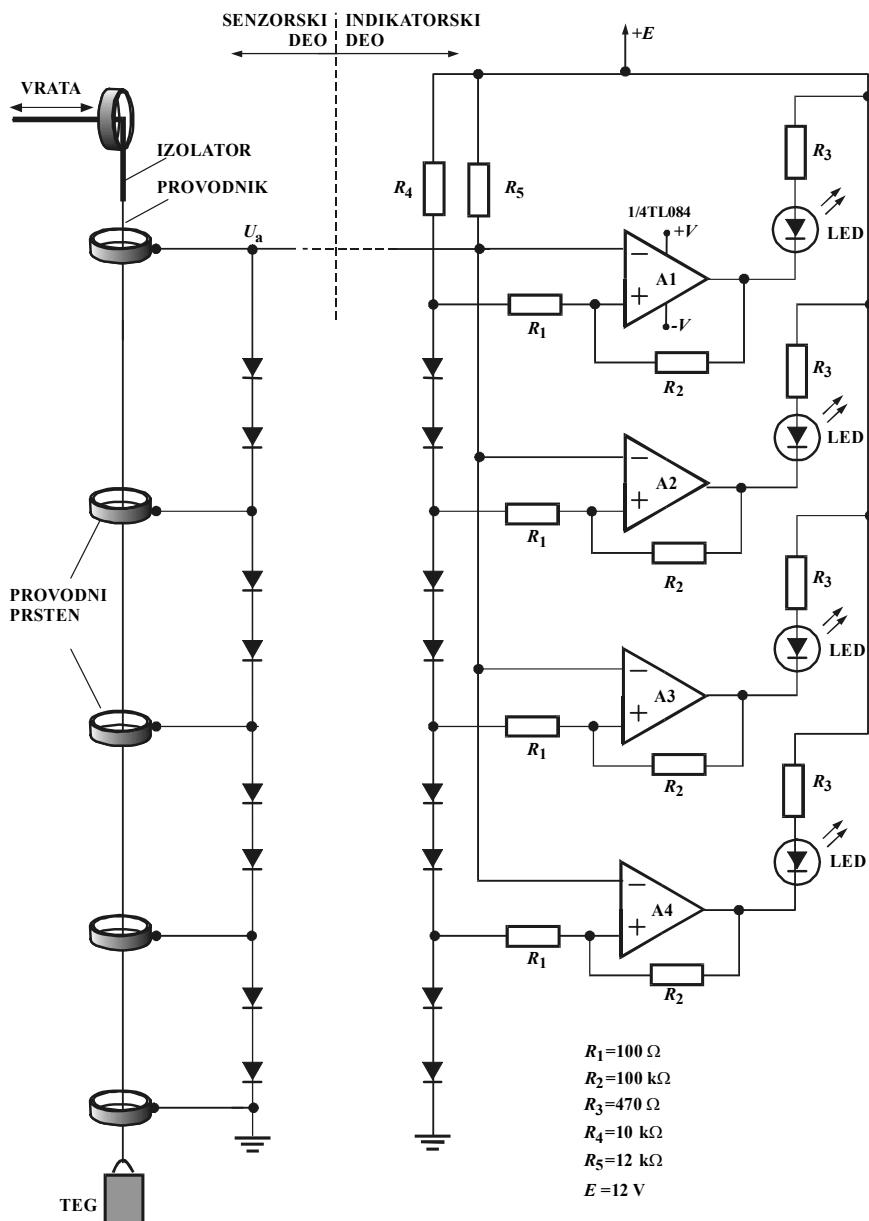
Posebna klasa indikacionih instrumenata namenjena je za praćenje rada složenih objekata. Informacija koju oni daju je kvalitativnog karaktera jer indicira neku opštu karakteristiku sistema. Takav je, na primer, indikator horizonta u avionu, koji daje ukupne informacije o visini i položaju aviona, o pravcu i ugлу njegovog kretanja, na osnovu čega pilot ima sliku aviona u prostoru.

Savremeni digitalni displeji prave se na bazi LED-dioda ili tečnih kristala. Dioda koja emitiše svetlost ili LED-dioda (Light Emitting Diode) primenjuje se za vizuelnu indikaciju naponskog signala sa dva stanja. To je luminescentni element koji emitiše ultraljubičasto, vidljivo ili infracrveno svetlo kao rezultat elektronske eksitacije materijala. Ljudsko oko reaguje na svetlost talasne dužine $0,39 - 0,77 \mu\text{m}$. Maksimalna osetljivost oka je na zelenu svetlost ($\lambda = 0,555 \mu\text{m}$), nešto slabija na žutu, dok je vrlo slaba osetljivost oka na crvenu i ljubičastu svetlost. LED-diode prave se od galijum-fosfida, galijum-arsenidfosfida, cink-sulfida itd. Jedna LED-dioda sadrži LED-čip, tj. *pn*-spoј u kojem se konvertuje struja u svetlost i plastično sočivo, koje je najčešće obojeno radi pojačavanja optičke filtracije i kontrasta (slika 5.2a). Napajanje je od $1,5 - 2 \text{ V}$, struja diode oko 5 mA , tj. potrošnja je $7 - 10 \text{ mW}$. Osnovni formati LED-disплејa sastavljeni su od pojedinačnih dioda (slika 5.2b).



Slika 5.2. LED-dioda: a) realizacija, b) formati displeja

Grafički indikatori sastoje se od više svetlećih elemenata grupisanih tako da predstavljaju određeni znak ili sliku. Na slici 5.3. prikazan je grafički indikator otvorenosti vrata izgrađen na bazi LED-dioda. Žica sa tegom i četiri para silicijumskih dioda predstavlja senzor otvorenosti vrata. Grafička inidikacija može se kalibrirati: zatvoreno, $1/4$, $1/2$, $3/4$, otvoreno. Dodavanjem novih dioda i odgovarajućih vodica, broj indikacija može da bude i veći od četiri. LED-diode mogu se aranžirati lučno, horizontalno ili vertikalno, kako bi grafička slika najbolje odgovarala načinu otvaranja vrata.



Slika 5.3. Grafički displej otvorenosti vrata

Kada su vrata zatvorena, provodna žica kratko spaja sve diode, pa je napon na izlazu senzora $U_a = 0$. Kada su vrata delimično otvorena, izolovani deo žice dolazi između dve vodice, tako da odgovarajući par dioda više nije kratko prespojen, one vode i na njihovim krajevima je ukupni pad napona $1,4\text{ V}$. Sa daljim otvaranjem vrata, sve više dioda uključuje se u kolo. Kada su vrata otvorena, ukupni pad napona na nizu dioda senzora je $5,6\text{ V}$. Treba napomenuti da se, u principu, pojedinoj sekciji

može pridružiti i samo jedna dioda sa probojnim naponom od 0,7 V. Međutim, dve diode u seriji omogućavaju veći naponski inkrement, koji je manje osetljiv na šumove, a osim toga, celo kolo se lakše podešava.

Desni deo šeme predstavlja indikator položaja vrata. Indikator je kombinacija komparatora napona i LED-dioda. Referentni napon na neinvertirajućem ulazu komparatora realizuje se uz pomoć identičnog niza dioda kao kod senzora. Na invertirajući ulaz komparatora dovodi se napon sa senzora. Kada su vrata zatvorena, na – ulazu svakog od četiri komparatora napon je $U_a = 0$, i manji je od referentnog napona na + ulazima, te su izlazni naponi na pojačavačima pozitivni – LED-diode zakočene i ne svetle. Neka su vrata sada otvorena toliko da izolovani deo žice prespaja gornji par dioda senzora, koje zbog toga vode i na izlazu iz senzora je napon $U_a = 1,4$ V. Napon $U_a = 1,4$ V veći je od napona na + ulazu komparatora A4 (pri čemu bi prisustvo jedne dodatne diode na dnu senzorskog niza potvrdilo ovu razliku), pa je izlazni napon negativan – odgovarajuća LED-dioda vodi i svetli. Slična situacija ponavlja se sa narednim komparatorom kada su vrata otvorena toliko da i sledeći par dioda senzora vodi. Otpornički delitelj napona sa otpornicima R_1 i R_2 formira malu pozitivnu povratnu spregu koja obezbeđuje brže preključivanje i sprečava oscilacije komparatora. Za realizaciju komparatora može se upotrebiti integrisano kolo sa četiri operaciona pojačavača TL074.

Na slici 5.4 LED-displej formata 8×96 kod kojeg se upis teksta za prikazivanje obavlja preko AT-PC/2 tastature i RF komunikacije.



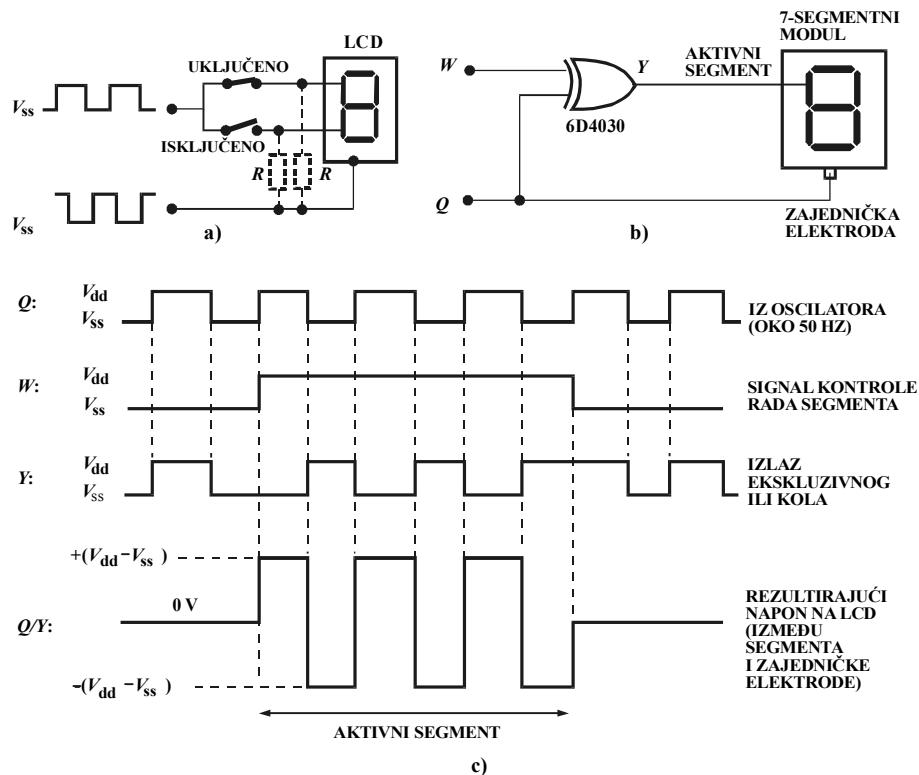
Slika 5.4. Bežični LED displej

LCD-displeji (*Liquid Crystal Displays*) omogućavaju prikazivanje složenog teksta i grafike. Za tečne kristale karakteristična je urednost molekula okomito na elektrode i u tom smeru svetlost može da prode. Na mestima gde električno polje dovodi do poremećaja u orientaciji molekula svetlost se dinamički raspršava i ne prolazi kroz tečni kristal. Dok nema napona, vanjska svetlost prolazi kroz prednju (prozirnu) elektrodu i tečni kristal, i reflektuje se sa sivozelene podloge. Kada se priključi napon, svetlost ne prolazi kroz kristal usled dinamičkog raspršavanja. Tada se vidi donja elektroda, jer je ovaj efekat izražen samo u području delovanja električnog polja, koje je određeno oblikom i površinom elektrode (tamni segmenti na boji podloge). Kontrast između elektrode i podloge je bolji što je intenzitet vanjskog

svetla veći. Pri slabom intenzitetu vanjskog svetla iza indikatora se postavlja izvor svetlosti i tako se dobija transparentni tip displeja.

Prilikom zagrevanja kristali ne prelaze odmah u anizotropne tečnosti, već u mezomorfno stanje, koje tek na višim temperaturama prelazi u tečnost, odakle je i nastao naziv tečni kristal. Tečni kristali dobijaju se zagrevanjem materije (termotropni) ili rastvaranjem čvrste materije u tečnom rastvoru (liotropski). Za praktičnu primenu posebno su važni termotropni tečni kristali sa nematskom fazom, za koju je karakteristična neuredenost težišta izduženih molekula i orientisanost dužih osa molekula duž nekog pravca. Kod nematskih tečnih kristala prisutne su elektrooptičke pojave na bazi dielektričnog ili elektrohidrodinamičkog efekta. Dielektrični efekat nastaje delovanjem električnog polja, koje stvara orientacioni obrtni moment, a elektrohidrodinamički efekat nastaje usled turbulentnog tečenja i rasečavanja svetlosti na takvim optičkim diskontinuitetima.

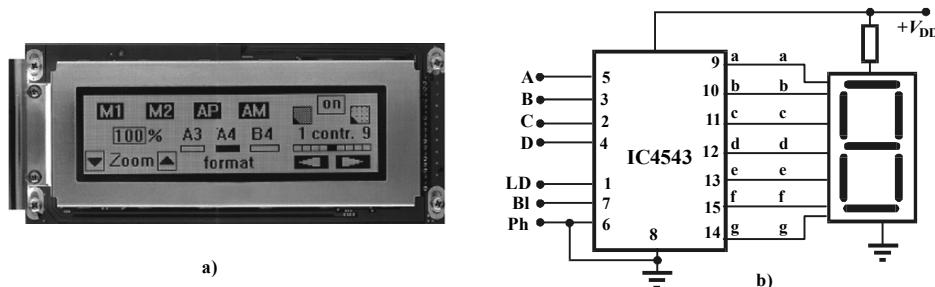
Displeji na bazi tečnih kristala imaju potrošnju $1 - 10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, napajanje $2 - 15 \text{ V}$, struja $0,1 - 0,5 \mu\text{A}$ i životni vek veći od 10^5 sati. LCD-displej se sastoji od dve staklene ploče, između kojih je sloj tečnog kristala debljine $5 - 50 \mu\text{m}$. U zavisnosti od toga što displej treba da prikaže, na unutrašnje strane ploča naparivanjem se nanose različiti oblici elektroda. Vremenska konstanta uspostavljanja stacionarnog kontrasta na displeju relativno je velika: $50 - 150 \text{ ms}$. LCD-displej se pobuđuje najmanje naponom frekvencije od 25 Hz do 1 kHz , metodom skoka faze (slika 5.5a).



Slika 5.5. Napajanje sedamsegmentnog LED modula: a) metod skoka faze, b) šema sa MOS ekskluzivnim ILI kolom, c) valni oblici napona

Tako ne dolazi do elektrolitičkog delovanja i produžava se radni vek. Šema se izvodi sa ekskluzivnim ILI-kolom (slika 5.5b), čime se omogućava direktna pobuda jednog segmenta LCD-disплеja. S obzirom da je potrošnja energije veoma mala, mogu se upotrebiti MOS ili CMOS integrirana kola. Tretirani segment displeja aktivan je samo u periodu kada kontrolni signal W sa dekodera ima logičku jedinicu. Tada se između izlaza ILI-kola i zajedničke elektrode formira naizmenični pravougaoni napon za napajanje segmenta. Oblici napona u pojedinim tačkama prikazani su na slici 5.5c.

Dekoder. Svakom znaku 7-segmentnog displeja odgovara određeni binarni kod. Ovako kodirana informacija dovodi se na dekoder - kolo koje binarnoj informaciji pridružuje liniju na izlazu za aktiviranje segmenta. Dekoderi mogu biti 2 na 4, 4 na 16, 5 na 32 itd. Dekoderi se prave kao integrisana kola na bazi osnovnih logičkih kola. Na slici 5.6b prikazan je dekoder-leč-drajver (IC4543) 4 na 7 koji alfanumeričkom znaku u BCD kodu pridružuje odgovarajuće segmente displeja. Ulaz B_1 služi za paljenje svih segmenata, ulaz Ph za negiranje logičkih vrednosti na izlazu,



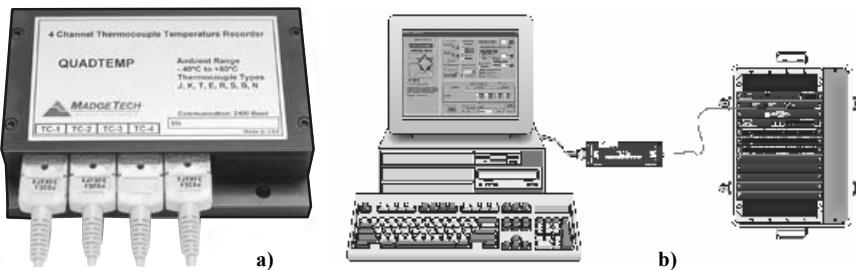
Slika 5.6. LCD displej: a) izgled, b) priključivanje dekoder-drajvera 4543 na 7-segmentni element
a ulaz \overline{LD} postavlja BCD kod u leč registar i tako fiksira izlaz.

5.3. REGISTRATORI

5.3.1. Registracija podataka

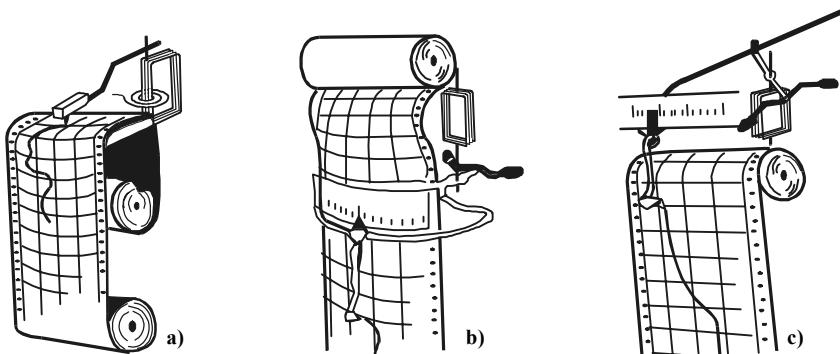
Za trajno zapisivanje podataka primenjuju se registracioni instrumenti u pravom smislu te reči – printeri, ploteri i pisači. Printeri zapisuju podatke u obliku alfanumeričkog teksta. U sistemima automatskog upravljanja služe za štampanje podataka u određenim vremenskim intervalima (protokol-printerii) ili u trenucima kada se desi neki neregularni događaj (event-printerii, alarm-printerii). Ploter prima podatke od računara. Odlikuje se velikom grafičkom rezolucijom i brzinom crtanja, zbog čega je nezamenljiv alat CAD-metoda, tj. prilikom projektovanja sistema automatskog upravljanja pomoću računara.

Za registraciju signala čija je frekvencija veća od 10 kHz primenjuju se digitalne tehnike. Analogni signali sa senzora uzorkuju se u određenim vremenskim intervalima i u A/D konvertoru pretvaraju u digitalni oblik. Mikroprocesor omogućava da se ti podaci čuvaju u memoriji i da se kasnije analiziraju i prikazuju u raznim oblicima. Ovakav uređaj za sakupljanje i registraciju podataka označava se kao *data logger* (slika 5.7). Zahvaljujući niskoj ceni, datalogeri se primenjuju i za akviziciju sporo promenljivih signala, kao što su temperatura i vlažnost.



Slika 5.7. Dataloger: a) dataloger sa 4 ulazna kanala za priključivanje termoelemenata, b) dataloger priključen na računar preko telefonske veze i serijskog interfejsa

Pisači služe za registraciju merene veličine koja se menja u vremenu. Grafički zapis omogućava da se analiziraju rezultati eksperimenta, uslovi rada tehnološkog procesa ili rezultati upravljačkih akcija u sistemu upravljanja. Pisač se sastoji od nekog električnog indikacionog instrumenta i mehanizma za pisanje. Konstruktivno se mora omogućiti dovoljan zakretni moment kako bi se savladali inercija i trenje mehanizma za pisanje. Vremenski pisač registruje vremenski promenljivu veličinu $y(t)$. Papir, ili neki drugi nosilac zapisa kreće se konstantnom brzinom ($v = 5 - 7200 \text{ mm/h}$) a po širini papira pero ostavlja trag proporcionalan veličini y . Smer kretanja papirne trake odgovara vremenskoj osi t . Uobičajena širina papira je multipl od 24 mm ili 35 mm, dužina 50 – 100 m, a masa 40 – 120 g/m². Pero klizi po ravnoj površini i trag će biti zapisan u krivolinijskim koordinatama (slika 5.8a). To je nepogodno je za veće širine papira, pa se današnji pisači prave tako da pero ide preko zakriviljene površine (slika 5.7b) ili se kreće duž vodica, čime se omogućava primena papira sa pravolinijskim koordinatama (slika 5.8c).

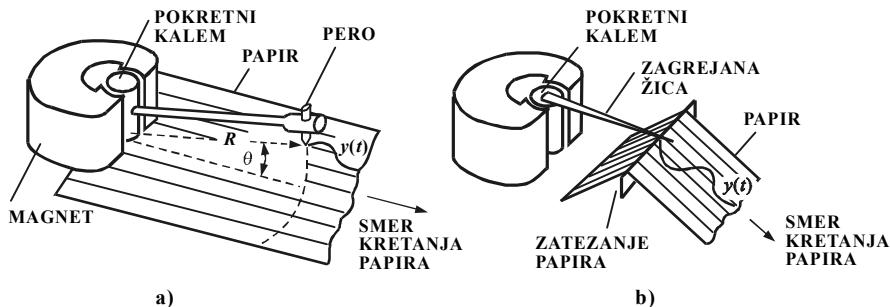


Slika 5.8. Realizacija zapisa: a) sa krivolinijskim koordinatama, b) i c) sa pravolinijskim koordinatama

5.3.2. Galvanometarski pisači

Merni instrument na čijoj je osnovi konstruisan pisač je galvanometarskog tipa, jer je potrebno obezbediti dovoljan moment za pokretanje mehanizma za pisanje. Tipična klasa tačnosti ovakvih pisača je $\pm 1 - 2\%$, a zbog dinamičkih karakteristika zapis je ograničen na veličine sa frekvencijom manjom od 30 Hz.

Na slici 5.9a prikazan je galvanometarski pisač, gde je amplituda zapisa, zbog lučnog kretanja pera, data sa $y = R \sin \theta$. Dužina y razlikuje se od stvarnog signala (za $\theta = \pm 10^\circ$, greška je 0,7%). Osim toga u krivolinijskom koordinatnom sistemu teže je provesti interpolaciju, ekstrapolaciju, itd.

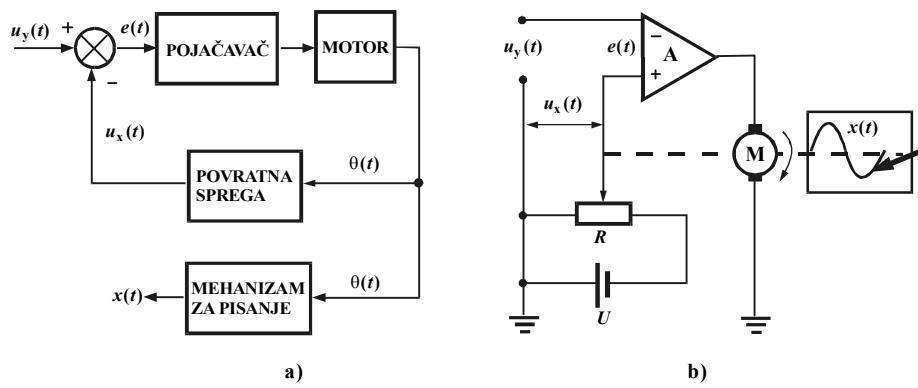


Slika 5.9. Galvanometarski pisač: a) sa krivolinijskim koordinatama,
b) sa pravolinijskim koordinatama

Na slici 5.9b prikazan je takođe galvanometarski pisač, ali se zapis ostvaruje termičkim postupkom. Preko papira, na koji je nanesen tanki sloj termoosetljivog materijala, kreće se zagrejano pero. Termoosetljivi sloj pravi se na bazi stearata železa, pirokatehina, tehničkog urotropina i papirnog pigmenta. Na mestu kontakta pera i papira termička reakcija ostavlja trag. Očigledno je da i dalje postoji nelinearan odnos između položaja pera i stvarne vrednosti signala, ali je na papiru sada pravolinijski koordinatni sistem, koji je praktičniji od krivolinijskog.

5.3.3. Potenciometarski pisači

Potenciometarski pisači rade na principu negativne povratne sprege (slika 5.10). Pozicija pera $x(t)$ prati vrednosti ulaznog naponskog signala $U_y(t)$, koji je proporcionalan merenoj fizikalnoj veličini $y(t)$. Prema tome, ovakav pisač je pozicioni servomehanizam. Zahvaljujući negativnoj povratnoj sprezi postiže se visoka klasa tačnosti: $\pm 0,002 - 1\%$. Budući da su brzine kretanja klizača potenciometra, servomo-



Slika 5.10. Potenciometarski pisač, a) princip rada, funkcionalna šema

tora i mehanizma za pisanje ograničene, sa ovakvim pisačima mogu se zapisati samo relativno spore promene signala: $f = 0,2 - 15 \text{ Hz}$.

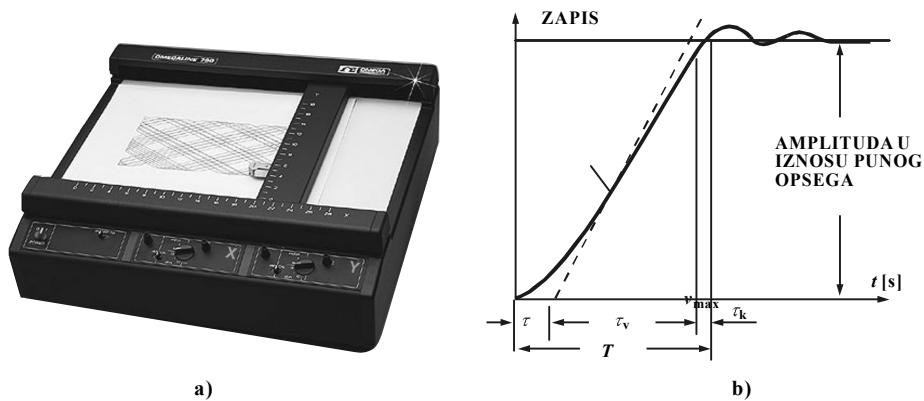
Koordinatni pisači su posebna klasa potenciometarskih pisača, koji registriraju funkcionalnu zavisnost dveju veličina $Y=Y(X)$. Najčešće su to kombinovani XYZ -pisači, koji registriraju $Y=Y(X)$, te vremensku zavisnost $X(t)$ i/ili $Y(t)$ (slika 5.11a). Kada se upotrebljava koordinatni pisač, u njegovoj tehničkoj dokumentaciji potrebno je ustanoviti parametre statičke karakteristike:

- faktor razmere, V/cm ;
- linearost u procentima opsega;
- razdvojenost X ulaza od Y ulaza;
- format papira, tj. dužinu po X i dužinu po Y osi.

Medutim, veličina koju treba registrirati nije statička, već je u manjoj ili većoj meri promenljiva s vremenom. Zato je važno odgovoriti na pitanje koliko kriva koju zapisuje pisač odgovara stvarnim dinamičkim promenama merenog signala. Na ovo pitanje odgovor daju parametri dinamičke tačnosti:

- v_{\max} maksimalna brzina mehanizma za pisanje, cm/s ;
- b_{\max} maksimalno ubrzanje mehanizma za pisanje, cm/s^2 ;
- T vreme potrebno da mehanizam za pisanje dostigne otklon Y , s ;
- a dinamički opseg pojačavača, cm ;
- f_g granična frekvencija, Hz .

Vreme T je suma vremenske konstante servomehanizma τ , vremena potrebnog da se dostigne maksimum τ_v sa brzinom v_{\max} i vremena kočenja τ_k :



Slika 5.11. XY-pisač: a) izgled, b) zapis skokovite promene napona

$$T = \tau + \tau_v + \tau_k, \quad (5.2)$$

a određuje se pomoću krive, koja se dobija kao zapis skokovite promene napona na ulazu, i to u punom opsegu (slika 5.11b). Tangenta na krivu u prevojnoj tački daje maksimalnu brzinu $v_{\max} = Y/\tau_v$ a presecište tangente i vremenske ose daje vremensku konstantu servosistema τ . Obično je vreme kočenja upola manje od vremenske konstante startovanja, tj. vremenske konstante servosistema tako da je

$$T = 1,5\tau + \frac{Y}{v_{\max}}. \quad (5.3)$$

Dinamički opseg a nalazi se tako što se mehanizam iz pozicije mirovanja rukom pomera sve dok se ne dobije maksimalni napon na motoru, tj. na izlazu iz pojačavača. Na osnovu ovih vrednosti, preostala dva parametra mogu se izračunati na sledeći način:

- granična frekvencija

$$f_g = \frac{\omega_g}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{v_{\max}}{aT}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{b_{\max}}{a}} ; \quad (5.4)$$

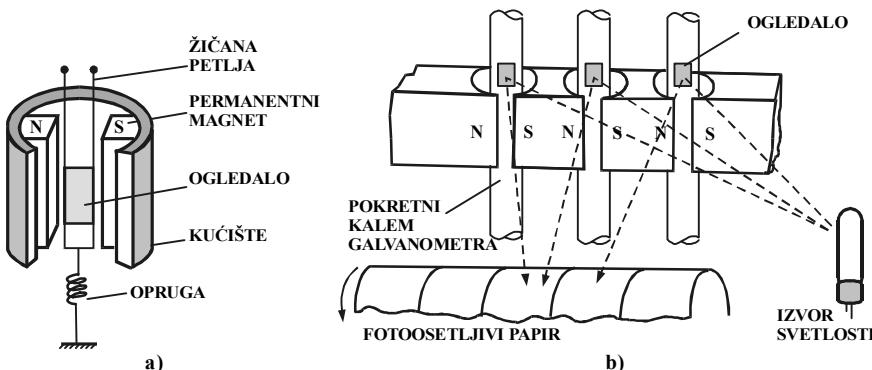
- maksimalno ubrzanje

$$b_{\max} = \frac{v_{\max}}{T}. \quad (5.5)$$

Tipične vrednosti su: $v_{\max} = 100 \text{ cm/s}$, $T = 0,025 \text{ s}$, $a = 1 \text{ cm}$, $f_g = 10 \text{ Hz}$ i $b_{\max} = 4000 \text{ cm/s}^2 \approx 4g$

5.3.4. Optički pisači

I pored svih dobrih pobrojanih osobina, potenciometarski pisači u najboljem slučaju mogu se upotrebiti za registraciju signala do 100 Hz. Da bi se omogućilo registriranje bržih signala, ide se na smanjenje inercije i krutosti opruge kretnog sistema. Najbolji rezultati postižu se pomoću optičkih pisača, koji se nazivaju i oscilografima. Oni se prave na osnovu galvanometra posebne konstrukcije. Merni sistem sastoji se od žičane petlje upete između polova permanentnog magneta (slika 5.12a). Kada kroz petlju teče struja, koja je proporcionalna merenom signalu, nastaju



Slika 5.12. Optički pisač: a) princip rada, b) višekanalni pisač

sile, koje petlju postavljaju u položaj okomito na magnetne silnice. Masa žičane petlje i na njoj pričvršćenog ogledala veoma je mala, pa je zakretanje, praktično, bez inercije. Svetlosni zrak iz posebnog izvora svetlosti pada na ogledalo, reflektuje se i na fotoosetljivom papiru ostavlja trag. Obično se više opisanih mernih sistema postavlja paralelno (slika 5.12b). Tako se omogućava simultano registriranje na više kanala.

Optički pisači su najčešće klase tačnosti $\pm 2\%$, a mogu da prate signale čija je frekvencija do 10 kHz. Zahtevaju posebnu pažnju prilikom rukovanja, jer i mali mehanički udari mogu oštetiti kretni sistem sa ogledalom. Takođe je potrebno voditi računa da se fotoosetljiv papir ne izloži svetlosti pre upotrebe.

PITANJA I ZADACI

- 1) U čemu se sastoji indikacija, a u čemu registracija merene veličine?
- 2) Objasnitи princip kompenzacije na kome se zasniva rad potenciometarskih pisačа.
- 3) Kolike su vrednosti granične frekvencije i maksimalnog ubrzanja pisačа ako su poznati: maksimalna brzina $v_{\max} = 200 \text{ cm/s}$, vremenska konstanta mehanizma za pisanje $T = 0,02 \text{ s}$ i dinamički opseg pojačavača $0,8 \text{ cm}^2$?
Rešenje: $f_g = 15,9 \text{ Hz}$, $b_{\max} = 10\,000 \text{ cm/s}^2$.
- 4) Objasnitи praktični metod priključivanja LCD-displeja na izvore sa naizmeničnim naponom.

LITERATURA

1. N.N. Saveta, L.H. Hohlov, B.S. Brikman, L.P. Dobrecov, V.I. Rozman: *Pečatajućie ustrojstva*, Mašinostroenie, Moskva, 1977.
2. D. Radenković: *Displeji sa tečnim kristalima i njihova primena u elektronskim mernim instrumentima*, Zbornik radova JUREMA 25(1980), 2. svezak, str. 71-76.
3. *Endim 620.02 XY-plotter Description and operating instructions*, VEB MESSAPPHRATEWERKS-CHOTHEIM, Berlin, 1974.
4. F. Unterholzner: *Determinating dynamic characteristics of XY recorders*, News from Rohde & Schwartz, No.83 (1987), str. 24-28.
5. J.E. Cunningham, D.T. Aron: *Remote control & automation techniques*, Tab Book, Blue Ridge Summit, PA, 1984.
6. Z.Petrović, M.Popović, P.Poljak: *Univerzalni LED displej*, HIPNEF 2002, Proceedings pp. 233-238.
7. *Principi rada ulazno-izlaznih PC-uredaja*: www.pctechguide.com
<http://users.pandora.be/educypedia/electronics/lcd.htm>
omega.com/toc.asp?sectionsc?book=temperature§ion=s

6

POUZDANOST MERNIH UREĐAJA

6.1. OPŠTA SVOJSTVA POUZDANOSTI

Razvoj mernih uredaja i sistema usko je povezan sa povećanim zahtevima za njihovom funkcionalnosti, kvalitetom i pouzdanosti. Pitanje pouzdanosti strukturno i tehnološki raznovrsnih mernih uredaja u takvim uslovima ima prvorazredan značaj.

Pouzdanost ne označava obavezno savršeniji merni uredaj. Naprotiv, uredaj može biti visoko pouzdan, ali sa lošim tehničkim i funkcionalnim karakteristikama. Isto tako, uredaj sa dobrom kvalitativnim i funkcionalnim parametrima u eksploatacionom i ekonomskom pogledu nije opravdan ako ima slabe pokazatelje pouzdanosti. U tom smislu pouzdanost i realizacija savršenijih i složenijih uredaja su u izvesnoj protivrečnosti, čije razrešavanje predstavlja aktuelan naučno-tehnički problem. Glavni razlozi za izučavanje pouzdanosti mernih uredaja i sistema su sledeći:

- struktura sistema složena je od velikog broja tehničkih sredstava, koja su često i sama složena od većeg broja elektroničkih, mehaničkih, fluidičkih i drugih elemenata;
- merni uredaji rade u uslovima velikih promena klimatskih parametara u toku dužeg vremenskog perioda;
- strogi zahtevi u toku eksploatacije;
- potreba za visokim klasama tačnosti sastavnih delova, kao i samog uredaja, dovodi do povećane složenosti, a time i do porasta verovatnoće nastanka otkaza;
- povećan broj funkcija mernog sistema takođe dovodi do većeg broja otkaza;
- uticaj mnogobrojnih vanjskih i unutrašnjih smetnji na rad komponenata sistema u celini;
- pouzdanost mernih uredaja i sistema i pored evidentnih napora i postignutih rezultata raste sporije od pouzdanosti sastavnih delova i komponenata.

Otkaz mernog uredaja podrazumeva da on nije više u stanju da obavlja projektovane funkcije na specificirani način. Pitanje otkaza je zato u tesnoj vezi sa problemom funkcionalnosti, tj. sa tačnim merenjem fizikalne veličine bez obzira na delovanje smetnji. Otkaz nekog elementa može poremetiti uslove funkcionalnosti, što

zapravo predstavlja otkaz uređaja. Ovde se radi o struktturnom otkazu, koji se izučava u okviru strukturne pouzdanosti. Isti efekat na funkcionalnost, odnosno na otkaz uređaja ima promena parametara tehničkih karakteristika elemenata izvan definisanog opsega. Ovakav tip otkaza u užem smislu tretira se u domenu parametarske pouzdanosti. Prema dosadašnjim saznanjima, parametarski otkazi elektroničkih i mikroprocesorskih mernih uređaja čine 20–70% ukupnih otkaza.

Za mikroprocesorske merne uređaje posebno su važni kratkotrajni otkazi, koji nastaju kao posledica promene parametara elemenata ili uređaja pod uticajem vanjskih ili unutrašnjih dejstava. Nakon određenog vremena uređaj se oporavlja i nastavlja sa normalnim funkcionisanjem. U toku kratkotrajnog otkaza generišu se lažni merni signali, tj. uređaj ne radi na zadati način. Nakon oporavka on nastavlja sa obavljanjem svojih funkcija, ali ostaje problem utvrđivanja lažnih informacija i njihovog uticaja na merenje.

Pouzdanost sistema spada u red fundamentalnih tehničkih problema današnjice. Izučavanje pouzdanosti obuhvata raznovrsne aspekte eksplotacije sistema i njegovih elemenata sa ciljem da se omogući kvalitetna i efikasna realizacija projektovanih funkcija sistema. Na tom planu uvode se dopunska (redundantna) hardverska, softverska i informaciona sredstva, pored onih osnovnih, koja su neophodna za funkcionisanje sistema. Time se povećava pouzdanost. Metodi redundance otvaraju put za projektovanje mernih uređaja i sistema sa snošljivim greškama. Tada se dopušta pojавa izvesnih parcijalnih otkaza u strukturi bez posledica po ukupan rad sistema.

Pouzdanost uređaja obuhvata mnoge njegove osobine, a neke od njih često predstavljaju odredene aspekte pouzdanosti. To su:

- **bezotkazni rad:** svojstvo uređaja da zadrži svoju radnu sposobnost u toku nekog vremenskog perioda;
- **mogućnost oporavka ili obnovljivost:** svojstvo uređaja koje se ogleda u njegovom prilagodavanju u smislu sprečavanja i detekcije otkaza, te ponovnog uspostavljanja radne sposobnosti bilo popravkom ili zamenom elemenata koji su otkazali u toku eksplotacije;
- **očuvanost:** svojstvo uređaja da očuva svoju radnu sposobnost tokom skladištenja i transportovanja;
- **vitalnost:** svojstvo uređaja da očuva radnu sposobnost i pod delovanjem smetnji koje odgovaraju nenormalnim uslovima rada. Smisao vitalnosti uređaja nije samo u neprekidnom radu, bez otkaza u normalnim uslovima eksplotacije, već i u tome da se radna sposobnost makar delimično očuva i u nenormalnim uslovima;
- **objektivnost:** svojstvo uređaja da generiše objektivnu informaciju. Naime, merni uređaj može imati visoke kvalitete: bezotkaznost, dugovečnost, očuvanost i vitalnost, ali pod uticajem slučajnih poremećaja ponekad dode do kratkotrajnih otkaza u toku kojih se generišu netačne (neobjektivne) informacije.

U toku projektovanja i praktične upotrebe mernih uređaja i sistema od interesa su ponekad i druge osobine pouzdanosti. Za opis pouzdanosti uvek se bira jedan određen podskup navedenih merljivih osobina koje najpotpunije odražavaju suštinu konkretnog problema.

6.2. VRSTE POUZDANOSTI

Pri ispitivanju pouzdanosti mernih uređaja i sistema važna etapa je utvrđivanje uzroka koji utiču na pojedine aspekte pouzdanosti. Na toj osnovi razlikuju se:

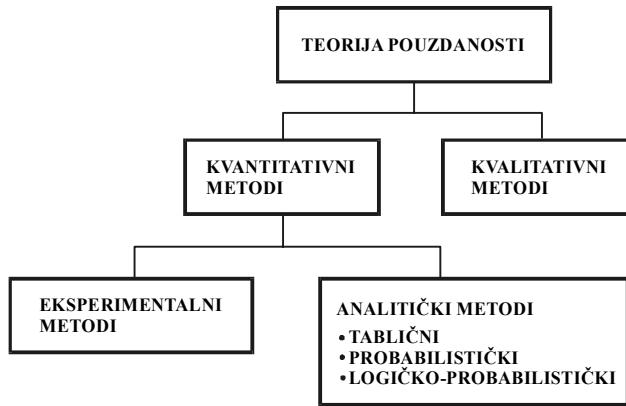
- **strukturna pouzdanost**, koja zavisi od strukture uređaja i stanja pojedinih elemenata u toj strukturi;
- **programska pouzdanost**, koja se odnosi na pouzdanost softvera mikroprocesorskih mernih uređaja, kao i softvera računarske konfiguracije složenih mernih sistema;
- **funkcionalna pozdanost**, a odnosi se na pouzdanost u izvršavanju pojedinih funkcija mernog sistema, pa je sasvim razumljivo da je za njeno određivanje neophodno dobro poznавање logike funkcionisanja sistema.

6.3. KVANTITATIVNE KARAKTERISTIKE I POKAZATELJI POUZDANOSTI

Pouzdanost je u osnovi vezana za slučajne otkaze. Zato su za ocenu pouzdanosti mernih uređaja potrebni podaci o otkazima. Obrada podataka provodi se primenom matematskog aparata teorije verovatnoće. Metodološki pristup izučavanju pouzdanosti prikazan je na slici 6.1.

Kvalitativno određivanje pouzdanosti zasniva se na interpretaciji fizikalne suštine nastalih otkaza. Pored svih prednosti, ovakav pristup je nedovoljan jer ne omogućava:

- proučavanje pouzdanosti mernih uređaja u različitim uslovima primene;
- projektovanje mernih uređaja sa odgovarajućim tehničkim karakteristikama;
- upoređivanje pouzdanosti različitih projektnih rešenja;
- proračun potrebnih rezervnih (redundantnih) elemenata.



Slika 6.1. Metode izučavanja pouzdanosti

Kvantitativni metodi zahtevaju brojčane pokazatelje pouzdanosti, koji se dobijaju eksperimentalnim, analitičkim, logičkim ili kombinovanim postupcima. Analitički aparat uglavnom se oslanja na teoriju verovatnoće i matematičku statistiku. To je razumljivo kad se ima u vidu da su otkazi u biti slučajni dogadaji. Za mikroprocesorske strukture primenjuju se logički, logičko-tablični, logičko-probabilički i drugi metodi.

Eksperimentalno ispitivanje pouzdanosti elemenata, blokova i uređaja u mernim sistemima, kao i samih sistema, obavlja se tako da se od trenutka $t=0$ nakon puštanja u rad n istovetnih jedinica u određenim vremenskim intervalima registruje broj jedinica koje su u tom periodu otkazale. Na taj način dobija se histogram (slika 6.2a), koji teži kontinualnoj krivoj – funkciji raspodele (distribucije) otkaza. U skladu sa pravilima matematičke statistike, površina ispod funkcije raspodele otkaza $f(t)$ u vremenskom intervalu $t_1 - t_0$ odgovara verovatnoći pojave otkaza:

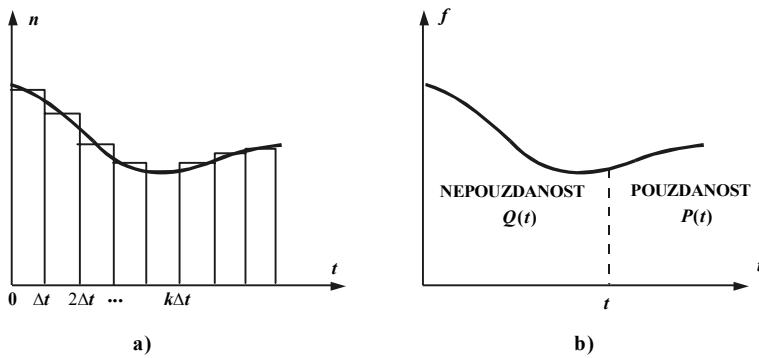
$$P(t_0 \leq t \leq t_1) = \int_{t_0}^{t_1} f(t) dt. \quad (6.1)$$

Na kraju će sve jedinice da otkažu. To se može zapisati na sledeći način:

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = 1. \quad (6.2)$$

Obično se postavlja cilj da uređaj u toku vremena t radi ispravno. Verovatnoća da merni uređaj neće otkazati u toku vremena t , nego kasnije u toku $t < T < \infty$, predstavlja verovatnoću bezotkaznog rada uređaja ili pouzdanost:

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt. \quad (6.3)$$



Slika 6.2. Raspodela otkaza: a) histogram, b) kontinualna kriva

Verovatnoća da će se desiti suprotan događaj, tj. da će uređaj otkazati u toku vremena t označava se kao nepouzdanost:

$$Q(t) = 1 - P(t) = \int_0^t f(t)dt, \quad (6.4)$$

čemu odgovara površina ispod funkcije raspodele $f(t)$ levo od tačke t (slika 6.2b).

Iz prethodne dve jednačine funkcija raspodele može se napisati u obliku:

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt} \quad (6.5)$$

Intenzitet otkaza je relativni pokazatelj pouzdanosti jer predstavlja odnos broja elemenata koji su otkazali i broja onih koji nisu otkazali, na osnovu čega je

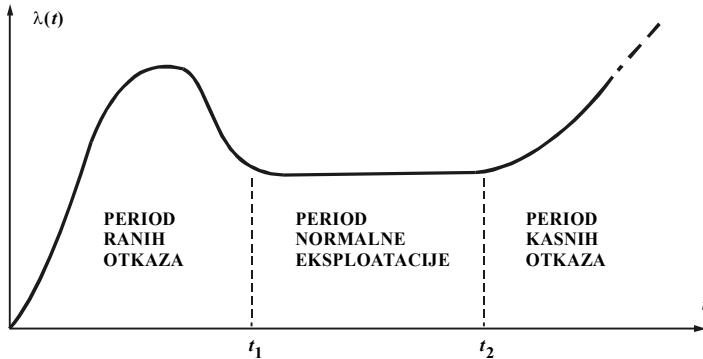
$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}, \quad (6.6)$$

Intenzitet otkaza $\lambda(t)$ odreduje se eksperimentalno. Iako oblici krive zavise od uslova ispitivanja, načina rada uređaja i mnogih drugih faktora, u načelu zavisnost $\lambda(t)$ ima oblik kao na slici 6.3. Na dijagramu se uočavaju tri karakteristična područja. Eksperimentalni podaci i praksa pokazuju da nakon uključivanja uređaja u rad intenzitet otkaza naglo raste sve do trenutka kada dostiže maksimalnu vrednost, a zatim opada do neke konstantne veličine. S ciljem smanjenja ovog vremena i početnih grešaka, merni uređaji se testiraju pre nego što se isporuče korisniku.

Drugi period je najduži i traje od t_1 do t_2 . To je period normalne eksploatacije i njegovo izučavanje sa aspekta pouzdanosti je najinteresantnije. Otkazi ovde imaju slučajni karakter, a posledica su unutrašnjih ili vanjskih uticaja na elemente uređaja.

U trećem periodu, usled pojačanog procesa starenja i istrošenosti instrumenta, intenzitet otkaza naglo raste. Ovo je period rashodovanja uređaja. Eksplotacioni vek

se, istina, može proizvesti zamenom istrošenih delova novim, ali je tada prisutan rizik od povećanog broja otkaza ukoliko se novi elementi nalaze u periodu uhodavanja.



Slika 6.3. Promena intenziteta otkaza u vremenu

Kada se $f(t)$ u jednačini (6.6) zameni sa oblikom iz (6.5) dobija:

$$d[P(t)] = -\lambda(t) \cdot P(t) dt, \quad (6.7)$$

odnosno:

$$\lambda(t) dt = -\frac{d[P(t)]}{P(t)} = -d[\ln P(t)]. \quad (6.8)$$

Rešenje ove diferencijalne jednačine povezuje pouzdanost i intenzitet otkaza:

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(s) ds\right). \quad (6.9)$$

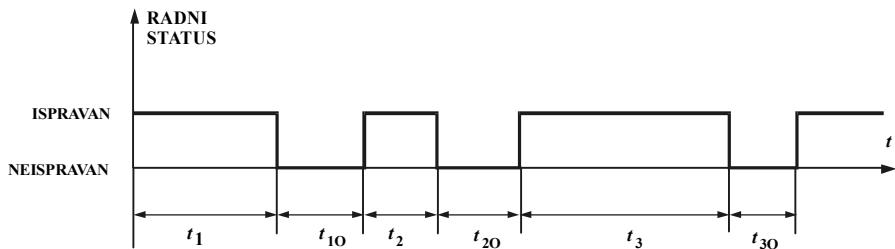
Srednje vreme bezotkaznog rada je srednje vreme između dva otkaza za uređaje sa obnavljanjem. Za uređaje bez obnavljanja to je vreme kada se pojavljuje prvi otkaz i određuje se kao matematičko očekivanje:

$$T = \int_0^\infty t f(t) dt. \quad (6.10)$$

Raspoloživost se odnosi na klasu mernih uređaja i sistema koji nakon otkaza i zamene elemenata što su otkazali obnavljaju svoju radnu sposobnost. Srednje vreme između dva otkaza u tom slučaju nedovoljan je pokazatelj pouzdanosti, jer ne govori ništa o tome koliko je uređaj bio van upotrebe zbog otkaza. Raspoloživost uređaja u praksi se procenjuje iz radnih i neradnih intervala (slika 6.4), kao odnos:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^n t_{i0}}, \quad (6.11)$$

gde je $\sum t_i$ ukupno vreme ispravnog rada, a $\sum t_{i0}$ ukupno vreme potrebno za zamenu. Vreme potrebno za zamenu određuje se eksperimentalno ili u toku eksploatacije.



Slika 6.4. Dijagram radnih i neradnih perioda mernog uređaja

Deleći ova vremena sa brojem otkaza uređaja, dolazi se do uobičajene formule za raspoloživost:

$$R = \frac{T}{T + T_0}, \quad (6.12)$$

gde je T srednje vreme između dva otkaza, a T_0 srednje vreme obnavljanja rada uređaja nakon otkaza.

Često se upotrebljava i suprotni pokazatelj pouzdanosti – neraspoloživost:

$$N = 1 - R. \quad (6.13)$$

Tehnička neraspoloživost je potpuniji pokazatelj pouzdanosti od raspoloživosti, jer se osim uticaja obnavljanja (remonta) uzima u obzir i uticaj faktora održavanja (preventivno delovanje, kontrola). Izražava se kao odnos srednjeg vremena između dva otkaza i ukupnog perioda u kojem uređaj ispunjava zadane funkcije:

$$R_t = \frac{T}{T + T_0 + T_p + T_k}, \quad (6.14)$$

gde je T_p vreme potrebno za preventivno održavanje, a T_k vreme kontrole.

O kvantitativnim pokazateljima pouzdanosti koji su ovde razmotreni može se, u vidu zaključka, istaći sledeće:

- Raspoloživost, neraspoloživost, tehnička raspoloživost i sl. jesu kompleksni (integralni) pokazatelji pouzdanosti, jer uzimaju u obzir bezotkazni rad mernog uređaja i njegovu obnovljivost, tj. ponovno uspostavljanje mernih funkcija nakon otkaza. Pri tome se otkaz tretira kao potpuni otkaz (otkaz u užem smislu), ali i kao otkaz uređaja u ispunjavanju predviđenih funkcija koji nastaje usled grešaka u kontrolnim programima, grešaka u transformaciji, obradi, prenosu i čuvanju informacija (otkaz u širem smislu);
- Kvantitativni pokazatelji pouzdanosti kao što su: pouzdanost, nepouzdanost, intenzitet otkaza, srednje vreme između dva otkaza i sl. jesu

prosti pokazatelji pouzdanosti jer odslikavaju tačno određeno svojstvo uređaja;

- Važna osobina kvantitativnih pokazatelia je da se na osnovu dva pokazatelia mogu izračunati ostali. Zbog toga se najčešće pokazateli daju u parovima: P i Q , T i T_0 , R i N itd.

6.4. EKSPONENCIJALNI ZAKON RASPODELE

Vreme između dva otkaza je slučajna veličina, čija je distribucija predstavljena odgovarajućom funkcijom raspodele. Na slici 6.2 prikazan je principijelno izgled ove funkcije, dobijene eksperimentalnim putem. U analitičkom obliku ova funkcija iskazuje se pomoću funkcija raspodele – koje se, inače, koriste u teoriji verovatnoće i statistici – a u zavisnosti od osobina mernog uređaja i njegovih sastavnih delova.

Eksponencijalni zakon raspodele primenjuje se za složene sisteme – kakvi su, uglavnom, i današnji merni uređaji – koji su prošli period uhodavanja i ranih otkaza, a rade pod delovanjem velikih mehaničkih, klimatskih i drugih opterećenja. U takvim eksploatacionim uslovima intenzitet otkaza je konstantan, tj. $\lambda(t) = \lambda$, pa se na osnovu opšte jednačine (6.8) dobija:

- odnos intenziteta i pouzdanosti

$$\lambda = -\frac{d}{dt} \ln P(t), \quad (6.15)$$

- verovatnoća bezotkaznog rada

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (6.16)$$

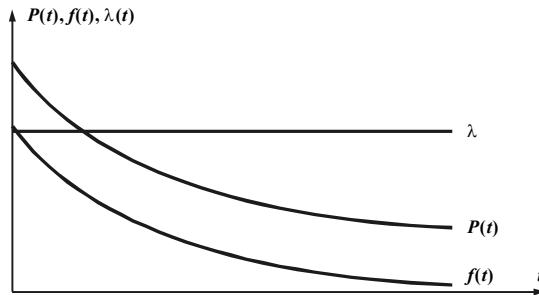
- funkcija raspodele

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (6.17)$$

- srednje vreme između dva otkaza

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (6.18)$$

Poslednji rezultat ukazuje da intenzitet otkaza $\lambda = const.$ kao recipročna vrednost srednjeg vremena otkaza T ima vrednost srednje frekvencije otkaza. Osim toga, iz jednačine (6.16) sledi da je $P(T) = 0,37$, što znači da je za eksponencijalnu raspodelu matematičko očekivanje vremena otkaza jednak verovatnoći bezotkaznog rada od 0,37. Na slici 6.5 predstavljene su funkcije $P(t)$, $f(t)$ i $\lambda(t)$ za eksponencijalnu raspodelu.



Slika 6.5. Funkcija verovatnoće bezotkaznog rada $P(t)$, funkcija raspodele otkaza $f(t)$, intenzitet otkaza $\lambda(t)$ za eksponencijalnu raspodelu

6.5. PRORAČUN POKAZATELJA POUZDANOSTI

Proračun pokazatelja pouzdanosti nekog mernog uređaja vrši se na osnovu pokazatelja pouzdanosti njegovih sastavnih elemenata. Nije, međutim, jednoznačno određeno o kojim se elementima radi. Merni pretvarač se, na primer, sastoji od primarnog osetilnog elementa, pojačavača, izvora napajanja i kablova za povezivanje. I ovi delovi mogu se dalje deliti sve do osnovnih mehaničkih, pneumatskih ili električnih elemenata. Do kojeg nivoa treba izdeliti merni uređaj zavisi od konkretnog problema i potrebe da se proračun pouzdanosti vrši u funkciji delova većeg ili manjeg stepena integracije. Nakon toga pravi se struktorna šema, koja odsljikava topologiju usvojenih elemenata.

Glavne poteškoće u proračunu pouzdanosti nastaju kod definisanja kriterijuma otkaza. To znači da treba utvrditi korespondenciju između strukturne šeme i šeme pouzdanosti, koja odsljikava vezu između elemenata sa aspektom pouzdanosti. Do šeme pouzdanosti dolazi se pažljivom analizom logike funkcionisanja elemenata i uređaja, te načina nastajanja otkaza. Upravo zbog toga ona se razlikuje i od električne i od funkcionalne strukturne šeme. Šeme pouzdanosti predstavljaju serijsku, paralelnu ili kombinovanu, serijsko-paralelnu vezu sastavnih elemenata.

Pouzdanost uređaja čiji su elementi u šemi pouzdanosti povezani u seriju računa se pomoću formule

$$P = \prod_{i=1}^n p_i = \prod_{i=1}^n (1 - q_i) , \quad (6.15)$$

gde su p_i pouzdanost i q_i nepouzdanost elemenata.

Pouzdanost uređaja čiji su elementi u šemi pouzdanosti povezani paralelno računa se pomoću formule

$$P = 1 - Q = 1 - \prod_{i=1}^n q_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i) . \quad (6.16)$$

Ako je šema pouzdanosti sastavljena od mešovite serijsko-paralelne veze elemenata, proračun pouzdanosti provodi se sukcesivnom primenom prethodnih dve jednačina.

Podaci o intenzitetu otkaza elemenata od kojih se sastoje merni uređaj mogu se dobiti od proizvođača ili iz specijalizovanih priručnika. Na primer, za savremene elektronske komponente vrednosti λ su od $0,05 \cdot 10^{-6}$ do $0,5 \cdot 10^{-6}$ otkaza na sat za nominalni režim rada (tabela 6.1).

ELEMENT	$\lambda [1/10^6 h]$	ELEMENT	$\lambda [1/10^6 h]$
Otpornici		Kalem za VF	0,5
- ugljeni slojni	2	Diode	
- oksidni slojni	0,1	- tačkaste Ge	0,5
- žičani	2	- legirane Si	0,1
Potenciometri		- planarne Si	0,02
- ugljeni slojni	2	Tranzistori	
- žičani	1	- legirani Ge	1
Kondenzatori		- legirani Si	0,5
- papirni	1	- planarni Si	0,05
- polimerski	0,5	Zalemljeni spoj	0,3
- keramički	0,1		
- elektrolitski			
- od aluminijuma	5		
- od tantala	1		

Tabela 6.1. Intenzitet otkaza tipičnih elektronskih elemenata

6.6. METODE POVEĆAVanja POUZDANOSTI MERNIH UREĐAJA

Rezultati proračuna i dobijeni pokazatelji pouzdanosti uporeduju se sa željenim vrednostima. Ako se pokaže da uređaj nema potrebnu pouzdanost, definišu se postupci i metodi za povećanje pouzdanosti. Tri su glavna metodološka pristupa u tom zadatku:

- 1) upotreba kvalitetnijih elemenata, tj. elemenata sa boljim pokazateljima pouzdanosti, jer će takvi elementi dati veću pouzdanost celog uređaja;
- 2) primena redundanse, tj. uvođenje rezervnih (dodatnih) hardverskih i softverskih sredstava, koja povoljno utiču na povećanje pouzdanosti;
- 3) izmena strukture uređaja, tj. izbacivanje nekih elemenata i uvođenje novih, što je zapravo korekcija projektnog rešenja.

Povećanje pouzdanosti mernih uređaja i sistema usko je povezano sa pojmom redundanse. Rezervni skup sredstava kojim se realizuje redundansa omogućava projektovanje takvih mernih sistema koji nastavljaju s radom i pored otkaza pojedinih delova sistema.

PITANJA I ZADACI

- 1) Ako je intenzitet otkaza $\lambda = 0,01 \text{ h}^{-1}$, odrediti verovatnoću da će senzor raditi pouzdano u periodu od $t = 50 \text{ h}$. Koliko je srednje vreme ispravnog rada T ? (Smatrali da se otkazi dešavaju po eksponencijalnoj raspodeli.)
Rešenje: $P(50) = 0,607$, $T = 100 \text{ h}$.
- 2) Strukturalna šema pouzdanosti senzora sastoji se od dva serijski povezana elementa. Dokazati da je intenzitet otkaza senzora $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$, a srednje vreme ispravnog rada $T = T_1 T_2 / (T_1 + T_2)$, pri čemu su λ_1 i λ_2 intenziteti otkaza, a T_1 i T_2 srednja vremena ispravnog rada elemenata.
- 3) Senzor ima strukturalnu šemu pouzdanosti sastavljenu od n jednakih serijski povezanih elemenata ($\lambda = 0,00001 \text{ h}^{-1}$). Koliki je maksimalni broj elemenata ako se u periodu od 200 h zahteva verovatnoća ispravnog rada $P = 0,99$? Rešenje: 5.
- 4) Eksperimentalno je ustanovljeno da je srednje vreme ispravnog rada senzora pritiska $T = 4800 \text{ h}$, a srednje vreme potrebno za otklanjanje kvara i ponovno puštanje u rad $T_0 = 8 \text{ h}$. Kolika je raspoloživost ovog senzora? Ako se uvedu elementi preventivnog održavanja, koji su odredeni srednjim vremenom održavanja $T_p = 5 \text{ h}$, za koliko će se smanjiti raspoloživost senzora?
Rešenje: $R = 0,9983$, $\Delta R = -0,0010$.
- 5) Senzor ima dva jednaka elementa u seriji sa verovatnoćom ispravnog rada $P = 0,998$. Radi povećanja pouzdanosti senzora, osnovnim elementima paralelno su dodati redundantni elementi istih verovatnosnih karakteristika. Izračunati pouzdanost osnovne strukture i strukture sa redundansom.
Rešenje: Za osnovnu strukturu je $P = 0,9960$, a za strukturu sa redundantnim elementima je $P = 0,9992$.
- 6) Intenzitet otkaza mernog uređaja je $\lambda = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ h}^{-1}$. Izračunati vreme ispravnog rada do prvog otkaza T i verovatnoću da neće doći do kvara za godinu dana ako dnevno radi 5 h.
Rešenje: $T = 1/\lambda = 1430 \text{ h}$, $\lambda t = 1,277$.

LITERATURA

1. A.A.Besonov: *Nadežnost' sistem avtomatičeskogo regulirovaniya*, Energoatomizdat, Lenjingrad, 1984.
2. L.P. Glazonov: *Osnovy teorii nadežnosti avtomatičeskikh sistem*, Energoatomizdat, Lenjingrad, 1984.
3. M. Popović, M. Papić, N. Gujić: *Generalizovani model za proračun pouzdanosti sistema za dojavu požara*, Požar-eksplozija-preventiva, 1-2(1988), str. 31-39.
4. T.A. Galinkevič: *Prikladnja teorija nadežnost'*, Visšaja škola, Moskva, 1981.
5. E.J. Henley, H. Kumamoto: *Reliability and risk assessment*, Prentice Hall, 1981.

II

**PRINCIPI TEHNIKE
SENZORA**

OSNOVI TEHNIKE SENZORA

7.1. SREDSTVA ZA DOBIJANJE INFORMACIJA U SISTEMIMA AUTOMATSKOG UPRAVLJANJA

Sredstva za dobijanje informacija u sistemima automatskog upravljanja daju informacije o kvalitativnim i kvantitativnim karakteristikama procesa što se odvijaju u upravljanom objektu, kao i u samom upravljačkom sistemu. Za upravljanje tehničkim sistemima od posebne su važnosti informacije o ponašanju osnovnih parametara: temperature, protoka, nivoa, pritiska, vremena, položaja itd. Na temperaturu i protok obično otpada više od polovine svih merenja koja se provode za potrebe upravljanja. Tabela 7.1 pokazuje raspodelu merenja po fizikalnim veličinama u različitim oblastima upravljanja. Kao što se vidi, kod upravljanja tehnološkim objektima (elektrane, hemijska postrojenja, toplane) samo na merenje temperature i protoka otpada 80% svih merenja. Na ostale veličine (viskoznost, kiselost, provodnost itd.) otpada manje od 10% svih merenja. Međutim, u drugim oblastima upravljanja ideo temperature i protoka se smanjuje, tako da u poljoprivredi na temperaturu otpada 16,9%, a u komadnoj proizvodnji svega 9%. Ali, u ovim oblastima je veći broj merenja ostalih veličina, a posebno pozicije, vremena, mase itd.

REGULIRANA VELIČINA OBJEKAT UPRAVLJANJA	TEMPERA- TURA	PROTOK	NIVO	PRITISAK	PARAMETRI MATERIJALA	OSTALE VELIČINE	CENA SENZORA U % CENE SAU
ELEKTRANE	46,3	12,9	5,7	24,2	5,0	5,9	33
HEMIJSKA POSTROJENJA	41,0	13,6	12,6	20,3	2,9	9,6	39
GRADSKE TOPLANE	69	2,0	2,7	8,8	2,8	14,7	9
POLJOPRIVREDNI OBJEKTI	16,7	10,5	16,2	3,2	5,5	47,9	38
KOMADNA PROIZVODNJA	9,0	4,0	4,0	4,0	6,0	63,0	10

Tabela 7.1. Merenje tipičnih veličina u pojedinim oblastima upravljanja

Uopšteno govoreći, troškovi za dobijanje informacija u sistemu automatskog upravljanja dosta su veliki. Ovi troškovi čine oko trećine ukupne cene sistema.

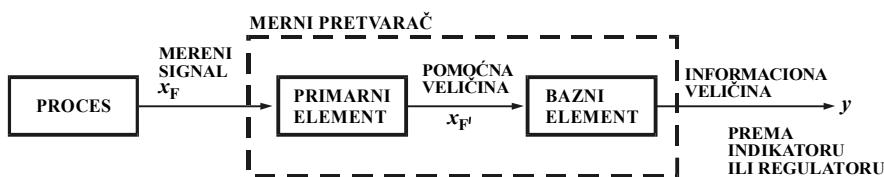
Dobijena informacija u sistemu upravljanja obrađuje se po nekom algoritmu kako bi se proces odvijao na željeni način. Velika je raznovrsnost procesa kojima se danas upravlja kako u pogledu tehnoloških, eksploatacionih i funkcionalnih karakteristika tako i u pogledu algoritma upravljanja. Stoga je razumljivo što postoje raznovrsna sredstva za dobijanje informacija. Na jednom ograničenom prostoru nije moguće obuhvatiti sva ta sredstva koja postoje u praksi. Zato će se težište izlaganja u ovom poglavlju usmeriti na opšte principe rada i konstrukcije ovih sredstava.

Informacije se u suštini dobijaju merenjem fizikalnih veličina koje karakterišu ponašanje procesa. Merni uredaji pomoću kojih se u sistemu automatskog upravljanja dobijaju informacije su: senzori, transdijuseri i merni pretvarači.

Senzor ili davač je primarni osetilni element, koji pretvara fizikalnu veličinu x'_F , koja je pogodnija za merenje. Senzor vrši prvo pretvaranje fizikalne veličine u nizu pretvaranja koja su prisutna u složenim mernim uredajima.

Transdijuser pretvara merenu fizikalnu veličinu x_F u neki standardni oblik. To je najčešće električni signal, strujni ili naponski, a može biti i pneumatski. Standardni signal iz transdijusera je $0-20 \text{ mA}$ ili $4-20 \text{ mA}$, pneumatski je $0,02-0,01 \text{ MPa}$, a naponski može biti $0-1 \text{ mV}$, $0-10 \text{ mV}$, $0-100 \text{ mV}$ itd.

Merni pretvarač ili transmiter pretvara fizikalnu veličinu u standardni signal. Konstruktivno je osposobljen da šalje informaciju o merenju sa jednog mesta na drugo putem prenosnih linija ili medijuma. Merni pretvarač sastoji se od primarnog elementa koji procesnu veličinu x_F pretvara u neki pogodniji oblik x'_F , te baznog elementa (adAPTERA), koji tu veličinu pretvara u informacioni signal sa normalnim obeležjima (slika 7.1).



Slika 7.1. Struktura mernog pretvarača

7.2. KLASIFIKACIJA SENZORA

Savremena informaciona sredstva koja se primenjuju u sistemima automatskog upravljanja odlikuju se:

- visokim kvalitetom svojih tehničkih karakteristika (linearnost, osetljivost, brzina odziva, odsustvo histerezisa, veliki odnos signal/šum itd.);

- visokom pouzdanošću (dugovečnost, bezotkazni rad, neosetljivost na vanjske uticaje);
- visokim tehnoškim vrednostima (mali gabariti i masa, jednostavnost konstrukcije, niska cena).

Tehnika senzora danas se razvija u tri osnovna pravca:

- 1) minimizacija i veći stepen integracije sastavnih delova, to je tendencija i u drugim oblastima tehnike;
- 2) realizacija višestrukog delovanja, tako da se pomoću jednog senzora istovremeno određuje nekoliko različitih fizikalnih veličina (na primer, senzor temperature i vlažnosti zraka);
- 3) proširivanje funkcionalnih mogućnosti senzora zahvaljujući ugradnji mikroprocesora.

Zbog svega toga podela senzora nije jednostavna – ona se vrši u odnosu na neko njihovo svojstvo: vrstu izlaznog signala, prirodu merene veličine, princip rada, gabarite, prirodu izlazne veličine, uslove rada, način upotrebe, unutrašnju strukturu ili pouzdanost, (tabela 7.2).

KRITERIJUM KLASIFIKACIJE	VRSTA INFORMACIONOG SREDSTVA	OSNOVNE ODLIKE
PRIRODA MERENE VELIČINE	ANALOGNI	Normiran dinamički opseg izlaznog signala, osetljivost na šumove
	DIGITALNI	Velika mogućnost interakcije sa mikroprocesorskim upravljačkim sredstvima
	TOPLOTNI	Merenje temperature, toplotnog kapaciteta, entalpije, toplote izgaranja
	MEHANIČKI	Merenje sile i momenata, pritiska, vakuma, mehaničkog naprezanja
	KINEMATIČKI	Merenje linearног i ugaоног ubrzanja i brzine, protoka
	GEOMETRIJSKI	Merenje poloјaja (koordinata) tela, razmere, nivoa
	RADIJACIONI	Merenje intenziteta toplotnog, nuklearnog, akustičnog i elektromagnetskog zračenja, boje, parametara talasnih procesa
	VREMENSKI	Merenje vremenskog perioda i frekvencije
	ELEKTRIČNI	Merenje elektromotorne sile, struje, otpora, induktivnosti, kapaciteta, provodnosti
	HEMIJSKI	Merenje hemijskog sastava
	FIZIKALNI	Merenje mase, gustine, vlažnosti, tvrdoće, plastičnosti, hravavosti

Tabela 7.2. Klasifikacija senzora

KRITERIJUM KLASIFIKACIJE	VRSTA INFORMACIONOG SREDSTVA	OSNOVNE ODLIKE
PRINCIP RADA	AKTIVNI	Energiju neophodnu za merenje aktivni senzor uzima iz procesa čija se veličina meri
	Indukcioni: elektromagnetični elektrodinamički	
	Pijezoelektrični	
	Piroelektrični	
	Termoelektrični	
	Fotoelektrični	
	PASIVNI	Energija neophodna za proces merenja dovodi se iz posebnog izvora za napajanje
	Induktivni	
	Otpornički	
	Kapacitivni	
GABARITI	HEMIJSKI	
	Polarizacioni	Polarizacija jona
	Hemijsko-električni	Kombinovanje hemijskih i električnih metoda
	Impedantni	Promena impedanse u zavisnosti od hemijskog sastava
	OPTOELEKTRONSKI	
	Predajnici	Struja u poluprovodniku deluje na spontanu ili stimulisanu emisiju svetlosti (svetleća ili laserska dioda)
	Prijemnici sa vanjskim fotoefektom	Svetlost deluje na emisiju elektrona sa fotokatode u vakuumskoj cevi (fotočelija)
	Prijemnici sa unutrašnjim fotoefektom	Kvanti svetlosti menjaju gustinu nosilaca naboja u poluprovodniku (fotootpor), otpor p-n prelaza (fotodioda) ili otpor zapornog sloja metal-poluprovodnik (fotoelement)
	NORMALNI	Standardna izvedba
	MALOGABARITNI	Za primenu u ograničenim prostorima
PRIRODA IZLAZNE VELIČINE	MINIJATURNI	Za specijalnu namenu
	MEHANIČKI	Izlazni signal sila ili pomak
	VREMENSKI	Izlazni signal je vremenski, frekventni, kodirani
	ELEKTRIČNI	
USLOVI RADA	Parametarski	Merena veličina održava se kroz promenu R, L, C parametara izlaza
	Generatorski	Na izlazu se generiše električni signal (aktivni senzori)
	STACIONARNI	Fiksirani na jednom mestu
	PRENOSIVI	Prenosivi sa jednog na drugo mesto

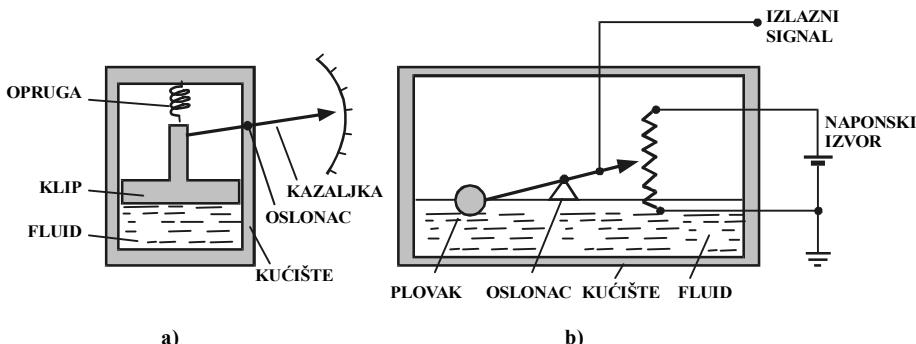
Tabela 7.2. nastavak

KRITERIJUM KLASIFIKACIJE	VRSTA INFORMACIONOG SREDSTVA	OSNOVNE ODLIKE
NAČIN UPOTREBE	OPERATIVNI POMOĆNI	Za neposredno davanje informacije Izlazni signal služi kao pomoćna informacija
UNUTRAŠNJA STRUKTURA	DIREKTNI KOMPENZACIONI	Od ulaza do izlaza direktni prenos (konverzionalni lanac) Sa negativnom povratnom spregom po izlaznoj veličini
POUZDANOST U EKSPLOATACIJI	POUZDANI NEPOUZDANI	Intenzitet otkaza mali, vreme obnavljanja kratko

Tabela 7.2. nastavak

Podela na aktivne i pasivne senzore nije jednoznačna. Neki autori ovu podelu izvode na osnovu toga da li je izlazni signal senzora nastao na osnovu energije merene veličine (pasivni senzor) ili merena veličina modulira energiju nekog vanjskog izvora (aktivni senzor).

Pasivni senzori po ovakvom tumačenju zapravo su merni uredaji direktnog tipa, jer energiju neophodnu za merenje i transport izlaznog signala uzimaju sa objekta merenja. Zbog toga primena instrumenata tog tipa nije preporučljiva za objekte sa malom energijom, jer se može lako narušiti njihov energetski balans. Na slici 7.2a prikazan je pasivni uredaj za merenje pritiska. Pritisak fluida prenosi se preko klipa tako da se vrši pomeranje kazaljke. Ovo pomeranje u celosti nastaje kao rezultat promena merenog pritiska, jer nema nikakvog vanjskog izvora energije.



Slika 7.2. Podela senzora na osnovu energije potrebne za merenje: a) pasivni senzor; b) aktivni senzor

Aktivni senzori su merni instrumenti indirektnog tipa, koji energiju neophodnu za merenje dobijaju iz vanjskog izvora. Vanjski izvor najčešće je električni, ali može biti pneumatski ili hidraulički. Na slici 7.2b prikazan je aktivni senzor za merenje nivoa goriva u rezervoaru. Promena nivoa prenosi se preko plovka na klizač

potenciometra. Energija izlaznog signala dolazi iz vanjskog izvora, tako što klizač modulira vrednost izlaznog napona u skladu sa promenama nivoa.

Značajna razlika između pasivnih i aktivnih senzora je u rezoluciji merenja. Prethodni primer ukazuje da se rezolucija merenja pasivnih senzora može povećati prođavanjem kazaljke, ali je ta mogućnost limitirana iz praktičnih razloga. Rezolucija aktivnih senzora lako se povećava uzimanjem izvora sa većim iznosom energije. Ovaj način ograničen je zbog zagrevanja vodova i povećanih gubitaka toplote, te zbog opasnosti od eksplozije. Uopšteno govoreći, pasivni senzori su jednostavnije konstrukcije i jeftiniji od aktivnih senzora, pa je izbor jednih ili drugih za konkretno merenje stvar kompromisa između cene i potrebne rezolucije merenja.

U literaturi često se sreće i drugačije poimanje pasivnog, odnosno aktivnog senzora. Za pasivni senzor po tom tumačenju neophodan je vanjski izvor energije da bi mogao da radi. Primer je otpornički detektor mehaničkog pomeraja kod koga se delovanje merene fizikalne veličine preko mehaničkog kontakta prenosi na promenu električne otpornosti. Struja otpornika menja se saglasno delovanju fizikalne veličine i konvertuje se u odgovarajući električni napon preko promene otpornosti. Kaže se da ulazna energija na senzoru moduliše energiju vanjskog izvora, pri čemu je koeficijent efikasnosti uvek veći od jedan jer se malom energijom ulaza modulišu znatno veći iznosi energije na izlazu. Aktivni senzori generišu električni signal (struja, napon, naboј) zahvaljujući konverziji mehaničke, svetlosne ili hemijske energije ulaza bez upotrebe vanjske energije. Primer aktivnog senzora je termoelement, koji toplotnu energiju pretvara u napon bez vanjskog izvora energije.

7.3. FIZIKALNI PRINCIPI RADA SENZORA

Informaciju o stanjima ispitivanog procesa senzori generišu na osnovu njihove interakcije sa procesom, tako što reaguju na ta stanja i reakciju transformišu u izlazni signal. Postoji veliki broj fizikalnih pojava i efekata, načina transformacije svojstava procesa, kao i metoda konverzije energije koji se mogu primeniti prilikom gradnje senzora. Zahvaljujući razvoju tehnologije, primeni novih materijala i mikroprocesora, danas se u tehniци senzora primenjuju i sofisticirani fizikalni fenomeni, za koje se sve donedavno činilo da imaju samo teorijski značaj. Dovoljno je spomenuti optičke senzore, posebno lasere, holografiju itd.

U tabeli 7.3 predstavljene su fizikalne pojave na osnovu kojih se senzori najčešće grade. U drugoj koloni navedena je konverzija fizikalnog svojstva ili energije koji odgovaraju toj pojavi, a u trećoj koloni naznačena je fizikalna suština konverzije.

U gradnji senzora sve više se koriste hemijske i biohemijske pojave. Na toj osnovi grade se senzori ukusa, mirisa i drugi. Na poluprovodničkoj osnovi napravljene su hemijski osetljive elektronske komponente: hemirezistor, hemitranzistor, jonsko osetljivi tranzistor i drugi. U odnosu na standardne poluprovodničke senzore, hemijski i biohemijski imaju višu cenu, manju pouzdanost i teže održavanje.

FIZIKALNA POJAVA, EFEKAT ILI SVOJSTVO	KONVERZIJA	FIZIKALNA SUŠTINA KONVERZIJE
PROVOĐENJE TOPLOTE	TOPLOTNA ENERGIJA U NEKO FIZIKALNO SVOJSTVO	Provodenje toplote kroz telo iz oblasti sa većom u oblast sa manjom temperaturom.
TOPLOTNA RADIJACIJA	TOPLOTNA ENERGIJA U INFRACRVENO ZRAČENJE	Nastajanje elektromagnetskog zračenja usled termičkog kretanja atoma i molekula.
ZEBEKOV EFEKT	TEMPERATURA U ELEKTRICITET	Generisanje elektromotorne sile u kolu sa dva metala, pri čemu su temperature spojeva različite.
PIROELEKTRIČNI EFEKT	TEMPERATURA U ELEKTRICITET	Generisanje električnog naboja na površini nekih kristala prilikom povećanja temperature.
TERMOELEKTRONSKI EFEKT	TOPLOTNA ENERGIJA U EMISIJI ELEKTRONA	Odvajanje elektrona sa površine metala prilikom njegovog zagrevanja u vakuumu.
PELTIJEV (ELEKTROTERMičKI) EFEKT	ELEKTRICITET U TOPLOTNU ENERGIJU	Apsorpcija ili generisanje toplotne energije u električnom kolu sa dva metala.
TOMSONOV (ELEKTROTERMičKI) EFEKT	TEMPERATURA I ELEKTRICITET U TOPLOTNU ENERGIJU	Generisanje ili apsorpcija toplotne energije u električnim kolu sa provodnikom od jednog materijala, pri čemu su pojedini delovi kola na različitim temperaturama
FOTONAPONSKI EFEKT	SVETLOST U ELEKTRICITET	Pojava slobodnih elektrona i pozitivnih šupljina, odnosno elektromotorne sile na osvetljenom $p-n$ prelazu.
FOTOPROVODNI EFEKT	SVETLOST U ELEKTRIČNI OTPOR	Promena električnog otpora osvetljenog poluprovodnika.
ZEMANOV EFEKT	SVETLOST U MAGNETIZAM ILI SPEKTAR	Prelamanje spektarnih linija prilikom prolaska svetla kroz magnetno polje
RAMANOV EFEKT	SVETLOST U SVETLOST	Nastajanje zračenja svetlosti sa različitim spektrom od monohromatskog, koji je prisutan u početku zračenja.
POKELSOV (ELEKTROOPTIČKI) EFEKT	SVETLOST I ELEKTRICITET U SVETLOST	Prelamanje svetlosnog zraka prilikom prolaska kroz pijezokristal, kojem je doveden napon na površine što su normalne na pravac kretanja svetlosti.
KEROV (ELEKTROOPTIČKI) EFEKT	SVETLOST I ELEKTRICITET U SVETLOST	Prelamanje svetlosnog zraka u izotropnom materijalu, na čije je obloge, normalne na pravac kretanja svetlosti, doveden napon.
KOTON-MUTONOV (MAGNETOOPTIČKI) EFEKT	SVETLOST I MAGNETIZAM U SVETLOST	Prelamanje svetlosti u izotropnim tečnostima koje se nalaze u jakom magnetnom polju, koje na taj način postaju anizotropne.
FARADEVJEV (MAGNETOOPTIČKI) EFEKT	SVETLOST I MAGNETIZAM U SVETLOST	Zakretanje ravni polarizacije linearno polarizovane svetlosti kada prolazi kroz paramagnetni materijal.
HOLOV EFEKT	MAGNETIZAM I ELEKTRICITET U ELEKTRICITET	Nastajanje razlike potencijala na površini poluprovodnika kada kroz njega teče električna struja i kada postoji magnetno polje okomito na smer električne struje.
MAGNETNA PROVODNOST	MAGNETIZAM I ELEKTRICITET U ELEKTRIČNI OTPOR	Povećanje električnog otpora krutog tela u magnetnom polju.

Tabela 7.3. Fizikalni principi na osnovu kojih se senzori najčešće grade

FIZIKALNA POJAVA, EFEKAT ILI SVOJSTVO	KONVERZIJA	FIZIKALNA SUŠTINA KONVERZIJE
MAGNETOSTRIKCIJA	MAGNETIZAM U DEFORMACIJU	Nastajanje mehaničke deformacije tela koje se nalazi u magnetnom polju.
PIJEZOELEKTRIČNI EFEKT	PRITISAK U ELEKTRICITET	Generisanje električnog naboja na površini nekih kristala kada na njih deluje mehanička sila (pritisak).
DOPLEROV EFEKT	KRETANJE IZVORA ILI PRIJEMNIKA ZRAČENJA U FREKVENCIJU	Promena frekvencije reflektovanog zvuka ili svetlosti sa objekta koji se kreće u odnosu na izvor zvuka ili svetlosti.

Tabela 7.3. nastavak

Na osnovu poznate Šenonove hipoteze da je nosilac informacije masa ili energija proizilazi da se ne može dobiti nikakva informacija o objektu merenja ukoliko nema toka energije ili mase između objekta (predajnika) i senzora (prijemnika). Veći značaj pridaje se energiji kao nosiocu informacije, posebno električnoj energiji zbog lakoće manipulisanja. Osnovni oblici energije određuju šest domena signala:

- domen radijacionog signala (ra), odnosi se na sva zračenja od γ -zračenja do radio talasa, sa intenzitetom, frekvencijom, polarizacijom i fazom kao najvažnijim parametrima;
- domen mehaničkog signala (mc), odnosi se na vanjske parametre objekta kao što su pozicija, dimenzije, brzina i sila;
- domen termičkog signala (te), ima samo jedan signal – temperaturu objekta;
- domen električnog signala (el), odnosi se na električne parametre: napon, struja, otpor, kapacitet i dr.;
- domen magnetnog signala (ma), ima samo jedan bitan parametar – jačinu magnetskog polja;
- domen hemijskog signala (he), odnosi se na unutrašnju strukturu materije, sa koncentracijom, kristalnom strukturom i agregatnim stanjem kao bitnim parametrima.

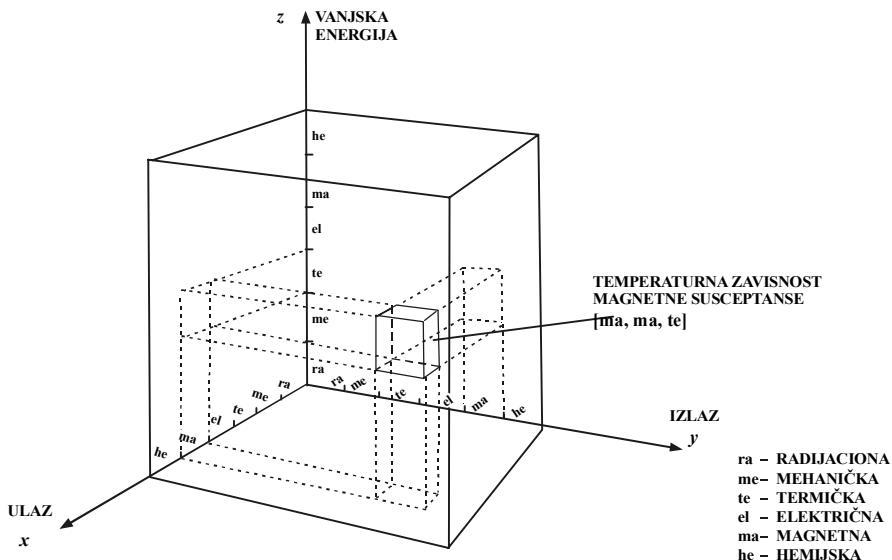
Merenje nenelektričnih signala počinje pretvaranjem u električni, pa se onda obavlja procesiranje. Posebnu važnost za merenje nenelektričnih veličina imaju fizikalni efekti koji omogućavaju takvu konverziju (tabela 7.4). U prvoj koloni navedeni su domeni nenelektričnih signala, u drugoj merene veličine, a u trećoj su osnovni efekti fizike čvrstog stanja koji omogućavaju nenelektrično-električno pretvaranje. Merene veličine su obično funkcije položaja i vremena, pa je često potrebno izmeriti njihovu derivaciju. Merenja se provode na dva različita mesta, odnosno u dva trenutka vremena, pa se tako formira razlika odgovarajućih električnih signala. U četvrtoj i petoj koloni tabele 7.4 navedeni su fizikalni efekti koji daju izlazni signal direktno proporcionalan prostornoj i vremenskoj derivaciji merene veličine. Nepotpunjena mesta rezervisana su za efekte koji još nisu otkriveni.

DOMEN SIGNALA	MERENA VELIČINA	STACIONARNI EFEKTI	GRADIJENTNI EFEKTI	DERIVATIVNI EFEKTI
RADIJACIONI	Intenzitet	Fotoelektrični efekt	Lateralni fotoelektrični efekt	–
	Frekvencija	Fotoprovodnost	–	–
	Polarizacija	Fotodielektrični efekt	–	–
	Faza	–	–	–
MEHANIČKI	Sila	Pijezoelektrični efekt	–	Akustičkoelektrični efekt
		Pijezootpornost	–	–
	Brzina	–	–	–
	Pozicija	Prostorna zavisnost električnog polja	–	–
TERMIČKI	Geometrijske dimenzije	–	–	–
	Temperatura	Sve zavisnosti električnih parametara tela od temperature	Zebekov termoelektrični efekt Etinghausen-Nernstov efekt	– –
MAGNETNI	Intenzitet magnetnog polja	Holov efekt	–	Faradej-Henrijev zakon
		Magnetootpornost	–	–
		Superprovodnost	–	–
		Suhlov efekt	–	–
		Etinghausen-Nernstov efekt	–	–
HEMIJSKI	Koncentracija Kristalna struktura Agregatno stanje	Sve električne osobine tela	Voltin efekt	Redoks-reakcije
			–	–
			–	–

Tabela 7.4. Fizikalni efekti sa električnim izlaznim signalom

Za neelektrično-električno pretvaranje potrebna je izvesna energija bilo iz domena merenog signala, bilo iz nekog domena koji ne pripada ni mernom, ni izlaznom signalu. Trodimenzionalni dijagram fizičkih efekata, tzv. kocka senzorskih efekata, omogućava da se prikaže svako pretvaranje (slika 7.3). Osa x predstavlja ulazni (mereni) signal, osa y izlazni (merni) signal i osa z energiju neophodnu za konverziju. U ravni xy nalaze se autogeneratorski efekti, odnosno pretvaranja $[x, y, 0]$ koja se realizuju na osnovu energije ulaza (aktivni senzori). Na primer, pretvaranje termičke energije u električnu kod termoelementa može da se napiše kao $[te, el, 0]$, transformacija upadnog zračenja u napon za fotonaponski element može da se napiše kao $[ra, el, 0]$, a transformacija energije zračenja u magnetnu kod fotomagnetskog senzora kao $[ra, ma, 0]$.

Pretvaranja koja čine osnovu rada pasivnih senzora mogu se predstaviti vektorom $[x, y, z]$. Na primer, povećanje električne provodnosti zbog upadnog zračenja kod fotoprovodnih senzora opisuje vektor $[el, el, ra]$, generisanje lateralnog napona



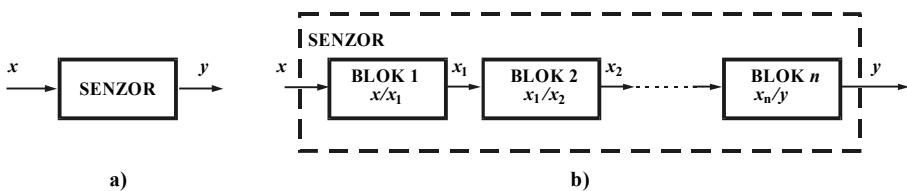
Slika 7.3. Trodimenzionalni dijagram fizičkih efekata

na pn spoju zbog upadne radijacije opisuje vektor $[ra, el, me]$, promene otpornosti poluprovodnika zbog delovanja mehaničke sile kod pijeozistorinskog senzora opisuje vektor $[el, el, me]$.

Trodimenzionalni dijagram fizičkih efekata pokazuje da je broj mogućih autogeneratorskih efekata 6^2 , a da pasivnih transformacija ima 6^3 . Interesantno je da neki efekti zasad još nisu poznati, mada njihovo mesto na dijagramu postoji.

7.4. STRUKTURA SENZORA

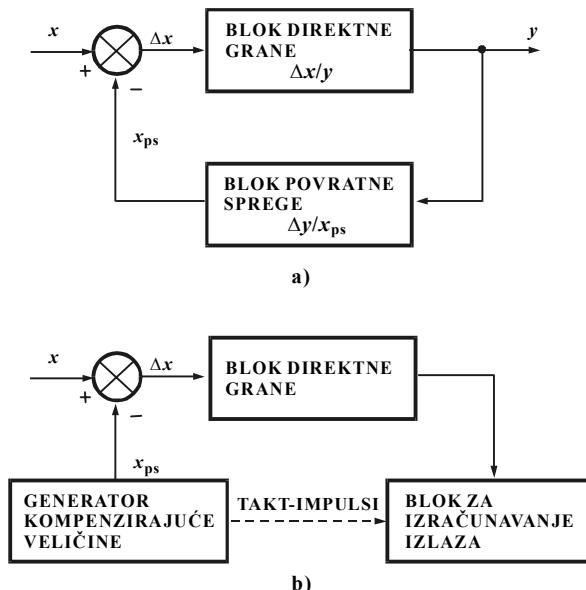
Informacija o vrednostima merene veličine dolazi na ulaz mernog uređaja u vidu materijalnog nosioca informacije (signal merene informacije ili kratko mereni signal), pri čemu je mereni signal u funkcionalnoj vezi sa merenom veličinom. Mereni signal u senzoru, transdijuseru i mernom pretvaraču prolazi kroz niz konverzija, a dominantna konverzija određuje fizički princip rada tog uređaja. Skup svih konverzija što slede jedna iza druge u smeru toka signala, tj. od ulaza do izlaza iz senzora, čini lanac konverzija. Merni element (blok) koji odgovara jednoj konverziji istovremeno je i strukturni element senzora (slika 7.4a), a topologija i povezanost elemenata predstavljaju se strukturnom šemom. Elementi mogu biti povezani serijски, paralelno, sa negativnom povratnom spregom ili kombinovano. Način povezivanja elemenata je bitan, s obzirom da od toga zavise način rada i tačnost senzora.



Slika 7.4. Struktura senzora: a) senzor kao jedinstveni element
b) senzor sa serijskom vezom elemenata

Senzori koji direktno pretvaraju merene veličine imaju strukturu sa serijskom vezom blokova, pri čemu sve konverzije idu u jednom smeru od ulaza do izlaza (slika 7.4.b). Na primer, elektromehanički indikacioni instrumenti sastoje se od tri bloka u seriji: bloka koji merenu veličinu x pretvara u neku pomoćnu električnu veličinu y (merno kolo), bloka koji pretvara električnu veličinu y u mehanički pomak α (merni mehanizam), te bloka za predstavljanje rezultata (kazaljka i skala). Glavne odlike senzora sa direktnim pretvaranjem su jednostavnost konstrukcije i jeftina proizvodnja, a nedostatak je mogućnost velikog uticaja okoline na tačnost konverzije od ulaza do izlaza iz senzora.

Senzori koji imaju strukturu sa negativnom povratnom spregom (slika 7.5a) imaju kompenzacioni način rada. Suština tog načina je da se mereni signal x uravnoteži (kompenzira, balansira) sa signalom povratne sprege x_{ps} , koji je iste prirode kao x , ali suprotog znaka, tako da razlika $\Delta = x - x_{ps}$ teži nuli. Senzori sa ovakvim načinom rada su konstruktivno složeniji, skupljivi, ali tačniji od senzora sa direktnim načinom rada.



Slika 7.5. Kompenzacioni način rada senzora: a) sa negativnom povratnom spregom,
b) sa autonomnim generatorom

Kompenzacijia se može izvršiti i bez povratne sprege pomoću autonomnog generatora, koji automatski po nekom algoritmu daje kompenzirajuću veličinu x_k (slika 7.5b). U trenutku kada je $x=x_k$, blok u direktnoj grani na svom izlazu pokazuje vrednost merene veličine. Sinhronizacija rada obezbeđuje se takt-impulsima.

Merni pretvarač, kao najopštije sredstvo za dobijanje informacije u sistemima automatskog upravljanja, sastoji se od primarnog elementa, tj. senzora, gde se vrši direktno pretvaranje, i adaptera, koji najčešće koristi metod kompenzacije.

PITANJA I ZADACI

- 1) Koja su tri osnovna pravca razvoja savremenih senzora?
- 2) Objasniti kvalitativne kriterijume na osnovu kojih se može izvršiti klasifikacija senzora.
- 3) Kako se tumači podela senzora na aktivne i pasivne?
- 4) Kakva je veza između strukture senzora i tačnosti konverzije merene veličine u izlazni signal?
- 5) Analizirati pasivni senzor pritiska prikazan na slici 7.2.a i na osnovu toga odrediti lanac konverzija od merene do izlazne veličine.

LITERATURA

1. M. Popović: *Automatsko upravljanje u velikim zgradama*, Svetlost, Sarajevo, 1988.
2. E. Humo: *Principi i elementi automatske regulacije*, Svetlost, Sarajevo, 1987.
3. V.I. Kotur, M.A. Skomskaja, N.N. Hramova: *Električeskie izmerenija i elektroizmeritel'nye pribory*, Energoatomizdat, Moskva, 1986.
4. N. Kako, J.Jamane: *Datčiki i mikro-EVM* (prevod sa japanskog), Energoatomizdat, Lenjingrad, 1986.
5. A.F.P. van Putten: *Electronic measurement systems*, Prentice Hall International, New York, 1988.

8

TEHNIČKE KARAKTERISTIKE SENZORA

8.1. STATIČKE KARAKTERISTIKE

8.1.1. Statički prenos senzora

Cilj automatskog upravljanja je da se održava kretanje upravljanog procesa unutar specificiranih granica, bez obzira na uticaje koji remete odvijanje procesa. Informacije o promenama upravljanje veličine koje daje senzor, transdijuser ili merni pretvarač moraju da budu tačne, jer je jedino na osnovu takvih informacija moguće donositi odluke šta i kako raditi da bi cilj upravljanja bio dostignut. Zato se na rad informacionih sredstava postavljaju strogi zahtevi, izrečeni kroz tehničke karakteristike uredaja. Mnogobrojne karakteristike i njihovi pokazatelji koji postoje u praksi predstavljaju samo pojedine aspekte opšteg zahteva da izlaz iz senzora treba da je linearno proporcionalan promenama regulirane veličine.

U opštem slučaju, konverzija mernog signala x u informacioni signal y na izlazu iz senzora opisuje se prostom linearnom diferencijalnom jednačinom:

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y &= \\ = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x, & \end{aligned} \quad (8.1)$$

$m \leq n$.

Za nulte početne uslove, primenom Laplasove transformacije, gde je $s = \sigma + j\omega$ kompleksan broj, iz diferencijalne jednačine dobija se prenosna funkcija:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0}, \quad m \leq n. \quad (8.2)$$

Statička karakteristika je odnos izlazne i ulazne veličine u stacionarnim uslovima:

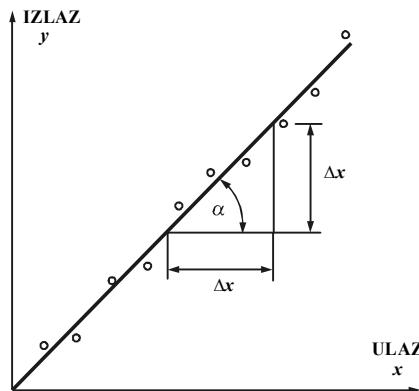
$$y = kx, \quad (8.3)$$

što podrazumeva da su sve dinamičke promene jednake nuli, tj. da je:

$$\frac{d^i x}{dt^i} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad \frac{d^k y}{dt^k} = 0 \quad k = 1, 2, \dots, m. \quad (8.4)$$

Koeficijent $k = b_0/a_0$ naziva se koeficijent proporcionalnosti, koeficijent statičkog prenosa ili koeficijent pojačanja. Njegove dimenziije dobijaju se kao odnos jedinica izlaza y i jedinica ulaza x . Na slici 8.1 prikazana je tipična statička karakteristika senzora. To je pravac u koordinantnom sistemu „izlaz-ulaz“. Koeficijent prenosa, u skladu sa jednačinom (8.3), određuje se kao tangens ugla statičkog pravca u odnosu na apscisu:

$$k = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \tan \alpha. \quad (8.5)$$



Slika 8.1. Statička karakteristika senzora

Statička karakteristika eksperimentalno se dobija tako da se zada vrednost ulazne veličine, sačeka da se smire sve prelazne pojave i onda očita vrednost izlaza. Postupak se ponavlja tako što se zadaju nove vrednosti ulaza po rastućoj ili opadajućoj sekvenci. Koje su to vrednosti ulaza i kako se određuju stvar je organizacije eksperimenta, o čemu je već bilo reči. Znak \circ obeležava očitane vrednosti izlaza. Obično se statička karakteristika crta odmah, na osnovu iskustva, tako da optimalno prolazi između očitanih vrednosti. U principu, optimalni pravac određuje se na osnovu rezultata analitičkog postupka – metoda linearne regresije.

Za većinu fizikalnih principa koji su našli svoju praktičnu primenu u tehnici senzora statička karakteristika nalazi se uz uslov da:

- popratni efekti i efekti višeg reda nisu bitni, te se mogu zanemariti;
- merena, odnosno ulazna veličina ne zavisi od vremena;

- vrednosti karakteristike dobijene za rastuću sekvencu ulazne veličine podudaraju se sa vrednostima karakteristike dobijene za opadajuću sekvencu.

Ovi uslovi nikada nisu sasvim zadovoljeni, pa realna statička karakteristika u odstupa od idealne, koja je data jednačinom (8.3). Za opisivanje ovih odstupanja primenjuju se dva metoda. Prvi metod je interpolacija, pomoću koje se određuju parametri idealne statičke karakteristike i intervali u kojima se ti parametri nalaze. Drugi metod je analiza odstupanja realne statičke karakteristike od idealne, pri čemu su parametri odstupanja u suštini greške merenja senzora.

Interpolacija statičke karakteristike provodi se u četiri etape. Prva etapa je izbor idealne statičke karakteristike – za senzor je to linearna funkcija $y=kx$. Druga etapa je izbor interpolacionog kriterijuma u smislu što manjeg odstupanja između idealne i realne karakteristike. Kriterijum treba da je efikasan i ekonomičan u pogledu proračuna odstupanja, a sa aspekta praktičnog merenja treba da je jednostavan, jednoznačan i provediv. Osim spomenute metode najmanjih kvadrata najčešće primenjivani načini interpolacije prikazani su na slici 8.2. a. Treća etapa interpolacije je određivanje parametara idealne karakteristike – za linearni pravac dovoljna su dva parametra, koja se dobijaju na osnovu tačaka stvarne karakteristike, na primer:

$$y_0 = y(0) \quad \text{i} \quad y_{\max} = y(x_{\max}). \quad (8.6)$$

U četvrtoj etapi određuju se dozvoljene granice parametara da bi se uzele u obzir greške interpolacije. Na primer, dozvoljeno odstupanje nule često se definiše kao

$$\delta = \Delta y_0 / y_{\max}. \quad (8.7)$$

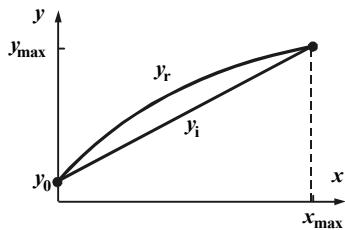
8.1.2. Parametri statičke karakteristike

Merno područje je skup podataka između dva određena repera na skali. Na primer: merno područje strujnog signala na izlazu iz mernog pretvarača je 4–20 mA, merno područje senzora pritiska je 0–20 bar, a merno područje optičkog pirometra je 700–2 000 °C.

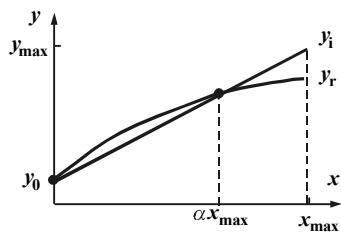
Merni opseg je područje između dva repera koja odgovaraju najmanjoj i najvećoj vrednosti na skali. Merni opseg izražava se kao algebarska razlika tih dveju vrednosti. Za prethodno navedene primere merni opsezi su: 16 mA, 10 bar i 1 300 °C.

Tačnost karakteriše sposobnost senzora da u referentnim radnim uslovima daje pokazivanja bliska stvarnoj vrednosti merene veličine. Tačnost u potpunosti odražava svojstva senzora u pogledu grešaka merenja.

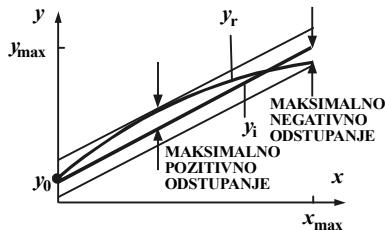
Tačnost se izražava u odnosu na neku specificiranu vrednost, najčešće u odnosu na merni opseg senzora. Ako je za senzor pritiska sa opsegom 0–10 bar deklarisana tačnost $\pm 1\%$, to znači da je maksimalna greška prilikom merenja bilo koje veličine unutar opsega 0,1 bar. Takva greška, međutim, za merenu vrednost od



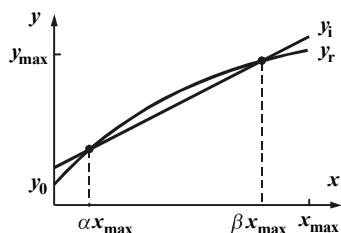
Idealni pravac interpolira se kroz krajne (terminalne) tačke realne karakteristike. Ovakva interpolacija je jednostavna, ali je odstupanje terminalnog pravca y_i od realne krive y_r veliko.



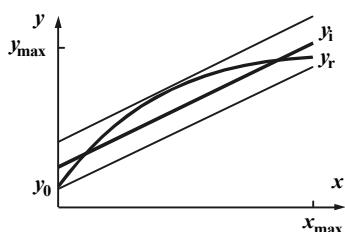
Idealni pravac prolazi kroz fiksiranu početnu tačku $x=0$ i tačku αx_{\max} , pri čemu je $0 < \alpha < 1$. Razlika između y_i i y_r manja je nego u prethodnom slučaju.



Idealni pravac prolazi kroz početnu tačku $x=0$ tako da su maksimalno pozitivno i maksimalno negativno odstupanje y_i od y_r po absolutnoj vrednosti jednaki. Ovaj način može se tretirati kao poseban slučaj prethodnog.



Idealni pravac prolazi kroz tačke αx_{\max} i βx_{\max} , pri čemu su $0 < \alpha < \beta < 1$ i $\alpha \neq \beta$, tako da odstupanje y_i od y_r bude što manje. Nedostatak ovog načina interpolacije je što tačka y_0 nije fiksirana.



Idealni pravac interpolira se tako da su pozitivna i negativna odstupanja y_i od y_r na celom opsegu po absolutnoj vrednosti jednak. Ovo je najbolji, ali za praktično merenje i najteži način interpolacije. Može se izvesti kao specijalni slučaj prethodnog načina.

Slika 8.2. Načini interpolacije

1 bar iznosi 10% te vrednosti. Zbog toga je važno da se opseg senzora odabere adekvatno očekivanim promenama merene veličine, kako bi se što više očuvala tačnost senzora. Prema tome, ako se očekuje promena pritiska 0–1 bar, tada nije uputno upotrebiti senzor sa opsegom 0–10 bar.

Linearost. To je podudarnost realne karakteristike y_r i idealne statičke karakteristike y_i . U zavisnosti od toga kojim interpolacionim postupkom je određen idealni pravac, razlikuju se: nezavisna, nulta i terminalna linearost. Najčešće se primenjuje terminalna linearost, koja se računa kao:

$$L = \frac{|y_r - y_i|_{\max}}{y_{\max} - y_{\min}} \cdot 100\%, \quad (8.8)$$

gde je u brojiocu maksimalna razlika između stvarne i idealne statičke karakteristike. Linearost, zapravo, pokazuje koliko je stvarna statička karakteristika nelinearna.

Osetljivost senzora određuje se za datu vrednost merene veličine nakon dostignutog stacionarnog stanja kao odnos priraštaja izlazne veličine i priraštaja merene veličine:

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x}. \quad (8.9)$$

S obzirom da je statička karakteristika senzora linearna, osetljivost je konstantna na celom opsegu, pa se može predstaviti kao odnos mernog opsega na izlazu i mernog opsega na ulazu. Osetljivost je, kao što se vidi iz jednačine (8.9), jednak nagibu statičke karakteristike. Na primer, ako pritisak od 5 bar daje na izlazu iz senzora 10 mA, tada je osetljivost 2 mA/bar.

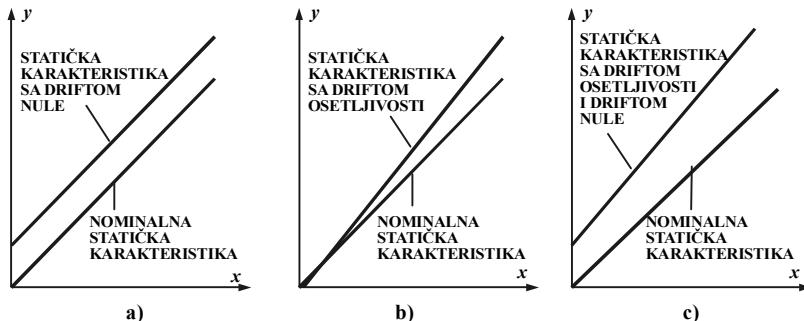
Osetljivost na poremećaje određuje uticaj vanjskih delovanja, pre svega temperature, na statičku karakteristiku senzora. Ovi uticaji najčešće se izražavaju kao drift nule i drift osetljivosti.

Drift je promena (nestabilnost) statičke karakteristike i, uopšte, metroloških parametara senzora koji se nalazi u običajenim uslovima upotrebe, u toku dužeg vremenskog perioda. Obično se izražava u procentima opsega.

Drift nule opisuje promene (nestabilnosti) očitanja izlaza za nultu vrednost ulaznog signala koje nastaju delovanjem vanjskih faktora. Drift nule obično se izražava u jedinicama merene veličine po jedinici temperature, s obzirom da je temperatura dominantan vanjski uticaj. Efekt drifta nule odražava se na pomicanje statičke karakteristike duž ordinate (slika 8.3a).

Drift osetljivosti određuje vrednost sa kojom se osetljivost senzora menja u zavisnosti od vanjskih uticaja. Efekat drifta osetljivosti odražava se kao promena nagiba statičke karakteristike (slika 8.3b). Temperaturni drift osetljivosti izražava se kao odnos jedinica izlaza i jedinica ulaza na temperaturnom intervalu 1 °C.

Drift nule i drift osetljivosti mogu delovati istovremeno, pa u tom slučaju statička karakteristika izgleda kao na slici 8.3c.



Slika 8.3. Nestabilnost statičke karakteristike: a) drift nule, b) drift osetljivosti, c) kombinovani drift

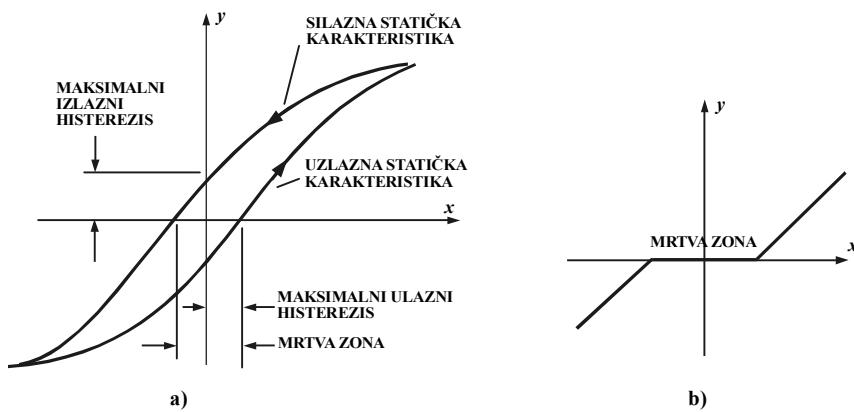
Histerezis je pojava nepodudaranja statičke krive $y_1(x)$ dobijene za rastuću sekvencu ulaznih vrednosti i statičke krive $y_2(x)$ dobijene za opadajuću sekvencu ulaznih vrednosti (slika 8.4a). Histerezis je posebno prisutan kod elektromehaničkih senzora i izražava se u procentima punog opsega na sledeći način:

$$H = \frac{|y_2 - y_1|_{\max}}{y_{\max} - y_{\min}} \cdot 100\%. \quad (8.10)$$

Mrtva zona je područje između dve vrednosti ulazne veličine kada nema nikakve promene ulazne veličine (slika 8.4b). Histerezis je uvek praćen mrvom zonom, ali se mrvna zona pojavljuje i kao zaseban efekat.

Prag osetljivosti je minimalna vrednost ulazne veličine koja će, pri njenom porastu od nule, izazvati promenu indikacije na izlazu. Najčešće se daje u procentima opsega, mada se ponekad izražava i kao absolutna vrednost.

Rezolucija govori koliki je minimalni priraštaj merene veličine koji će izazvati promenu indikacije na izlazu. Ponekad se izražava kao absolutna vrednost, a ponekad u procentima punog opsega. Za rezoluciju je najvažnije kako je opseg izdeljen na podeoke.



Slika 8.4. Nelinearni efekti: a) histerezis, b) mrvna zona

8.1.3. Parametarske zavisnosti statičke karakteristike

Promene statičke karakteristike zbog procesa starenja komponenata senzora ili zbog nestabilnosti izvora napajanja označavaju se kao parametarska zavisnost statičke karakteristike. Ove promene često se usled slabog poznavanja zanemaruju u praksi, mada ukupna greška koja se pri tome čini:

$$\Delta_{n,t} = y_{n,t} - y = (y_n - y) + (y_t - y) , \quad (8.11)$$

može da bude značajna. Indeks n,t označava realnu statičku karakteristiku pod uticajem parametra napajanja n i parametra starenja, izraženog vremenom t . Desna strana jednačine (8.11) odražava realnu pretpostavku da se proces starenja odvija nezavisno od promena napajanja.

Zavisnost statičke karakteristike od napajanja izražava se kao odstupanje realne statičke karakteristike od idealne:

$$\Delta_n = y_n - y . \quad (8.12)$$

Za određivanje opšte zavisnosti (8.12) vrši se eksperimentalno ispitivanje statičke karakteristike senzora tako što se vrednost napajanja menja skokovito (slika 8.5a). Iz oblika dobijenih krivih sada se mogu odrediti pokazatelji statičke karakteristike (osetljivost, histerezis, drift itd.) u funkciji promene napajanja. Obično je dovoljno da se odrede dva pokazatelia. Prvi je nestabilnost nule u funkciji napajanja. Izražava se u relativnom obliku u odnosu na ukupni opseg, kao:

$$\delta_n(0) = \frac{y_{n0} - y_0}{y_{\max} - y_0} , \quad (8.13)$$

gde su: y_{n0} izlaz senzora za nulli ulaz i promenjeno napajanje, y_0 i y_{\max} minimalna i maksimalna vrednost izlaza za nominalno (stabilno) napajanje.

Drugi pokazatelj statičke karakteristike koji pokazuje njenu zavisnost od promene napajanja je osetljivost. I osetljivost se u tom slučaju daje u relativnom obliku u odnosu na opseg:

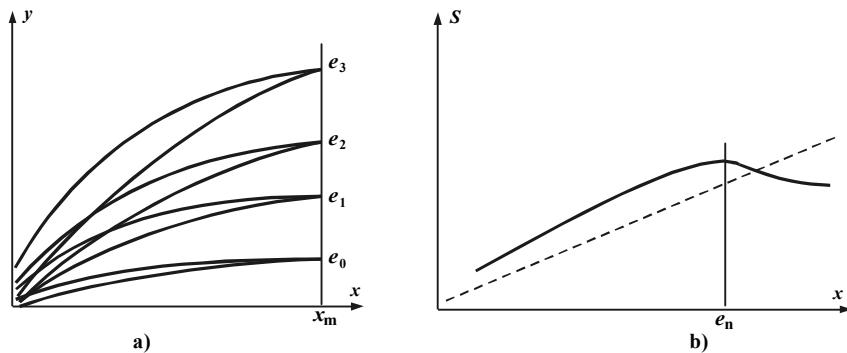
$$\delta_n(S) = \frac{S_n - S}{S} = \frac{y_{n\max} - y_{\max} - y_{n0} + y_0}{y_{\max} - y_0} , \quad (8.14)$$

gde su S i S_n osetljivost za nominalnu i promenjenu vrednost napajanja.

U praksi se za napajanje senzora upotrebljavaju kvalitetni izvori energije. Zato se opravdano može smatrati da je odstupanje napona od nominalne vrednosti malo, te da zbog toga nula i osetljivost linearno zavise od tog odstupanja:

$$\delta_n(0) = k_1 \Delta n \quad i \quad \delta_n(S) = k_2 \Delta n . \quad (8.15)$$

gde su k_1 i k_2 koeficijenti proporcionalnosti. Na slici 8.5b prikazana je osetljivost senzora sile u funkciji napona napajanja (puna linija) i njena linearizacija u okolini nominalne vrednosti napajanja.

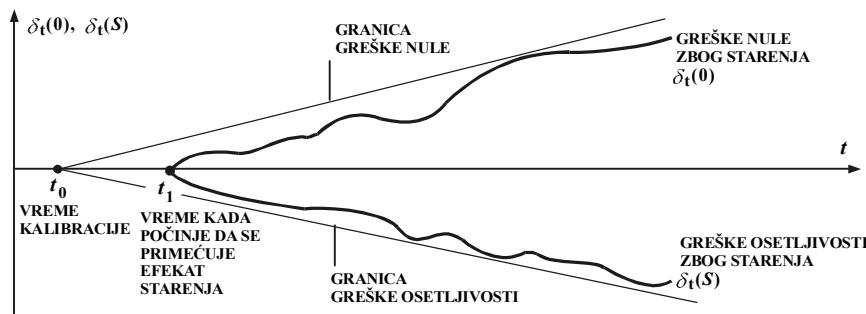


Slika 8.5. Uticaj napajanja na statičku karakteristiku: a) pri skokovitim promenama napona napajanja, b) zavisnost osetljivosti od napajanja

Uticaj starenja odnosi se na nestabilnost statičke karakteristike zbog starenja komponentenata senzora. Ovaj efekt primećuje se tek nakon dužeg vremena posle kalibracije, koja je provedena u trenutku t . Odstupanje realne statičke karakteristike od idealne zbog starenja je:

$$\Delta_t = y_t - y, \quad (8.16)$$

gde je y_t realna statička karakteristika, dobijena nakon vremena t , pošto je utvrđena idealna karakteristika senzora. Ovo odstupanje obično se predstavlja pomoću nestabilnosti nule ili osetljivosti, i to u relativnom obliku u odnosu na opseg merenja senzora, slično kao u prethodnom slučaju (slika 8.6).

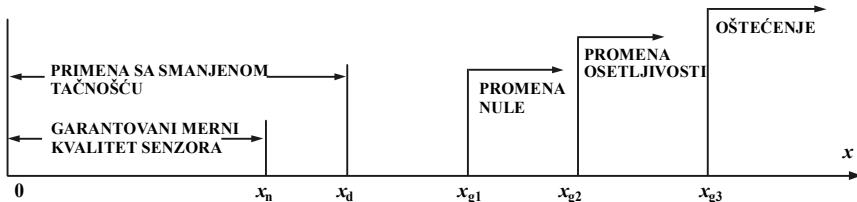


Slika 8.6. Relativna promena nule i osetljivosti senzora zbog starenja

Preopterećenje se odnosi na ponašanje senzora kada je merena veličina izvan mernog opsega. Senzor različito reaguje na stacionarno i dinamičko preopterećenje. Na slici 8.7 označene su tipične vrednosti ulaza koje su bitne za razmatranje stacionarnog preopterećenja:

- x_n nominalna vrednost ulaza do koje su metrološki kvaliteti senzora u potpunosti očuvani;
- x_d dopuštena vrednost ulaza do koje senzor meri ali sa smanjenom tačnošću;

- x_{g1} granična vrednost ulaza nakon čijeg delovanja se izlaz ne vraća u nulu;
- x_{g2} granična vrednost ulaza nakon čijeg delovanja se menja osetljivost senzora;
- x_{g3} granična vrednost ulaza koja delimično ili u potpunosti narušava funkcionalnost senzora.



Slika 8.7. Granične vrednosti preopterećenja

Uticaj drugih parametara. Statička karakteristika se u opštem slučaju može predstaviti i na sledeći način:

$$y = f(x, p_1, p_2, \dots, p_n), \quad (8.17)$$

gde su p_i parametri koji utiču na statičku karakteristiku (temperatura, pritisak, vlažnost, vibracije, električno i magnetno polje itd.). Kvalitativno i kvantitativno određenje ovih uticaja nije jednostavno. Otežavajuća okolnost je to što jedni parametri deluju proporcionalno na izlaz senzora (temperatura), delovanje drugih ima sumirajući efekt na izlazu (zračenje), a treći takođe deluju sumirajuće na izlaz, ali tako da se to oseti tek nakon izvesnog vremena (prašina, vlažnost). Analiza se značajno pojednostavljuje zahvaljujući činjenici da je delovanje parametara nezavisno, tako da se funkcija f svodi na zavisnost od samo dve promenljive:

$$y = f(x, p_i). \quad (8.18)$$

Ako se sada ova funkcija razvije u red, dobija se:

$$y = f(x) + \sum_{i=1}^n \frac{d^i f(x)}{dp_j^i} \Delta p_j. \quad (8.19)$$

U zavisnosti od karaktera izvoda funkcije $f(x)$ pod znakom sume, uticaji parametara klasifikuju se u tri grupe:

- 1) izvodi funkcije $f(x)$ po parametru p_i ne zavise od ulaza x , tako da je delovanje parametra na statičku karakteristiku aditivno;
- 2) Izvodi funkcije $f(x)$ po relevantnom parametru p_j su linearne sa tim parametrom, zbog čega se, pored aditivnog uticaja na statičku karakteristiku, menja i osetljivost senzora;
- 3) Izvodi funkcije $f(x)$ po parametru p_j su nelinearne sa tim parametrom, pa se zbog toga menjaju, praktično, svi pokazatelji statičke karakteristike.

8.1.4. Ekonomsko-tehnički parametri

Tehnički pokazatelji statičkih svojstava senzora su neophodni za ocenu mernih kvaliteta relevantnog senzora, ali i za poređenje sa drugim senzorima, tako da se za datu aplikaciju može izabrati najpovoljnija varijanta. Međutim, pored navedenih pokazatela, za tehničku praksu veliki značaj imaju cena nekog uredaja i cena njegovog održavanja.

Cena senzora je u direktnoj vezi sa njegovim metrološkim kvalitetom. Veća tačnost, osetljivost, rezolucija i sl. mogu se dobiti samo većim novčanim ulaganjima. Zato se o investicionim sredstvima za nabavku nekog senzora može raspravljati tek nakon što su tačno specificirani pokazatelji statičke karakteristike potrebeni za konkretnu aplikaciju. U tom poslu važnu ulogu imaju metrološko iskustvo, poznavanje i dostupnost tržišta, te raspoloživost proizvođačkih kataloga.

Investiciona sredstva za nabavku senzora ne određuju se samo na osnovu mernih kvaliteta. Isplati se uložiti veća sredstva za senzor sa istim mernim kvalitetima, ali sa boljim parametrima pouzdanosti i manjim troškovima održavanja. Prema tome, izbor adekvatnog senzora je izvestan kompromis između cene mernih kvaliteta, troškova pouzdanosti i održavanja, te tržišne cene.

8.2. DINAMIČKE KARAKTERISTIKE

8.2.1. Dinamičke karakteristike u vremenskoj oblasti

Pored statičkih karakteristika, veoma su bitne i dinamičke karakteristike senzora jer se senzori u automatskom upravljanju upotrebljavaju za merenje veličina koje se menjaju s vremenom. Dinamičke karakteristike opisuju ponašanje senzora nakon što se merena veličina promenila pa do trenutka kada se na izlazu ponovo uspostavi stacionarno stanje.

U vremenskoj oblasti dinamičko ponašanje senzora opisuje diferencijalna jednačina n -tog reda (8.1). Da bi se mogli upoređivati različiti senzori, na ulaz se dovode promene merene veličine u formi tipičnih ispitnih funkcija:

- skokovita funkcija: $x(t) = 1(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$ (8.20)

- nagibna funkcija: $x(t) = kt$ (8.21)

- sinusna funkcija: $x(t) = A \sin \omega t$. (8.22)

Osim ovih navedenih, upotrebljavaju se: impulsna Dirakova funkcija, eksponencijalna, trouglasta i četvrtasta. Dinamički odziv senzora je ponašanje izlazne veličine y u vremenu nakon što se ulazna veličina x promenila na način neke tipične funkcije. Za praktičnu analizu senzora u vremenskoj oblasti najviše se primenjuje skokovita funkcija, jer se ona najlakše realizuje. S obzirom da se na ulaz dovodi poznata funkcija, desna strana diferencijalne jednačine (8.1) svodi se na $b_0x(t)$.

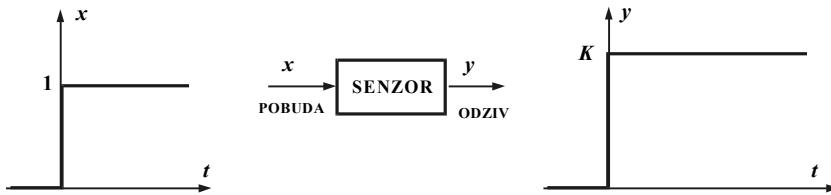
Odziv senzora nultog reda. Ako su svi koeficijenti na levoj strani diferencijalne jednačine (8.1) jednaki nuli, osim koeficijenta a_0 , tada se senzor ponaša kao sistem nultog reda. Odziv senzora kao sistema nultog reda na skokovitu promenu ulaza opisuje jednačina:

$$a_0 y(t) = b_0 x(t). \quad (8.23)$$

Odavde se dobija da je izlaz direktno proporcionalan ulaznoj veličini:

$$y(t) = Kx(t), \quad (8.24)$$

gde je $K = b_0/a_0$ koeficijent pojačanja sistema nultog reda, koji je zapravo jednak osjetljivosti. Sistem nultog reda naziva se još i bezinercioni sistem, jer bez ikakvog kašnjenja prati promene ulaza (slika 8.8). Kao primer ovakvog senzora može da se navede potenciometarski detektor pomaka: napona na izlazu u svakom trenutku proporcionalan je položaju klizača.



Slika 8.8. Odziv senzora kao sistema nultog reda na skokovitu promenu merene veličine

Odziv senzora kao sistema prvog reda. Realni senzori uvek imaju neku inerciju. Takav senzor je sistem prvog reda. To znači da su u opštoj diferencijalnoj jednačini (8.1) svi koeficijenti a_n, a_{n-1}, \dots, a_2 jednaki nuli, pa se ona svodi na:

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t). \quad (8.25)$$

Uobičajena forma pisanja diferencijalne jednačine prvog reda je:

$$T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = Kx(t), \quad (8.26)$$

gde su: $T = a_1/a_0$ vremenska konstanta senzora, izražena u sekundama ili minutama, i $K = b_0/a_0$ koeficijent pojačanja ili statičkog prenosa.

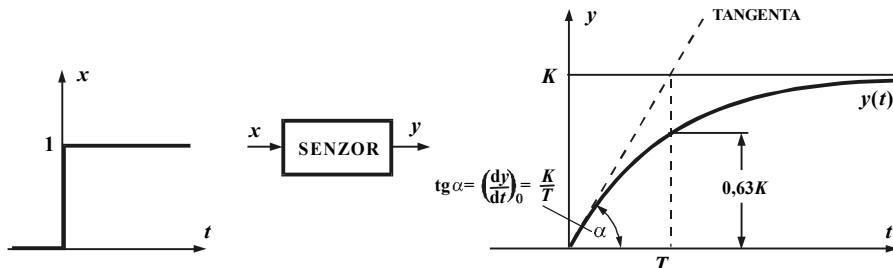
Za nulte početne uslove $y(0) = 0$ i jediničnu pobudu $x(t) = 1(t)$, rešenje diferencijalne jednačine (8.26) je:

$$y(t) = [y(0) - y(\infty)] e^{-t/T} + y(\infty) = K(1 - e^{-t/T}). \quad (8.27)$$

Vremenska konstanta senzora T rezultat je postojanja inercije (mehaničke, topotne, hidrauličke, pneumatske) i zbog toga odziv izlaza y nakon skokovite promene ulaza x ne može biti trenutan, već se iz starog stacionarnog stanja $y(0)$ aperiodski približava novom stacionarnom stanju $y(\infty)$. Što god je vremenska

konstanta manja i uticaj inercije na dinamiku odziva je manji, pa se odziv senzora prvog reda približava odzivu sistema nultog reda. Da bi greška u sistemu automatskog upravljanja zbog inercije senzora bila što manja, uobičajeno je da se upotrebljavaju senzori koji imaju vremensku konstantu bar za jedan red manju od vremenske konstante objekta upravljanja. Iz jednačine (8.27) dobije se da je $y(T) = 0,63K$, tj. odziv sistema dostiže 63% maksimalnog izlaza u trenutku $t=T$. Na osnovu toga može se odrediti vremenska konstanta grafički tako što se u tački $t=0$ na odziv povuče tangenta do preseka sa novim stacionarnim stanjem (slika 8.9).

Konstanta statičkog pojačanja dobija se kao razlika između novog i starog stacionarnog stanja, za jedinični skok ulaza.



Slika 8.9. Odziv senzora kao sistema prvog reda na skokovitu promenu merene veličine

Odziv senzora kao sistema drugog reda. Ako su svi koeficijenti: a_n, a_{n-1}, \dots, a_3 u jednačini (8.1) jednaki nuli, dinamičke promene izlaza koje su izazvane skokovitim promenama ulaza opisuje diferencijalna jednačina drugog reda:

$$a_2 \frac{d^2y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t) . \quad (8.28)$$

Uobičajeno je da se diferencijalna jednačina piše u kanonskoj formi kao:

$$T^2 \frac{d^2y(t)}{dt^2} + 2\xi T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = Kx(t) , \quad (8.29)$$

ili:

$$\frac{1}{\omega_n^2} \frac{d^2y(t)}{dt^2} + \frac{2\xi}{\omega_n} \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = Kx(t) , \quad (8.30)$$

gde su: $K = b_0/a_0$ koeficijent statičkog prenosa (osetljivost), $\omega_n = \sqrt{a_0/a_2}$ neprigušena prirodna frekvencija ili frekvencija sopstvenih oscilacija, $\xi = a_1/2\sqrt{a_0a_2}$ koeficijent prigušenja, pri čemu je $T = 1/\omega_n$. U zavisnosti od koeficijenta prigušenja ξ , mogući su sledeći oblici odziva za skokovitu promenu ulaza $x(t) = a \cdot 1(t)$ i nulte početne uslove:

- 1) Oscilatorno neprigušeni ili harmonijski odziv, koji se dobija kada je koeficijent prigušenja $\xi = 0$:

$$y(t) = Ka(1 - \cos \omega t) . \quad (8.31)$$

2) Oscilatorno prigušeni ili tzv. potprigušeni odziv, koji se dobija kada je koeficijent prigušenja $0 < \xi < 1$:

$$y(t) = Ka \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \sin \left(\omega_n \sqrt{1-\xi^2} t + \phi \right) \right]$$

$$\phi = \arctg \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}. \quad (8.32)$$

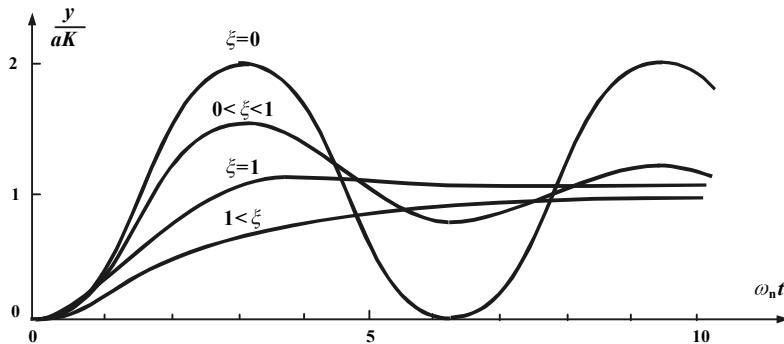
3) Kritički prigušeni odziv, koji se dobija kada je koeficijent prigušenja $\xi = 1$:

$$y(t) = Ka [1 - (1 + \omega_n t) e^{-\omega_n t}]. \quad (8.33)$$

4) Natkriticni prigušeni ili aperiodski odziv, koji se dobija kada je koeficijent prigušenja $\xi > 1$, pri čemu je $v = (\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}) / (\xi - \sqrt{\xi^2 - 1})$:

$$y(t) = Ka \left[1 - \frac{v}{v-1} (\sqrt{v} e^{-(\omega_n/\sqrt{v})t} - e^{-\omega_n \sqrt{v} t}) \right], \quad 0 < v < 1. \quad (8.34)$$

Na slici 8.10 predstavljeni su mogući odzivi senzora kao sistema drugog reda na skokovitu promenu ulaza. Na ordinatu je nanesen normirani odziv y/aK . Uočava se da senzor kao sistem drugog reda ima veliki preskok i veliko vreme smirivanja prigušenih oscilacija. Komercijalni elektromehanički merni uredaji obično se grade sa koeficijentom prigušenja $\xi = 0,6 - 0,8$, čime se postiže kompromis između brzine odziva i greške usled preskoka. Senzori u sistemima automatskog upravljanja sa negativnom povratnom spregom smeju imati samo aperiodski odziv, tj. koeficijent prigušenja $\xi > 1$, jer bi u protivnom sistem mogao biti nestabilan.



Slika 8.10. Odziv senzora kao sistema drugog reda na skokovitu promenu ulaza $x(t)=1(t)$

Senzor kao sistem višeg reda. Senzori kao sistemi višeg reda od dva retko se prave, jer se od senzora zahteva brza i tačna konverzija merenog signala. Senzor je višeg reda kada je sastavljen od nekoliko blokova u konverzionom lancu. Pri tome se vodi računa da se konstruktivno obezbedi da senzor kao celina ima aperiodski odziv na skokovitu promenu ulaza.

Uticaj vremena kašnjenja τ . Promena energije koja prati konverziju mere-nog signala u merni signal ne može biti trenutna. Zbog toga izlaz neće početi odmah da se menja nakon promene ulaza, već sa izvesnim zakašnjenjem. Vreme koje protekne od trenutka kada se desila promena na ulazu pa do trenutka kada izlaz počinje da se menja naziva se vreme kašnjenja. Ono je posebno izraženo kod mehaničkih, pneumatskih i hidrauličnih uređaja.

8.2.2. Parametri dinamičke karakteristike u vremenskoj oblasti

Parametri koji deklarišu dinamičko ponašanje senzora u vremenskoj oblasti dobijaju se iz oscilatorno prigušenog odziva senzora na skokovitu pobudu (slika 8.11).

Vreme kašnjenja τ ili mrtvo vreme je vreme koje protekne od trenutka kada se desi skokovita promena na ulazu pa do trenutka kada se indicira izlaz.

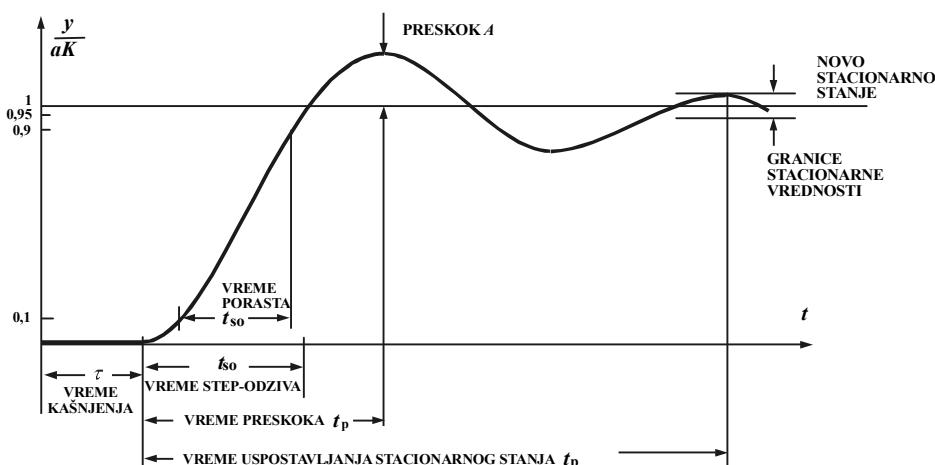
Vreme uspona (porasta) t_u definiše se kao vreme potrebno da se izlaz promeni od 10% do 90% novog stacionarnog stanja, i to pre pojave prvog preskoka.

Vreme uspostavljanja stacionarnog stanja t_s ili vreme smirivanja odreduje se kao vreme od trenutka kada se izlaz indicira pa do trenutka kada izlaz dospe unutar definisanih granica do $\pm 5\%$ konačne stacionarne vrednosti.

Vreme step-odziva t_{so} odreduje se iz odziva senzora na skokovitu promenu ulaza kao vreme potrebno da izlaz dostigne 95–99% novog stacionarnog stanja, i to pre pojave prvog preskoka.

Dominantna vremenska konstanta T definiše se kao vreme potrebno da ovojnica amplituda prelaznog procesa opadne na 37% svoje početne vrednosti.

Koefficijent statičkog pojačanja K odreduje se nakon jedinične skokovite promene ulaza kao razlika između novog i starog stacionarnog stanja.



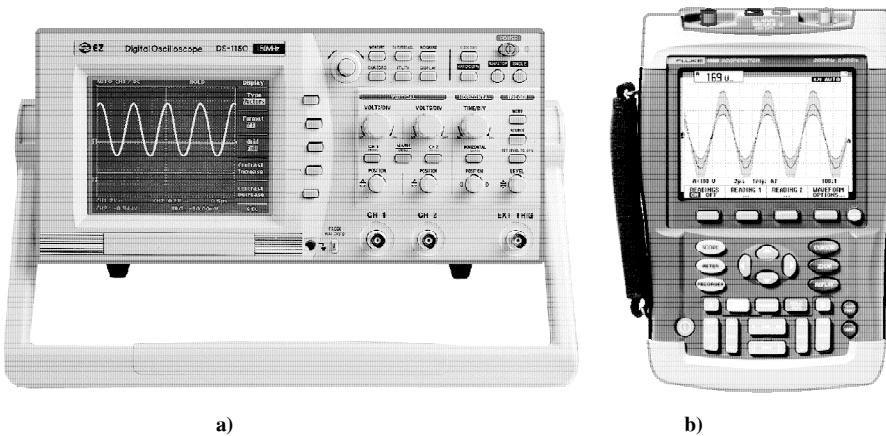
Slika 8.11. Parametri dinamičkog odziva senzora kao sistema drugog reda

Preskok A je maksimalno nadvišenje konačnog stacionarnog stanja, kada je na ulazu bila skokovita promena u iznosu punog ulaznog opsega. Zato se preskok, bilo prvi ili drugi, daje u procentima izlaznog opsega.

Vreme preskoka t_p je vreme potrebno da odziv dostigne prvi preskok.

Period oscilacija T_p je vremenski razmak između dva susedna maksimuma.

Na slici 8.12 prikazan je izgled savremenih digitalnih osciloskopa, pomoću kojih se dobijaju vremenski prikazi valnih oblika napona na ulazu i izlazu senzora. Ovi osciloskopi imaju širok frekventni opseg, memoriju za čuvanje snimljenih napona i interfejs za povezivanje sa računarom.



Slika 8.12. Digitalni osciloskop: a) laboratorijski tip, b) ručni

8.2.3. Prenosne funkcije senzora

Analiza dinamičkog ponašanja senzora u inženjerskoj praksi često se vrši primenom metode Laplasove transformacije, odnosno pomoću prenosne funkcije senzora. Prenosna funkcija je odnos Laplasove transformacije izlaza i ulaza senzora za nulte početne uslove. Opšti oblik prenosne funkcije dat je jednačinom (8.2).

Prenosna funkcija senzora kao sistema nultog reda dobija se transformacijom jednačine (8.24): $G(s) = Y(s)/X(s) = K$. Senzor kao sistem prvog reda opisan je diferencijalnom jednačinom (8.26), pa je njegova prenosna funkcija:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{Ts + 1}, \quad (8.35)$$

gde je K koeficijent statičkog prenosa senzora, a T vremenska konstanta.

Prenosna funkcija senzora kao sistema drugog reda dobija se Laplasovom transformacijom diferencijalne jednačine (8.29) pri nultim početnim uslovima:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1}. \quad (8.36)$$

Na osnovu diferencijalne jednačine (8.30), prenosna funkcija drugog reda može se pisati u sledećem obliku:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{(1/\omega_n^2)s^2 + (2\xi/\omega_n)s + 1} . \quad (8.37)$$

Prenosna funkcija senzora koji se primenjuje u sistemu automatske regulacije u opštem slučaju ima oblik aperiodskog bloka n -tog reda:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{(Ts + 1)^n} , \quad (8.38)$$

ali je, najčešće, $n=1$ ili $n=2$.

Analiza dinamičkog ponašanja senzora uz pomoć prenosnih funkcija je jednostavnija i brže dovodi do rezultata. Izlaz u vremenskoj oblasti dobija se kao inverzna Laplasova transformacija racionalnog razlomka:

$$y(t) = \mathcal{L}^{-1}\{G(s)X(s)\} = \mathcal{L}^{-1}\left\{\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{s-s_i}\right\} = \sum_{i=1}^n C_i e^{s_i t}, \quad (8.39)$$

gde je $X(s)$ Laplasova transformacija skokovite, impulsne, nagibne ili sinusne promene ulaznog signala senzora.

Kada postoji kašnjenje u izlaznom signalu, prenosna funkcija senzora ima oblik:

$$G_\tau(s) = G(s) \cdot e^{-\tau s}, \quad (8.40)$$

gde je τ vreme kašnjenja, a $G(s)$ jedna od prethodno definisanih funkcija senzora.

8.2.4. Dinamičke karakteristike u frekventnoj oblasti

Dinamička svojstva senzora često se prikazuju u frekventnoj oblasti pomoću funkcija frekventnog odziva. Ove funkcije opisuju zavisnost amplitudne i faze sinusne prenosne funkcije od frekvencije ulaznog harmonijskog signala. Sinusna prenosna funkcija $G(j\omega)$ dobija se iz prenosne funkcije $G(s)$ zamenom operatora s operatorom $j\omega$. Osnova za istraživanje frekventnog odziva je sinusno promenljivi signal:

$$x(t) = A \sin \omega t, \quad (8.41)$$

koji se dovodi na ulaz senzora, zbog čega realni deo kompleksne promenljive s i jeste jednak nuli, tj. $s = j\omega$.

Izlaz će takođe biti sinusni signal iste frekvencije, ali neke druge amplitude B i sa faznim kašnjenjem ϕ u odnosu na ulaz:

$$y(t) = B \sin (\omega t + \phi). \quad (8.42)$$

Odnos ova dva harmonijska signala predstavljena u kompleksnom obliku je frekventni odziv ili sinusna prenosna funkcija:

$$\frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = G(j\omega) = |G(j\omega)| e^{j\phi(\omega)}. \quad (8.43)$$

Funkcije frekventnog odziva su amplitudno-frekventna karakteristika, koja predstavlja zavisnost amplitude $|G(j\omega)|$ od frekvencije, i fazno-frekventna karakteristika, tj. zavisnost faze $\phi(\omega)$ od frekvencije ω ulaznog signala. Ove karakteristike mogu se iskazati pomoću realnog i imaginarnog dela funkcije frekventnog odziva:

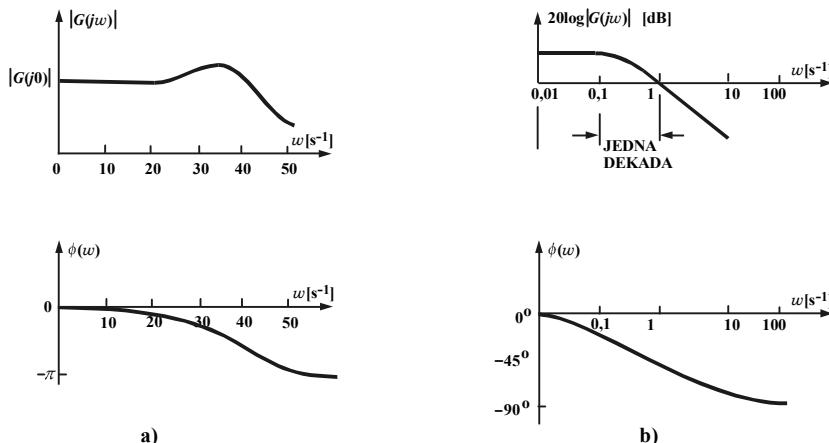
$$|G(j\omega)| = \sqrt{\operatorname{Re} G(j\omega)^2 + \operatorname{Im} G(j\omega)^2}, \quad (8.44)$$

$$\phi(\omega) = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\operatorname{Im} G(j\omega)}{\operatorname{Re} G(j\omega)}. \quad (8.45)$$

Grafički prikaz frekventnih karakteristika. Frekventne karakteristike prikazuju se na tri načina. Prvi način ilustrovan je na slici 8.13a. Nedostatak ovog načinje linearna razmara po apscisi, tako da je teško na jednom dijagramu istovremeno predstaviti dinamičke pojave u oblasti nižih i viših frekvencija.

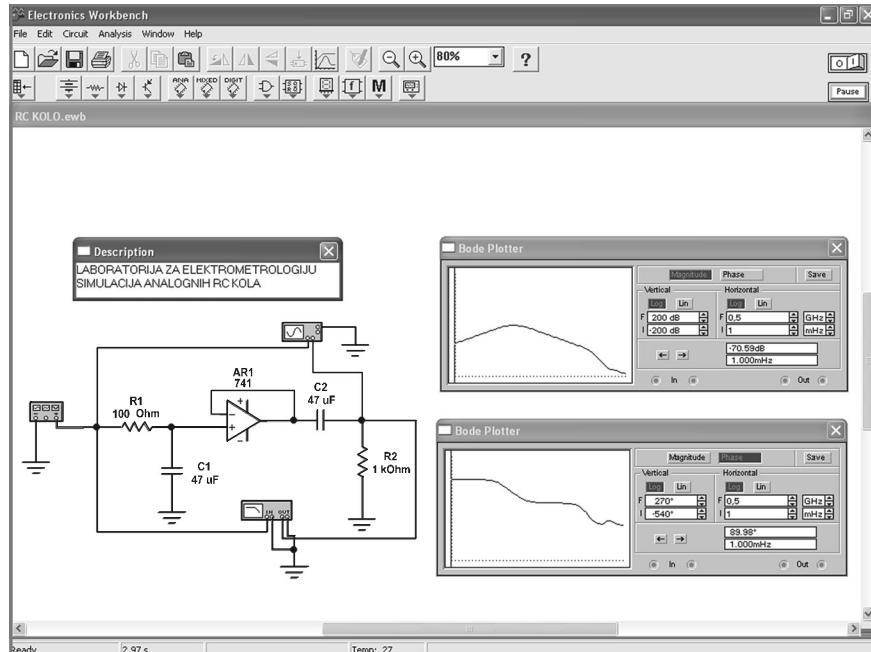
Ovaj nedostatak prevazilazi se logaritamskim ili Bodeovim prikazom frekventnih karakteristika (slika 8.13b). Prednost ovog načina ogleda se u tome što je frekvencija na apscisi nanesena u logaritamskoj razmeri, tako da je razmak između dve suksesivne dekade frekvencija uvek isti. To omogućava da se na istom dijagramu predstave dinamičke pojave u raznim delovima frekventnog opsega. Ordinata amplitudno-frekventnog dijagrama je linear, najčešće u decibelima (dB). Ordinata fazno-frekventnog dijagrama takođe je linear, u stepenima ili radijanima.

Treći način predstavljanja frekventnog odziva je neposredni polarni prikaz u kompleksnoj ravni, uz pretpostavku da se frekvencija ω menja od nule do beskonačnosti.



Slika 8.13. Frekventne karakteristike senzora: a) sa linearnom razmerom na apscisi, b) Bodeov prikaz

Na slici 8.14 prikazan je rezultat analize aktivnog RC kola pomoću programa EWB (Electronic WorkBench). Na Bodeovom ploteru dati su frekventni dijagrami kola sa prenosnom funkcijom $G(s)=1/(RCs+1)^2$.



Slika 8.14. Bodeovi dijagrami aktivnog RC kola, simulacija u programu EWB

Frekventne karakteristike senzora kao sistema prvog reda. Frekventni odziv senzora kao sistema prvog reda dobija se iz prenosne funkcije smenom $s=j\omega$:

$$G(j\omega) = \frac{K}{jT\omega + 1} . \quad (8.46)$$

Logaritamska amplitudno-frekventna karakteristika (slika 8.15a) dobija se kao logaritam modula kompleksnog izraza (8.46):

$$20 \log|G(j\omega)| = 20 \log \frac{K}{\sqrt{1 + (\omega T)^2}} , \quad (8.47)$$

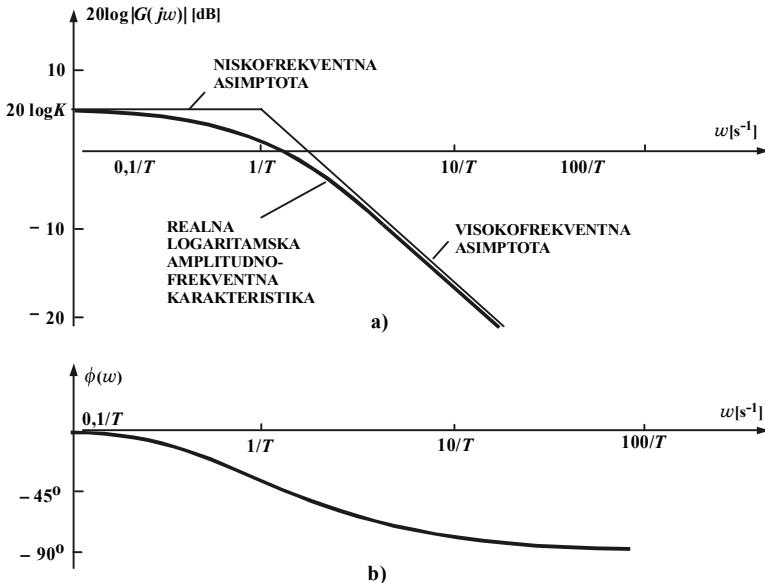
a fazno-frekventna karakteristika (slika 8.15b) kao faza kompleksnog izraza (8.46):

$$\phi(\omega) = -\text{arc tg}(\omega t) . \quad (8.48)$$

Niskofrekventna asimptota ($\omega \ll 1/T$) je horizontalni pravac $20 \log K$, a visokofrekventna asimptota ($\omega \gg 1/T$) je pravac $-20 \log(\omega t)$ sa negativnim nagibom od 20 dB po dekadi frekvencije. Tačka loma amplitudno-frekventne karakteristike, odnosno prelaz sa niskofrekventne na visokofrekventnu asimptotu, odredena je sa $\omega = 1/T$. Važan parametar amplitudno-frekventne karakteristike je frekventni opseg

(propusni opseg) ω_e , unutar kojeg odnos amplituda izlaznog i ulaznog signala ne pada ispod $\sqrt{2}/2 = 0,707$, odnosno ispod $20 \cdot \log 0,707 = -3 \text{ dB}$.

Fazno-frekventna karakteristika (8.48) za niske frekvencije $\omega \ll 1/T$ ima vrednost 0° , a za visoke frekvencije $\omega \gg 1/T$ ima vrednost -90° .



Slika 8.15. Frekventne karakteristike senzora kao sistema prvog reda: a) amplitudno-frekventna
b) fazno-frekventna

Frekventne karakteristike senzora kao sistema drugog reda. Imajući u vidu prenosnu funkciju senzora kao sistema drugog reda (8.37), zamenom operatora s operatorom $j\omega$ dobija se frekventni odziv:

$$G(j\omega) = \frac{K}{1 - (\omega/\omega_n)^2 + j 2\xi\omega/\omega_n} . \quad (8.49)$$

Logaritam modula ove funkcije ili logaritamska amplitudno-frekventna karakteristika ima sledeći oblik:

$$20 \log |G(j\omega)| = 20 \log \frac{K}{\sqrt{(1 - (\omega/\omega_n)^2)^2 + (2\xi\omega/\omega_n)^2}} . \quad (8.50)$$

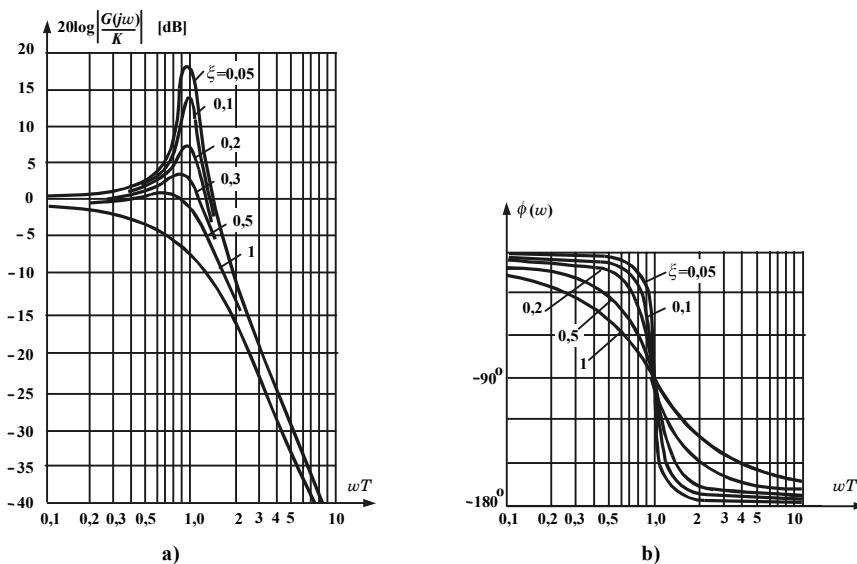
Niskofrekventna asimptota je pravac $20 \cdot \log K$, a visokofrekventna asimptota je pravac $20 \cdot \log K - 40 \cdot \log(\omega/\omega_n)$ sa negativnim nagibom od -40 dB po dekadi frekvencije (slika 8.16a). Vidi se da sve krive za $\xi > 0,707$ leže ispod asimptota, a za $\xi < 0,707$ svaka kriva ima maksimum, koji ima beskonačnu vrednost za $\xi = 0$. Ovaj maksimum označava se kao **rezonansa**, a pripadna frekvencija kao rezonantna frekvencija, koja je jednaka $\omega_r = \omega_n \cdot \sqrt{1 - \xi^2}$.

Fazno-frekventna karakteristika određena je sledećim izrazom:

$$\phi(\omega) = -\text{arc tg} \frac{2\xi(\omega/\omega_n)}{1 - (\omega/\omega_n)^2} \quad (8.51)$$

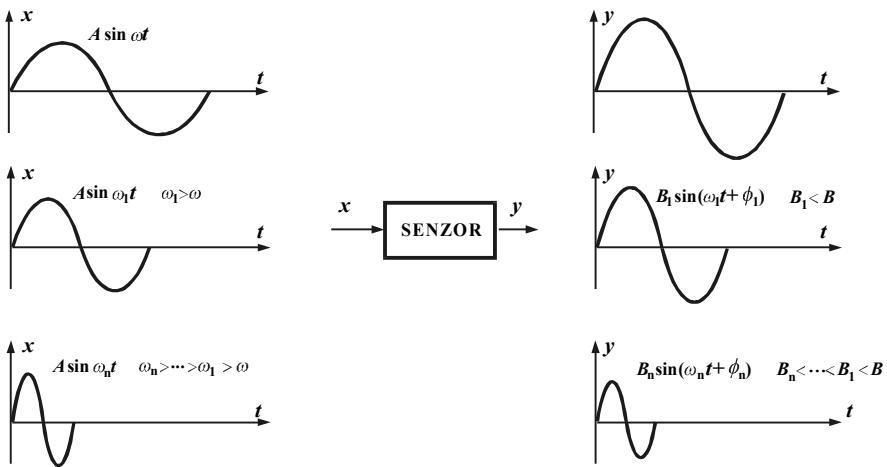
i prikazana je na slici 8.16b.

Eksperimentalno određivanje frekventnih karakteristika. Velika prednost izučavanja dinamičkog ponašanja na osnovu frekventnih karakteristika je u jednostavnosti ove metode, pa je u različitim oblastima tehničke prakse tradicionalno zastupljena. Primjenjuje se takođe i u tehnici senzora.



Slika 8.16. Logaritamske frekventne karakteristike senzora kao sistema drugog reda:
a) amplitudno-frekventna u normalizovanom obliku, b) fazno-frekventna

Eksperimentalno određivanje amplitudno-frekventne karakteristike provodi se dovodenjem sinusnog signala $A \sin \omega t$ na ulaz senzora. Na izlazu se registruje sinusni signal iste frekvencije, ali druge amplitude, $B \sin(\omega t + \phi)$. Zatim se frekvencija ulaznog signala poveća pri konstantnoj amplitudi, tako da je na ulazu $A \sin \omega_1 t$. Na izlazu je sinusni signal $B_1 \sin(\omega_1 t + \phi_1)$ pri čemu je $B_1 < B$. Kao što se vidi iz jednačine (8.43), amplitudno-frekventna karakteristika jednaka je odnosu amplitude izlaznog i amplitude ulaznog signala. Postupak se ponavlja za sledeću veću frekvenciju, kako to ilustruje slika 8.17. Uobičajeno je da se zbog grafičke kompaktnosti crta normirana amplitudno-frekventna karakteristika. Ona se dobija tako što se na ordinatu nanosi relativna promena odnosa amplituda $(B_i/A)/(B/A) = B_i/B$ odnosno odgovarajući logaritam $20 \log(B_i/B)$. Početnu frekvenciju ω treba odabratи dovoljno malom, tako da ne bude nikakvog prigušenja amplitude izlaznog signala. Eksperimentalno određivanje amplitudno-frekventne karakteristike mnogo je jednostavnije pomoću generatora sa prebrisavanjem frekvencija (*sweep, vobler*). To je generator koji daje harmonijski signal čija se frekvencija menja automatski od minimalne do maksimalne vrednosti, zavisno od odabranog opsega.



Slika 8.17. Eksperimentalno određivanje amplitudno-frekventne karakteristike

Pri crtanju amplitudno-frekventne karakteristike korisno je eksperimentalne podatke zapisivati na način koji je prikazan na tabeli 8.1.

$\omega [s^{-1}]$	1	5	10	12	15
B_i/B	1	0,90	0,80	0,707	0,6
$20 \cdot \log(B_i/B) [\text{dB}]$	0	-0,92	-1,93	-3,00	-4,44

Tabela 8.1. Podaci za crtanje amplitudno-frekventne karakteristike

Eksperimentalno određivanje fazno-frekventne karakteristike nije jednostavno jer je često priroda signala na ulazu i izlazu različita. Ako je ove signale moguće pomoću drugih mernih uređaja pretvoriti u električni signal, tada se faza na datoj frekvenciji $\omega = 2\pi/T$ može odrediti pomoću dvokanalnog osciloskopa merenjem vremenskog intervala t_ϕ između identičnih tačaka ulaznog i izlaznog signala: $\phi(\omega)/360 = t_\phi/T$, odnosno $\phi(\omega) = t_\phi \cdot 360/T [^\circ]$. Primenjuje se i metod Lisažuovih figura. Lisažuove figure dobijaju se pomoću osciloskopa tako što se na x-osu osciloskopa dovodi ulazni signal senzora, a na y-osu izlazni signal senzora. Razlika u fazi ova dva signala je tražena karakteristika $\phi(\omega)$, koja utiče na oblik figure. U teoriji električnih merenja daju se tipični oblici Lisažuovih figura, na osnovu čega se može izračunati faza $\phi(\omega)$.

8.2.5. Odnos parametara dinamičkih karakteristika u vremenskoj i frekventnoj oblasti

Parametri dinamičkog ponašanja u vremenskoj oblasti, koji su vezani za prelazni proces nakon skokovite promene ulaza, i parametri dinamičkog ponašanja u frekventnoj oblasti, koji su vezani za frekventni odziv, međusobno su povezani. Upoređivanje ovih parametara može se, na primer, provesti za senzor kao sistem drugog reda.

Zavisnost preskoka A od koeficijenta prigušenja povezuje relacija:

$$A = e^{-\pi \xi / \sqrt{1-\xi^2}} . \quad (8.52)$$

Vreme preskoka se može izraziti kao:

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}} . \quad (8.53)$$

Vreme uspona se procenjuje na osnovu širine frekventnog opsega ω_g :

$$t_u \approx \frac{1}{\omega_g} . \quad (8.54)$$

Za vreme smirivanja važi nejednakost:

$$\frac{3}{\omega_g} < t_s < \frac{5}{\omega_g} . \quad (8.55)$$

8.3. METODI POVEĆANJA TAČNOSTI SENZORA

8.3.1. Tačnost statičkog prenosa

Jedan od glavnih zadataka u tehničkoj metrologiji je razvoj i primena metoda za povećanje kvaliteta merenja. U tehnici senzora kvalitet merenja postiže se, pre svega, povećanjem tačnosti senzora. Opšti metod za povećanje tačnosti je konstruktivno-tehnološke prirode i usmeren je na smanjivanje i otklanjanje izvora grešaka merenja. Za realizaciju tog metoda potrebni su kvalitetniji elementi, materijali sa stabilnim karakteristikama, tehnički racionalni projekti gradnje i tehnološki razvijena proizvodnja. Ovaj metod daje dobre rezultate, ali njegova primena u pravilu poskupljuje senzor.

Prvi korak u realizaciji tačnijeg senzora je analiza parametara statičke i dinamičke karakteristike. Praktični metodi koji se najviše primenjuju zasnivaju se na kompenzaciji sistema greške na osnovu rezultata kalibracije. Ovakav pristup opravдан je u laboratorijskim uslovima. U situaciji kada je senzor uključen u sistem upravljanja potrebna su odredena redundantna sredstva da bi se povećala tačnost.

Statička greška mernog lanca. Veoma često senzor se sastoji od nekoliko serijski povezanih blokova, koji čine merni lanac (slika 7.3.b). Svaki blok ima svoj koeficijent statičkog prenosa K_i , pa je statička karakteristika senzora

$$y = \prod_{i=1}^n K_i \cdot x . \quad (8.56)$$

Kao što je istaknuto, mnogobrojni su razlozi zbog kojih može da dođe do promene koeficijenta K_i . Zbog toga će se realna statička karakteristika senzora razlikovati od idealne (8.56). Ovo odstupanje je sistemska greška. Apsolutna vrednost greške jednaka je sumi parcijalnih grešaka:

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \frac{\partial y}{\partial K_i} \Delta K_i = \sum_{i=1}^n \left[\prod_{j=1, j \neq i}^n K_j \right] \Delta K_i \cdot x , \quad (8.57)$$

a relativna greška je:

$$\frac{\Delta y}{y} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta K_i}{K_i} . \quad (8.58)$$

Sabirak $\Delta K_i / K_i$ odreduje relativnu grešku, koja je uzrokovana promenama u i -tom bloku serijske veze.

Greška se često izražava u zavisnosti od merene veličine x (svi poremećaji deluju na ulazu u senzor), odnosno računa se kao $\Delta x/x$. S obzirom da je $y' \approx \Delta y/\Delta x$, relativna greška na ulazu senzora je:

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta y}{y} \frac{y}{y/x} . \quad (8.59)$$

Iz ove jednačine direktno sledi da su relativne greške na ulazu i izlazu senzora jednake kada su blokovi u serijskoj vezi linearni. Za inženjerske realizacije interesantan je slučaj kada jedan od blokova u serijskoj vezi ima nelinearnu statičku karakteristiku:

$$y = Kx^a , \quad (8.60)$$

pa je tada relativna greška na izlazu, usled nestabilnosti koeficijenta prenosa K :

$$\frac{\Delta y}{y} = \frac{\Delta K}{K} , \quad (8.61)$$

a relativna greška na ulazu senzora je:

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{1}{a} \frac{\Delta y}{y} . \quad (8.62)$$

Odavde se zaključuje da će za $a < 1$ greška u odnosu na merenu veličinu x biti $1/a$ puta veća kad postoji nelinearnost, odnosno da će za $a > 1$ greška biti a puta manja. Na primer, kod termoelemenata kao senzora temperature generisani termoelektrični napon je:

$$E = k_1 \Delta T + k_2 \Delta T^2 + \dots + k_n \Delta T^n , \quad (8.63)$$

pa će nestabilnost koeficijenata k_i proizvesti ekvivalentnu grešku na ulazu:

$$\frac{\Delta T}{T} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \frac{\Delta k_i}{k_i} , \quad (8.64)$$

iz čega se vidi da je uticaj i -te komponente, koja nastaje zbog nestabilnosti koeficijenta k_i , tim manji što je i veće.

Statička greška senzora sa paralelnom vezom. Ako se senzor sastoji od paralelnih blokova sa statičkim karakteristikama:

$$y_i = K_i \cdot x, \quad (8.65)$$

onda je statička karakteristika senzora data sa:

$$y = \left(\sum_{i=1}^n K_i \right) \cdot x. \quad (8.66)$$

Relativna greška zbog nestabilnosti koeficijenata statičkog prenosa K_i :

$$\frac{\Delta y}{y} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta K_i}{\sum_{i=1}^n K_i} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta K_i / n}{\sum_{i=1}^n K_i / n} = \frac{\Delta K_{sr}}{K_{sr}}, \quad (8.67)$$

kao što se vidi, jednaka je relativnoj promeni koeficijenta statičkog prenosa bloka sa osrednjem karakteristikom.

Statička greška senzora sa kompenzacijom merene veličine. S obzirom na strukturu ovakvih senzora, (slika 7.4.a), njihova statička karakteristika je:

$$y = \frac{K_{dir}}{1 + K_{dir} \cdot K_{ps}} x, \quad (8.68)$$

gde su K_{dir} i K_{ps} koeficijenti statičkog prenosa bloka u direktnoj i povratnoj grani.

Ukupna apsolutna greška zbog nestabilnosti ovih koeficijenata računa se na osnovu pravila o složenoj grešci, tj. kao totalni diferencijal:

$$\begin{aligned} \Delta y &= \frac{\partial y}{\partial K_{dir}} \Delta K_{dir} + \frac{\partial y}{\partial K_{ps}} \Delta K_{ps} = \\ &= \frac{x}{(1 + K_{dir} \cdot K_{ps})^2} \Delta K_{dir} - \frac{K_{dir}^2 x}{(1 + K_{dir} \cdot K_{ps})^2} \Delta K_{ps}. \end{aligned} \quad (8.69)$$

Odavde se može izvesti izraz za ukupnu relativnu grešku:

$$\frac{\Delta y}{y} = \frac{1}{1 + K_{dir} \cdot K_{ps}} \cdot \frac{\Delta K_{dir}}{K_{dir}} - \frac{K_{dir} \cdot K_{ps}}{1 + K_{dir} \cdot K_{ps}} \cdot \frac{\Delta K_{ps}}{K_{ps}}, \quad (8.70)$$

gde su $\Delta K_{dir} / K_{dir}$ i $\Delta K_{ps} / K_{ps}$ multiplikativne greške bloka u direktnoj grani i bloka u povratnoj sprezi. Iz jednačine (8.70) vidi se da će greška senzora zbog nestabilnosti koeficijenta K_{dir} biti manja što je $(1 + K_{dir} \cdot K_{ps}) \gg 1$, odnosno kada je $K_{dir} \cdot K_{ps} \gg 1$. Ovaj uslov nije teško ispuniti jer je u direktnoj grani kompenzacionog uređaja najčešće pojačavač sa velikim pojačanjem. Tako se jednačina (8.70) svodi na jednostavan oblik:

$$\frac{\Delta y}{y} = -\frac{\Delta K_{ps}}{K_{ps}}. \quad (8.71)$$

Ovaj izraz je veoma važan jer pokazuje da multiplikativna greška na izlazu zavisi jedino od nestabilnosti koeficijenta statičkog pojačanja bloka u povratnoj grani. Nestabilnost koeficijenta pojačanja bloka u direktnoj grani K_{dir} ne utiče na tačnost ako je ispunjen uslov $K_{\text{dir}} \cdot K_{\text{ps}} >> 1$. Kompenzacioni metod omogućava izvanredan kvalitet statičkog prenosa jer se blok u povratnoj grani pravi od jednostavnih elemenata koji daju stabilan koeficijent statičkog prenosa K_{ps} .

8.3.2. Tačnost dinamičkog prenosa

Dinamička greška senzora je funkcija vremena i određuje se kao apsolutno odstupanje stvarne od idealne vrednosti ulaza:

$$\Delta x(t) = \frac{1}{K} \mathcal{L}^{-1}\{G(s)X(s)\} - x(t) \quad (8.72)$$

ili kao apsolutno odstupanje stvarne od idealne vrednosti izlaza:

$$\Delta Y(s) = G(s)X(s) - G_i(s)X(s), \quad (8.73)$$

gde su $G(s)$ i $G_i(s)$ prenosne funkcije realnog, odnosno idealnog senzora.

Kako je idealni senzor bezinercioni uredaj, za prenosnu funkciju $G_i(s)$ važi:

$$G_i(s) = G_i(0) = K. \quad (8.74)$$

Zbog toga će relativna dinamička greška na izlazu, na osnovu jednačine (8.73), biti:

$$\delta_r(s) = \frac{\Delta Y(s)}{KX(s)} = \frac{G(s)}{K} - 1, \quad (8.75)$$

odakle sledi da je:

$$\delta_r(s)X(s) = \frac{\Delta Y(s)}{K} = \frac{K\Delta X(s)}{K} = \Delta X(s), \quad (8.76)$$

Spajajući levi i desni kraj jednačine (8.76), dobija se da je apsolutna dinamička greška na ulazu:

$$\Delta x(t) = \mathcal{L}^{-1}\{\delta_r(s)X(s)\}. \quad (8.77)$$

Analiza dinamičke greške vrši se pod prepostavkom da se na ulaz dovodi jedan od tipičnih test-signalata. Ako je, na primer, prenosna funkcija senzora $G(s) = 1/(Ts + 1)$, tada je na osnovu jednačine (8.75), $\delta_r(s) = -Ts/(Ts + 1)$. Dovede li na ulaz skokovita promena merene veličine $X(s) = a/s$, sledi da će apsolutna greška na ulazu opadati po eksponencijalnom zakonu $\Delta x(t) = a \cdot \exp(-t/T)$.

Dinamička greška u frekventnom području. Promena dinamičke greške na izlazu senzora u zavisnosti od frekvencije harmonijskog signala na ulazu izražava se

funkcijom frekventnog odziva. Iz jednačine (8.76), uvođenjem smjene $s=j\omega$, dobija se sledeći izraz:

$$\delta_r(j\omega) = \frac{G(j\omega)}{K} - 1. \quad (8.78)$$

Odavde, dalje, nije teško odrediti amplitudno-frekventnu i fazno-frekventnu karakteristiku dinamičke greške datog senzora.

8.3.3. Automatska korekcija statičke tačnosti

Prethodna analiza tačnosti statičkog prenosa, kao i odgovarajuća korekcija na nivou kalibracije, vrši se u laboratorijskim uslovima, u toku projektovanja senzora. Za automatsku korekciju tačnosti senzora koji su uključeni u sistem automatskog upravljanja potrebna su određena redundantna sredstva i adekvatan softver.

Metod strukturne redundanse za korekciju tačnosti zasniva se na dodatnim hardverskim sredstvima. Ovaj metod pogodan je za korekciju aditivne i multiplikativne greške. Merena veličina x i aditivna smetnja f prenose se kroz senzor nezavisnim kanalima, pa je izlazni signal senzora:

$$y_1 = Kx + \Delta_a = Kx + K_{sf}f, \quad (8.79)$$

gde je aditivna greška

$$\Delta_a = K_{sf}f \quad (8.80)$$

nastala kao rezultat ukupnog delovanja smetnji f . Aditivne greške koriguju se strukturnim metodom, dodavanjem kompenzacionog senzora i uređaja za upoređivanje.

U poludiferencijalnoj šemi na ulaz kompenzacionog senzora dovodi se nulta vrednost merene veličine ($x=x_0$). Važno je da se osigura da na njega deluje ista smetnja f kao i na aktivni senzor jer je tada izlaz $y=Kx$ (slika 8.18a). Kompenzacija aditivne greške je bolja što god su koeficijenti prenosa greške K_{sf} i K_{kf} mernog i kompenzacionog senzora bliži po vrednosti. To se postiže uzimanjem senzora od istog proizvodača, po mogućnosti iz istog pakovanja. U diferencijalnoj šemi merena veličina deluje na jedan senzor sa pozitivnim, a na drugi sa negativnim predznakom, pa je izlaz $y=2Kx$ (slika 8.18b). Osim što je anulirana aditivna greška, ovde je postignut dvostruko veći merni opseg ($2x$) i osetljivost na pozitivne i negativne vrednosti merene veličine.

Ako senzor ima multiplikativnu grešku Δ_s na svom izlazu, odnosno:

$$y_s = K_s x (1 + \Delta_s), \quad (8.81)$$

tada je za korekciju neophodan delitelj (slika 8.18c). Na ulazu kompenzacionog senzora je neka konstantna vrednost merene veličine $x=x_c \neq 0$, a na njegovom izlazu:

$$y_k = K_k x_c (1 + \Delta_k). \quad (8.82)$$

Izlazni signal iz delitelja:

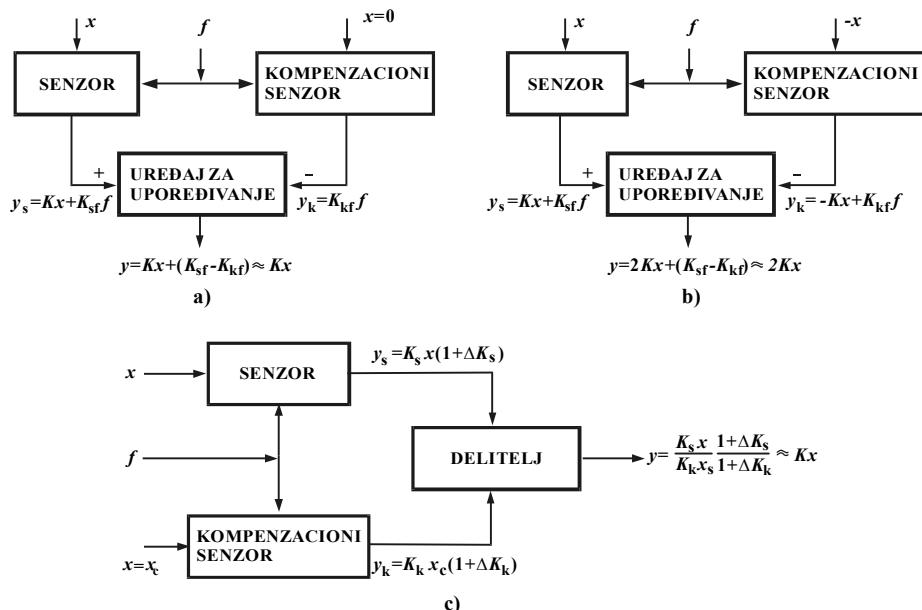
$$y = \frac{y_s}{y_k} = \frac{K_s x}{K_k x_c} \frac{1 + \Delta_s}{1 + \Delta_k}, \quad (8.83)$$

pojednostavljuje se za slučaj kada su oba senzora bliskih karakteristika. Tada se može smatrati da je $\Delta_s = \Delta_k$ i dobija se izraz:

$$y = \frac{y_s}{y_k} = \frac{K_s}{K_k x_c} x, \quad (8.84)$$

koji ne sadrži multiplikativnu grešku.

Najbolji rezultati postižu se kombinovanom struktrom, koja kompenzira i aditivnu i multiplikativnu grešku. Strukturni metod primenjuje se onda kada postoji neka dominantna smetnja, npr. temperatura, čije je delovanje na tačnost statičkog prenosa dobro izučeno. Metod je jednostavan za praktičnu primenu, posebno kada su u pitanju otpornički ili kapacitivni senzori u mosnom spoju.

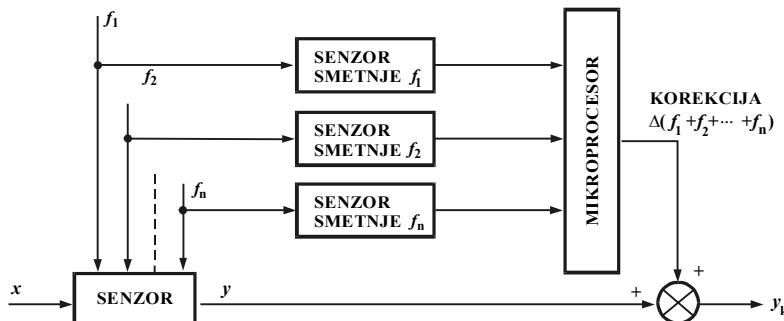


Slika 8.18. Strukturalna kompenzacija: a) poludiferencijalna šema za kompenzaciju aditivne greške, b) diferencijalna šema za kompenzaciju aditivne greške, c) kompenzacija multiplikativne greške

Metod merenja smetnji radi korekcije netačnosti senzora zasniva se na istovremenom merenju smetnji f_i pomoću dodatnih mernih uređaja – senzora smetnji, (slika 8.19). Za primenu ovog metoda potrebno je tačno poznavanje greške senzora u funkciji smetnji:

$$\Delta = f(f_1, f_2, \dots, f_n). \quad (8.85)$$

Nedostatak ovog metoda sa praktičnog aspekta je u tome što je potrebno tačno poznavanje delovanja svake pojedine smetnje. Osim toga, za merenje svake smetnje neophodan je i odgovarajući senzor.



Slika 8.19. Automatska korekcija tačnosti metodom merenja smetnji

Metod referentnih vrednosti ulaza pogodan je za korekciju tačnosti senzora sa nelinearnim statičkim karakteristikama, kao što su npr. termoelement ili termotopornik. Nelinearna statička karakteristika ima formu polinoma n -tog reda:

$$y = \sum_{i=1}^n a_i x^{i-1}. \quad (8.86)$$

Metod se primenjuje u $n+1$ etapa. U prvoj etapi meri se izlaz y_0 , pri čemu tačna vrednost merene veličine x nije poznata, tako da se na osnovu (8.86) dobija:

$$y_0 = \sum_{i=1}^n a_i x_r^{i-1}. \quad (8.87)$$

U sledećih n etapa uskcesivno se na ulaz senzora dovode referentne (etalonske) vrednosti merene veličine x_r , a odgovarajući statički prenos je:

$$y_k = \sum_{i=1}^n a_i x_r^{i-1}, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (8.88)$$

Jednačine (8.87) i (8.88) čine sistem jednačina od $n+1$ reda pomoću kojeg se mogu izračunati nepoznati koeficijenti statičke karakteristike, odnosno i nepoznata vrednost merene veličine x .

Metod referentnih vrednosti ulaza omogućava korekciju svih tipova sistematskih grešaka: aditivnih, mnoštvenih i nelinearnih, nezavisno od uzroka koji ih stvaraju. Nedostatak ovog metoda, sa aspekta njegove primene na senzore koji su uključeni u sistem automatskog upravljanja, ogleda se u potrebi isključivanja senzora iz sistema da bi se na njegov ulaz dovela referentna vrednost merene veličine. Za senzore neelektričnih veličina referentne vrednosti merene veličine u praksi nije jednostavno realizovati, pa je iz tih razloga navedeni metod pogodniji za senzore električnih veličina čije se referentne vrednosti lakše generišu uz pomoć kvalitetnih generatora.

Metod ispitnih funkcija takođe se primenjuju u $n+1$ etapa. Prva etapa ista je kao i kod metoda referentnih vrednosti – meri se izlaz za nepoznatu vrednost ulaza x i statička karakteristika određuje kao:

$$y_0 = \sum_{i=1}^n a_i x^{i-1}. \quad (8.89)$$

U sledećih n etapa na ulaz se dovode ispitne ili test-funkcije $A(x)$ koje su u funkciji veličine x . Na k -toj etapi dobija se:

$$y_k = \sum_{i=1}^n a_i (A_x(x))^{i-1}, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (8.90)$$

Formirani sistem od $n+1$ jednačine rešava se u odnosu na nepoznatu vrednost x i nepoznate koeficijente a_i statičke karakteristike. Složenost rešavanja zavisi od reda polinoma, te od tipa ispitne funkcije $A_k(x)$. Najčešće se primenjuju aditivna ispitna funkcija, jer se dodaje na merenu veličinu:

$$A_k(x) = x + q_k \quad (8.91)$$

Primjenjuje se i multiplikativna ispitna funkcija:

$$A_k = b_k x. \quad (8.92)$$

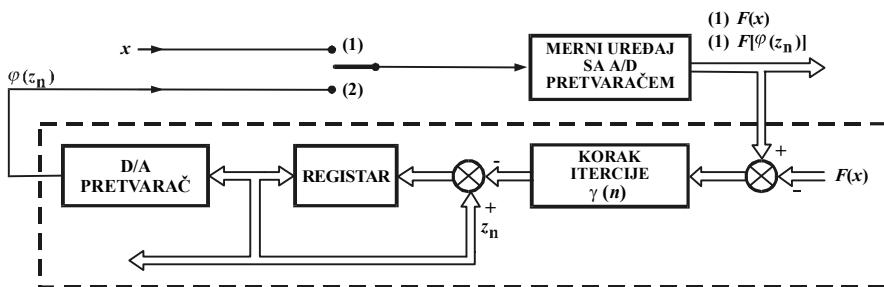
Prednost ove metode je u malom broju merenja, koja se vrše bez isključivanja senzora iz sistema automatskog upravljanja. Metod je pogodan kako za senzore električnih tako i za senzore neelektričnih veličina.

Iteracioni metodi primenjuju se jednakom uspešno i za korekciju aditivnih i za korekciju multiplikativnih mernih grešaka senzora. Iteracija se vrši kao skup sukcesivnih operacija za čije je provođenje potrebno određeno vreme. Osnovna prednost ovih metoda je u softverskoj realizaciji, bez dodatnih mernih uredaja. Zbog toga veliku primenu imaju u digitalnim senzorima ili u analognim senzorima povezanim sa mikroprocesorom.

Osnovni princip iteracionih metoda ilustruje slika 8.20. Merenje i korekcija sistemskih mernih grešaka senzora vrši se u dve etape. U prvoj etapi prekidač je u položaju 1. Merena veličina x dolazi na merni uredaj sa A/D pretvaračem, pa se na izlazu dobija vrednost $F(x)$. Ova vrednost pamti se u memoriji, koja na slici nije prikazana.

U drugoj etapi vrši se korekcija sistemskih grešaka merenja. Prekidač je u položaju 2. Preko bloka u povratnoj grani, koji ima statičku karakteristiku $\varphi(z_n)$ i D/A pretvarač, na ulaz mernog uredaja sada dolazi $\varphi(z_n)$. Na izlazu iz senzora je $F[\varphi(z_n)]$. Time je prvi ciklus završen. Zadatak iteracije sastoji se u tome da se ostvari jednakost:

$$F[\varphi(z_n)] = F(x). \quad (8.93)$$



Slika 8.20. Metod iteracione korekcije

Jednačina (8.93) naziva se jednačina korekcije. Da bi se pomoću ove jednačine napravio iteracioni algoritam, treba imati u vidu da je njen opšti oblik $z = \psi(z)$, gde je ψ tzv. iteraciona funkcija. Na osnovu toga, iteracioni algoritam u opštoj formi je:

$$z_{n+1} = \psi(z_n) \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (8.94)$$

Opisani postupak provodi se za jednačinu korekcije (8.93) tako što se ona prvo napiše u obliku $F[\varphi(z_n)] - F(x) = 0$, zatim se to pomnoži sa γ , te levoj i desnoj strani doda z , pa se dobije:

$$z = z - \gamma \{F[\varphi(z_n)] - F(x)\}, \quad (8.95)$$

gde desna strana predstavlja iteracionu funkciju $\psi(z)$. Rešavanjem ove jednačine iteracionim postupkom (8.94), dobija se rezultat korekcije:

$$z_{n+1} = z_n - \gamma(n) \{F[\varphi(z_n)] - F(x)\} \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (8.96)$$

gde je $\gamma(n)$ parametar ili korak iteracije.

Cikličkim provodenjem mernih i računskih operacija, izlaz se sve više približava stvarnoj vrednosti z , odnosno razlika $z_{n+1} - z_n$ teži nuli. U skladu sa iteracionim algoritmom (8.96), razlika $F[\varphi(z_n)] - F(x)$ teži nuli, pa je za neko $z = z_n$ zadovoljena jednačina korekcije (8.93). Tada važi:

$$\varphi(z) = x. \quad (8.97)$$

Korigovani rezultat z povezan je sa merenom vrednošću na sledeći način:

$$z = \varphi^{-1}(x). \quad (8.98)$$

Funkcija φ^{-1} je inverzna funkcija statičkog prenosa bloka u povratnoj sprezi. Ovaj rezultat pokazuje da razmotrena struktura prema slici 8.18 ima dve funkcije: pretvara ulazni signal i koriguje izlazni signal za iznos sistemске greške. Ovo svojstvo primenjuje se kod funkcionalne iteracione korekcije, što se javlja kod senzora koji rade na kompenzacijonom principu.

Očigledno je da primena iteracionog algoritma korekcije ima smisla samo ako omogućava da z_n konvergira prema stvarnoj vrednosti z . Uslov da suksesivna aproksimacija z_1, z_2, \dots, z_{n+1} teži stvarnoj vrednosti:

$$|z_{n+1} - z| \leq \gamma |z_n - z| \quad (8.99)$$

biće ispunjen ako je $\gamma < 1$. Koeficijent γ pokazuje za koliko se smanjila apsolutna greška $|z_n - z|$ jedne iteracije. S obzirom da se z_{n+1} može dobiti iz jednačine (8.96), te imajući u vidu da je $\varphi(z) = x$, uslov konvergencije postaje:

$$1 - \frac{\gamma(n)\{F[\varphi(z_n)] - F(x)\}}{z_n - z} \leq \gamma < 1 , \quad (8.100)$$

ili, u jednostavnom obliku:

$$|1 - \gamma(n)[\varphi(z)]| < 1 . \quad (8.101)$$

Specifični algoritmi stvaraju se na osnovu opšte metodologije. Specifika se ostvaruje izborom koraka $\gamma(n)$. Tako, na primer, zbog svoje jednostavnosti posebno je interesantan algoritam sa konstantnim korakom, odnosno $\gamma(n) = \gamma = \text{const}$. Ovaj algoritam može se analizirati na primeru kompenzacionog senzora, koji ima u direktnoj grani merni uredaj sa statičkom karakteristikom:

$$F(x) = (1 + \delta)x + \Delta , \quad (8.102)$$

gde su δ i Δ multiplikativna i aditivna sistematska greška. Povratna sprega senzora je direktna, pa je $\varphi(z) = z$. Na osnovu (8.101), za algoritam iteracije sa konstantnim korakom dobija se:

$$z_{n+1} - z = [1 - \gamma(1 + \delta)] \cdot (z_n - z) . \quad (8.103)$$

Odavde neposredno sledi važan zaključak da greška nakon n iteracija $z_n - z$ zavisi od početne greške $z_0 - z$:

$$z_n - z = [1 - \gamma(1 + \delta)]^n \cdot (z_0 - z) . \quad (8.104)$$

U skladu sa opštim algoritmom za konvergenciju greške (8.99) zaključuje se da je izraz u uglastoj zagradi jednak koraku iteracije. Ako se odabere takvo γ da teži vrednosti $1/(1+\delta)$, tada, očigledno, z_{n+1} teži tačnoj vrednosti z . Za $\gamma = 1/(1+\delta)$ tačna vrednost postiže se nakon samo jedne iteracije. Tako strogi uslovi nisu nužni. Prilikom realizacije iteracionog algoritma za automatsku korekciju statičke greške često se uzima da je $\gamma = 1$. U tom slučaju za dve suksesivne iteracije važi:

$$z_{n+1} - z = (-\delta)^n (z_n - z) . \quad (8.105)$$

Izražena u odnosu na početnu vrednost, z_0 greška je:

$$z_{n+1} - z = (-\delta)^n (z_0 - z) . \quad (8.106)$$

Analiza pokazuje da za $\delta > 0$, tj. kada se osetljivost mernog uređaja u direktnoj grani senzora povećava zbog prisustva multiplikativne greške, konvergentni proces (8.106) menja znak od ciklusa do ciklusa. Za $\delta < 0$ proces je monotono konvergentan. Neophodni broj iteracija da se dostigne rezultat željene tačnosti $z_n - z \leq \epsilon$ poznatu početnu grešku $z_0 - z$ računa se pomoću:

$$n = \frac{\log |(z_n - z)/(z_0 - z)|}{\log |1 - \gamma(1 + \delta)|}. \quad (8.107)$$

Na kraju, treba istaći da razmotrena iteraciona procedura za automatsku korekciju statičke greške senzora uopšte ne zavisi od iznosa aditivne greške Δ . Zbog toga ovi algoritmi imaju veliku primenu u senzorima sa multiplikativnom greškom.

8.3.4. Korekcija dinamičke tačnosti

Korekcija statičkih grešaka svodi se na određenu popravku rezultata. Korekcija dinamičkih grešaka senzora kao mernog uređaja ima isti zadatak, s napomenom da se radi o znatno složenijoj obradi izlaznog signala. U stvari, potrebno je odrediti vremenski promenljivi ulazni signal $x(t)$ na osnovu izlaznog signala $y(t)$ i uporediti ga sa ispitnom funkcijom. Formalno to znači da treba rešiti jednačinu dinamičkog prenosa senzora:

$$x(t) = F^{-1} [y(t)], \quad (8.108)$$

odnosno naći inverzni operator F^{-1} . Prepostavlja se da su statičke grešake otklonjene. Da bi postupak bio korektan, moraju biti ispunjeni uslovi o egzistenciji, jedinstvenosti i neprekidnosti rešenja.

Korekcija u vremenskoj oblasti. U vremenskoj oblasti je F^{-1} diferencijalni ili integralni operator, tj. jednačina (8.108) je diferencijalna ili integralna jednačina. Diferencijalna jednačina senzora ima oblik:

$$\sum_{i=1}^n a_i y^{(i)}(t) = \sum_{i=1}^m b_i x^{(i)}(t), \quad (8.109)$$

gde je $y(t)$ poznata neprekidna funkcija vremena snimljena pomoću pisača ili osciloskopa. Rešenje se traži u dve etape. U prvoj etapi desna strana jednačine (8.109) zamjenjuje se sa pomoćnom veličinom $z(t)$:

$$z(t) = \sum_{i=1}^m b_i x^{(i)}. \quad (8.110)$$

Zadatak se sada svodi na traženje rešenja $z(t)$ pomoću:

$$z(t) = \sum_{i=1}^n a_i y^{(i)}. \quad (8.111)$$

Nakon toga sledi druga etapa, u kojoj se, na osnovu poznatog $z(t)$ i jednačine (8.110), određuje traženo $x(t)$.

Osnovni problem izloženog metoda je nepoznavanje analitičkog oblika izlaznog signala $y(t)$, što se samo delimično ublažava diskretizacijom $y(t)$.

Korekcija u kompleksnoj oblasti. Prepostavlja se da je senzor linearni sistem sa koncentrisanim parametrima, da su ulazni i izlazni signal identički jednaki nuli za $t < 0$, te da je dinamika senzora opisana prenosnom funkcijom $G(s)$. Ako su ovi uslovi zadovoljeni, egzistira Laplasova transformacija:

$$Y(s) = \int_0^{\infty} y(t) e^{-st} dt. \quad (8.112)$$

Praktično rešenje korekcije, za zadatu prenosnu funkciju senzora u analitičkoj formi, dobije se na dva načina. Prvo se sastoji u tome da se registrovani izlaz aproksimira nekom analitičkom funkcijom $y(t)$, te na osnovu tablice Laplasovih transformacija ili primenom jednačine (8.112) odredi slika izlaza $Y(s)$. Korekcija dinamičke greške vrši se dalje u odnosu na senzor sa idealnom prenosnom funkcijom bezinercionog bloka.

Drugi način rešavanja korekcije u kompleksnoj oblasti sastoji se u tome da se registrovani izlaz diskretizira, što omogućava primenu diskrete Laplasove ili z -transformacije. Kao rezultat dobija se diskretni oblik nepoznatog ulaznog signala.

Korekcija u frekventnoj oblasti. Ako su poznati amplitudni $Y(j\omega)$ i fazni spektar $\phi(j\omega)$ izlaznog signala $y(t)$, tada se odgovarajuće karakteristike ulaznog signala $X(j\omega)$ i $\psi(j\omega)$ određuju iz jednačina:

$$X(j\omega) = Y(j\omega) / G(j\omega) \quad i \quad \psi(j\omega) = \phi(j\omega) - \theta(j\omega). \quad (8.113)$$

S obzirom da senzori imaju prenosne funkcije minimalno-faznih sistema, praktična razmatranja mogu se svesti samo na prvu jednačinu (8.113). Prelazak od eksperimentalno dobijenog izlaza $y(t)$ u spektor $Y(j\omega)$ realizuje se pomoću Furijeovog integrala, koji se najčešće predstavlja u obliku reda:

$$Y(jk\Delta\omega) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y(n\Delta t) e^{-jk2\pi kn/N} \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (8.114)$$

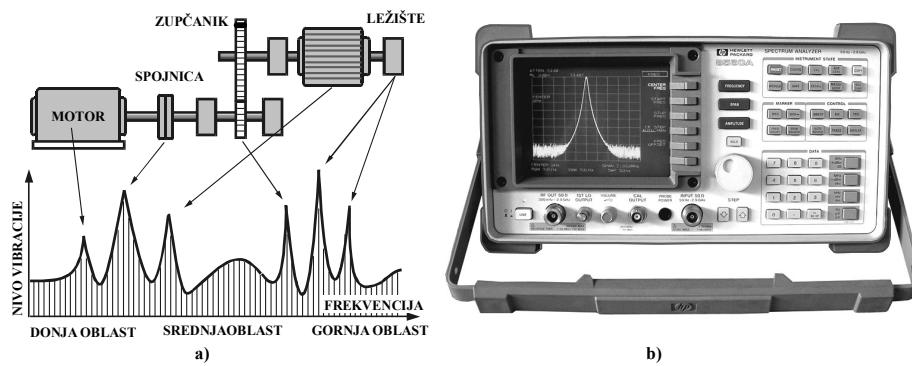
gde su $y(n\Delta t)$ vrednosti izlaznog signala $y(t)$ dobijene u trenucima $n\Delta t$, a $Y(jk\Delta\omega)$ komponente spektra $Y(j\omega)$ izračunate za diskrette vrednosti frekvencije $k/N\Delta t$. U skladu sa teoremom o uzorkovanju kontinualnog signala, frekvencija diskretizacije $f = 1/\Delta t$ mora biti bar dva puta veća od frekvencije harmonika s najvećom frekvencijom u spektru. Dobijeni spektor uporeduje se sa referentnim spektrom, nakon čega se vrši odgovarajuća korekcija.

Određivanje diskretnog spektra izlaznog signala senzora vrši se pomoću specijalnog mernog uredaja – analizatora frekvencija/spektra. Proračun spektra po algoritmu (8.114) je složen i dugotrajan. Spektor se sastoji od N harmonika, a svaki

od njih uzorkuje se N puta. Uкупно je, dakle, potrebno N^2 sračunavanja. To je veliki broj, bez obzira na mikroprocesorsku realizaciju analizatora signala.

Za analizu spektra signala danas se mnogo primenjuje tzv. brza Furijeova transformacija FFT. Metod se sastoji u tome da se red (8.114) sa N članova rastavi na više kraćih sekvenci. Zatim se za te sekvence odrede pripadni spektri, a na osnovu njih i ukupni spektar. Brza Furijeova transformacija ima znatno manji broj sračunavanja. Postoje monolitni čipovi za FFT (ADSP-21262 Analog Devices, RDA108 Radix Technologies), pogodni za direktnu analizu vibracija, zvuka i slike.

Na slici 8.21a prikazan je elektromotorni pogon. Obrtanje osovine motora prenosi se preko spojnica i zupčanika na osovina radne mašine. Zbog nebalansiranosti obrtnih delova motora, neusaglašenosti osovine na spojnicama, zupčastog prenosa, nepravilnosti ležišta i drugih faktora, javljaju se vibracije koje se mogu snimiti pomoću akcelerometarske sonde. Pomoću FFT analizatora (slika 8.21b) dobija se distribucija amplituda vibracije po frekvencijama. Na taj način mogu se uočiti anomalije u pojedinim delovima spektra, odrediti uzrok njihovog nastanka i zatim otkloniti ili barem smanjiti negativno delovanje na vibracije.



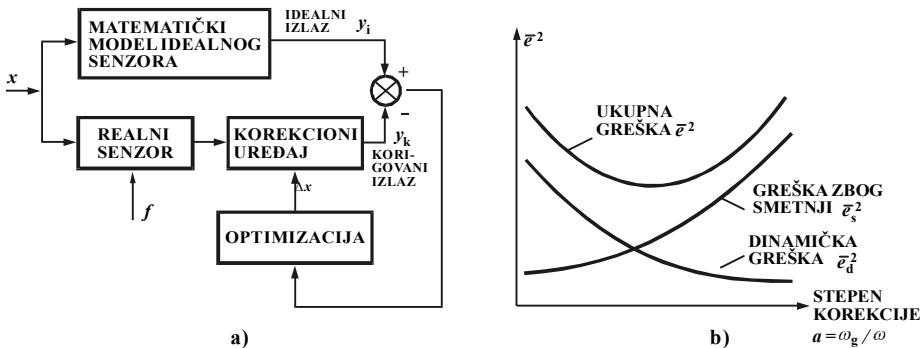
Slika 8.21. FFT analiza: a) spektar vibracija elektromotornog pogona, b) FFT analizator

Optimalna korekcija primenjuje se za korekciju i dinamičkih i statičkih karakteristika senzora. Princip optimalne korekcije ilustruje slika 8.22a. Merni signal x dolazi paralelno na realni senzor i matematički model idealnog senzora. Razlika između idealnog izlaza y_i izlaza y_k iz sistema „realni senzor – uređaj za korekciju“ formira se u mikroprocesorskom bloku za optimizaciju. Vrednost korekcije Δx računa se u skladu sa kriterijumom optimizacije da realni senzor i matematički model budu što sličniji.

U većini praktičnih problema kao kriterijum optimizacije primenjuje se kriterijum minimuma srednje kvadratne greške:

$$\bar{e}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_{xx}(\omega) |G_i(j\omega) - G_r(j\omega)|^2 d\omega + \int_{-\infty}^{\infty} S_{ff}(\omega) |G_r(j\omega)|^2 d\omega , \quad (8.115)$$

gde su $S_{xx}(\omega)$ i $S_{ff}(\omega)$ spektralne gustine merenog signala x i signala smetnje f , a $G_r(j\omega)$ i $G_i(j\omega)$ funkcije frekventnog odziva realnog senzora i idealnog modela.



Slika 8.22. Optimna korekcija: a) principijelna blok-šema, b) dijagram greške

Navedena jednačina važi samo ako nema korelacije između ulaznog signala i signala smetnje.

Greška \bar{e}^2 sastoji se iz dve komponente. Prva komponenta \bar{e}_d^2 rezultat je neadekvatne dinamike senzora, a druga komponenta je poremećaj \bar{e}_s^2 zbog delovanja smetnje. Dinamička komponenta slabi sa povećanjem stepena korekcije $a = \omega_g / \omega$.

Kao što se vidi, stepen korekcije može da se tretira kao odnos granične frekvencije ω_g senzora sa nekorigovanom dinamikom (realnog senzora) i granične frekvencije ω senzora sa korigovanom dinamikom (praktično, idealnog senzora). S druge strane, senzor kao linearni sistem gubi svojstva filtriranja smetnje sa porastom stepena korekcije, pa će komponenta \bar{e}_s^2 biti sve veća. Zato se senzor sa minimumom \bar{e}_{\min}^2 javlja kao optimalni filter. Minimum će biti izraženiji kada su poremećaji realnog senzora inherentno manji i kada je njegova dinamika bolja (slika 8.22b).

Prethodni zaključak je veoma važan jer upozorava da su mogućnosti korekcije dinamičke tačnosti i pomoću mikroprocesora ograničene. Ograničenja su prisutna, pre svega, kod senzora sa slabim performansama u pogledu dinamike i osjetljivosti na smetnje.

PITANJA I ZADACI

- 1) Eksperimentalnom proverom statičke karakteristike opterećenog potencijometarskog senzora dobijeni su sledeći podaci:

ULAZ $x = l/L$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
IZLAZ $y = U_i / U_0$	0	0,14	0,26	0,44	0,65	1

Sa l/L označen je relativni položaj potenciometra, a sa U_i/U_0 vrednost izlaznog

naponu u odnosu na napon napajanja U_0 . Odrediti odstupanje statičke karakteristike senzora (linearnost) od idealnog pravca koji prolazi kroz početnu i krajnju eksperimentalnu tačku.

Rešenje: $L < 16\%$.

2) Kalibracijom senzora pritiska dobijeni su sledeći podaci:

ULAZ p [MPa]	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
IZLAZ p_1 [MPa]	0,022	0,039	0,059	0,075	0,101
IZLAZ p_2 [MPa]	0,02	0,04	0,062	0,081	0,101

gde su p_1 i p_2 pokazivanja senzora pritiska prilikom povećavanja, odnosno smanjivanja vrednosti pritiska p na ulazu. Odrediti merno područje i merni opseg, te linearnost i histerezis senzora. Za početnu tačku idealnog pravca uzeti srednju vrednost početnih kalibracionih tačaka.

Rešenje: Merni opseg $0,08 \text{ MPa}$, merno područje je $0,02 - 0,1 \text{ MPa}$, $L < 7,5\%$, $H < 7,5\%$.

3) Primenom zakona o konzervaciji energije i zakona o prenosu toplote, odrediti diferencijalnu jednačinu koja opisuje dinamičko ponašanje senzora temperature – tekućinskog termometra, čiji je presek dat na slici 8.20. Izlazna veličina je izmerena temperatura θ (pokazivanje), a ulazna veličina je temperatura okoline θ_1 . U prostojem slučaju (slika 8.23a) može se smatrati da se senzor sastoji od serijske kombinacije termičkog kapaciteta i termičkog otpora, pa je to sistem prvog reda. U drugom slučaju (slika 8.23b) senzor je zaštićen dodatnom metalnom ili keramičkom oblogom i sastoji se od kombinacije dva termička kapaciteta i dva termička otpora, pa je tada to sistem drugog reda. (Toplotni kapacitet se definiše kao $C = cm$, gde su m masa, a c specifični topotopni kapacitet. Toplotni otpor definiše se kao $R = 1/hS$, gde je h ukupni koeficijent prelaza topline kroz površinu S).

Rešenje:

$$\text{a)} \quad T_1 \frac{d\theta}{dt} + \theta = \theta_1, \quad T_1 = R_1 C_1.$$

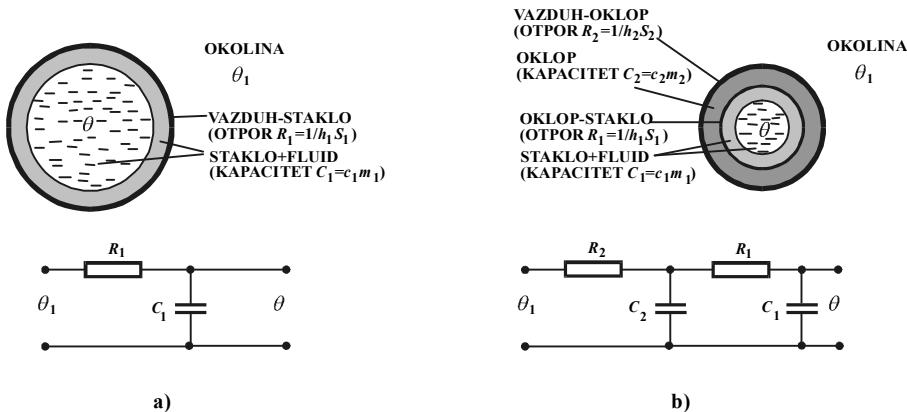
$$\text{b)} \quad T_1 T_2 \frac{d^2\theta}{dt^2} + (T_1 + T_2 + R_2 C_1) \frac{d\theta}{dt} + \theta = \theta_1,$$

$$T_1 = R_1 C_1, \quad T_2 = R_2 C_2.$$

4) Kolika je granična frekvencija senzora pritiska, čija je prenosna funkcija $G(s) = 5/(3s + 1)$?

Rešenje: $\omega_g = 2,35 \text{ rad/s}$ ili $f_g = 0,38 \text{ Hz}$.

5) Odrediti dinamičku grešku na ulazu senzora čija je prenosna funkcija $G(s) = 1/T(s + 1)$, kada je promena merene veličine $x(t) = at$. Ako je $a = 2$, odrediti vremensku konstantu senzora tako da apsolutna dinamička greška na ulazu bude manja od $0,1$ jedinica ulazne veličine u toku prvih 5 s nakon što je



Slika 8.23. Tekućinski termometar: a) u staklenom kućištu, b) sa zaštitnom oklopom

došlo do nagibne promene ulaza.

Rešenje: $T < 2,5 \text{ s}$.

- 6) Ako je vremenska konstanta termootporničkog senzora $T = 120 \text{ s}$, odrediti promenu temperature senzora $\theta(t)$ kada se temperatura ambijenta θ_1 promeni skokovito od 20°C na 300°C . Kolika je dinamička greška 300 s posle ove promene?
 Rešenje:

$$\theta(300) = (20 - 300) \cdot e^{-300/120} + 300, \quad \theta(\infty) - \theta(300) = 280 \cdot e^{-2.5}.$$
- 7) Senzor se sastoji od dva aperiodska bloka: $G_1(s) = 1/(s + 1)$ i $G_2(s) = 2/(s + 1)$. Odrediti relativnu grešku izlazne veličine koja je nastala zbog promene koeficijenata pojačanja na 1,1 i 2,2 respektivno, i to za slučaj da su navedeni blokovi u serijskoj, odnosno paralelnoj vezi.
 Rešenje: Za serijsku vezu $\Delta y/y = 0,2$, a za paralelnu vezu $\Delta y/y = 0,1$.
- 8) Senzor sa kompenzacionim načinom rada ima u direktnoj grani blok sa koeficijentom statičkog prenosa $K_{\text{dir}} = 2$, a u povratnoj grani blok sa koeficijentom $K_{\text{ps}} = 1$. Kolika je relativna promena izlaznog signala iz senzora ako su koeficijenti promenili svoje vrednosti za 0,2 i 0,1 respektivno.
 Rešenje: $\Delta y/y = -0,033$.
- 9) Navesti osnovne prednosti i nedostatke pojedinih metoda za korekciju statičke i dinamičke tačnosti senzora.
- 10) Senzor se sastoji od dva linearna bloka u serijskoj vezi. Dokazati da su relativne greške na ulazu i izlazu senzora, nastale zbog nestabilnosti koeficijenata statičkog prenosa blokova, jednake.

LITERATURA

- E.G. Woschni: *Dynamics of measurement*, Zb. JUREMA 25(1980), 2. svezak, str. 17-21.
- T.M. Aliev, A.A. Ter-Hačaturov, A.M. Šekihanov: *Iteracionnye metody povišenija točnosti izmerenij*, Energoatmizdat, Moskva, 1986.

3. E. Baumann: *Izmerenie sil' električeskimi metodami* (prevod sa nem.), Mir, Moskva, 1978.
4. P.P Ornatskij: *Teoretičeskie osnovy informaciono-izmeritel'noj tehniki*, Višča škola, Kijev, 1983.
5. K.I. Kulikovskij, V.A. Kuper: *Metody i sredstva izmerenij*, Energoatomizdat, Moskva, 1986.
6. M. Popović: *Prenosna svojstva mernog pretvarača temperature*, Putevi i dostignuća, Sarajevo, 3-4(1981), str.95-108.
7. M. Popović, E. Humo: *Automatic control components in engineering education*, Proc. „New trends, forms and methods in engineering education“, Bratislava, 1985.
8. J. Božičević: *Automatsko vodenje procesa*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1971.
9. M. Konrad: *Samobuđarenje mjernih uređaja*, Zb. JUREMA 24(1989), str. 41-45.
10. B.N. Petrov, V.A. Viktorov, B.V. Lunkin, A.S. Sokolov: *Iteracionnye metody povyšenia točnosti izmerenij*, Nauka, Moskva, 1976.
11. Lj. Draganović: *Principi gradnje aparata i sistema automatskog upravljanja*, Elektrotehnički fakultet, Sarajevo, 1983.
12. B.A. Granovskij: *Dinamičeskie izmerenija*, Energoatomizdat, Lenjingrad, 1984.
13. E. Humo: *Principi i elementi automatske regulacije*, Svjetlost, Sarajevo, 1987.
14. J.Garret: *Sensors classifications and characteristics*, www.ce.cmu.edu/~garret/courses/sensors-chars-2prepage.pdf
15. A.E.Brendel: *Frequency response of sensors*, www.cooperinstruments.com/pdf/frequencyresp.PDF
16. *Spectrum analysis Basics - A selfpaced tutorial*, CD-ROM, Agilent Technologies, 2000.
17. *Measurement Product Catalog 2000*, CD-ROM, Tektronix, 2000.
18. *Dokumentacija prizvodača*: www.hp.com, www.ni.com, www.tektronix.com

III

OSNOVNI SENZORI

9

OTPORNIČKI SENZORI

9.1. PRINCIP RADA

Promena električnog otpora u zavisnosti od delovanja mehaničke sile, temperature ili zračenja odavno se primenjuje u tehnici senzora. Kod poluprovodnika je uočeno da na površini dolazi do razmene elektrona sa atomima i molekulima iz okoline – tako su nastali hemirezistori, otpornici osetljivi na koncentraciju kiseonika, vodonika, metana i drugih gasova. Kada se takav otpornik prekrije slojem biološkog materijala koji omogućava pretvaranje koncentracije tečnog sadržaja u koncentraciju gasa, dobija se biosenzor. Agregatno stanje senzorskog otpornika može biti čvrsto, tečno ili gasovito.

Otpornički senzori od čvrstih materijala primenjuju se za merenje veličina koje su u vezi sa delovanjem mehaničke sile ili temperature. Prave se od metala ili poluprovodnika. Otpor metalnih senzora računa se na osnovu poznate formule:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (9.1)$$

gde su: R otpor na nominalnoj temperaturi ambijenta $t = 20^\circ\text{C}$ [Ω], ρ specifični otpor, koji zavisi od osobina materijala od kojeg je otpornik napravljen [Ωm], l dužina otpornika [m] i S poprečni presek otpornika [m^2].

Delovanje mehaničke sile odražava se na otpornički senzor od metala kao promena njegovih geometrijskih parametara – dužine l i preseka S . Osetljivost na promenu dužine l je konstantna:

$$\frac{\Delta R}{\Delta l} = \frac{\rho}{S}, \quad (9.2)$$

a osetljivost na linearnu promenu poprečnog preseka je nelinearna

$$\frac{\Delta R}{\Delta S} = -\rho \frac{l}{S^2}. \quad (9.3)$$

Osnovno svojstvo svih čvrstih otpornika je da im otpor u manjoj ili većoj meri zavisi od temperature. Na toj osnovi grade se temperaturni senzori, koji su vrlo rasprostranjeni i cenjeni u tehničkoj praksi. Zavisnost otpora od temperature je nepoželjan efekat kada je u pitanju merenje mehaničkih veličina. U opštem slučaju promena otpora u zavisnosti od temperature je eksponencijalna:

$$R_t = A e^{\alpha T}, \quad (9.4)$$

gde su: A konstanta [Ω], α temperaturni koeficijent [$1/\text{ }^\circ\text{C}$] i T temperatura [$^\circ\text{C}$].

Obično se promena otpora posmatra u odnosu na neku referentnu temperaturu T_0 , najčešće u odnosu na $T_0 = 0^\circ\text{C}$ ili $T_0 = 20^\circ\text{C}$. Tako se dobija modifikovana jednačina (9.4), pomoću koje se izračunava otpor na aktuelnoj temperaturi T :

$$R_t = R_0 e^{\alpha(T-T_0)}. \quad (9.5)$$

Razvojem u Taylorov red, eksponencijalna jednačina (9.5) transformiše se u polinom n -og stepena:

$$R_t = R_0 [1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2 + \dots], \quad (9.6)$$

gde su: R_0 otpor na referentnoj temperaturi T_0 , R_t otpor na aktuelnoj temperaturi T , a α , β itd. odgovarajući temperaturni koeficijenti otpora. Analiza polinoma (9.6) pokazuje da je temperaturna osetljivost $\Delta R/\Delta T$ otporničkih senzora nelinearna. Za metale je ova osetljivost pozitivna, a za poluprovodnike negativna ili pozitivna. Za tehničku praksu posebno su interesantni metali i poluprovodnici koji u određenim temperaturnim dijapazonima imaju konstantnu osetljivost. To su termootpori koji služe kao osnov za gradnju senzora temperature.

Kod poluprovodničkih otpornika intenzitet osvetljenosti ima uticaj na promenu otpora. Naime, unutrašnji otpor R_u većine poluprovodnika linearno se smanjuje sa povećanjem intenziteta osvetljenosti. Ovo je unutrašnji fotoefekat. Od poluprovodnika s jako izraženim unutrašnjim fotoefektom prave se fotootpornici, koji služe za gradnju fotosenzora. Promena unutrašnjeg otpora ΔR_u fotosenzora u zavisnosti od promene intenziteta osvetljenosti ΔE_s je osetljivost:

$$\frac{\Delta R_u}{\Delta E_s} = -k [\Omega/\text{l}x], \quad (9.7)$$

koja je konstantna. Osetljivost fotootpornika na delovanje sile gotovo je zanemarljiva. Negativna osobina fotootpornika je velika osetljivost na delovanje temperature.

Manji broj otporničkih senzora na bazi poluprovodnika imaju otpor koji zavisi od pritiska. Ukupni otpor R takvog poluprovodnika kada na njegovim krajevima deluje pritisak p jest suma prelaznog otpora R_p i unutrašnjeg otpora R_u :

$$R = R_p + R_u = \frac{K}{p} + R_u. \quad (9.8)$$

Osetljivost $\Delta R/\Delta p$ statičke karakteristike (9.8) je nelinearna sa negativnim predznakom, koji ukazuje da pozitivnom prirastu Δp odgovara negativni prirast ΔR . Na osetljivost jako utiču starenje poluprovodnika i vlažnost okoline. Promena otpora u funkciji pritiska primenjuje se u gradnji senzora zvučnih signala.

Tekućinski otpornički senzori su rastvori elektrolita, pa se često nazivaju elektrolitičkim senzorima. Promena otpora u zavisnosti od promene geometrije elektroda i promene geometrije rastvora između elektroda u tehnici senzora nema praktični značaj. Osetljivost na temperaturu i osetljivost na hemijski sastav elektrolita su više izražene.

Promena otpora u zavisnosti od količine i vrste rastvorenog materijala predstavlja osnov za elektrohemisko merenje koncentracije tog materijala u rastvoru. Naime, s rastvaranjem materijala u vodi dolazi do elektrolitske disocijacije. Molekuli materijala raspadaju se na elektropozitivne (katjone) i elektronegativne (anjone) delove. Većem stepenu disocijacije odgovara manji otpor. Ovaj efekat primenjuje se u merenju koncentracije elektrolitičkih rastvora. Statička karakteristika: koncentracija rastvora – električna vodljivost rastvora, ima konstantnu osetljivost, ali je velika smetnja njena zavisnost od temperature.

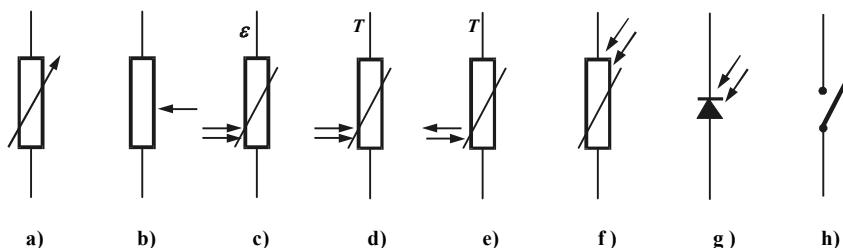
Gasni otpornički senzori prave se kao stakleni baloni (cevi) ispunjeni razređenim gasom. Rade na osnovu osobine vodljivih gasova da im otpor zavisi od pritiska i jačine svetlosti, dok zavisnost od temperature i razmaka između elektroda nema praktični značaj.

Zagrejavanjem negativne elektrode (katode) dolazi do termoelektronske emisije elektrona. Oslobođeni elektroni sudaraju se sa molekulima gasa i ioniziraju ih. Količina jona proporcionalna je gustini gasa, odnosno pritisku gase.

Princip rada gasnih otporničkih senzora primenjuje se u gradnji senzora niskog apsolutnog pritiska, tj. visokog vakuma.

Katode napravljene od nekih materijala, na primer, od kalijuma ili cezijuma na srebrenoј podlozi, podložne su vanjskom fotoefektu. Kada se takva katoda osvetli, nastaje proces fotoelektronske emisije elektrona. Radi ubrzanja procesa između katode i anode priključuje se jednosmerni napon reda 100 V. Struja koja se javlja kao rezultat fotoefekta zavisi od intenziteta svetlosti, pri čemu su fotoćelije na bazi jednog materijala izrazito osetljive na određenu talasnu dužinu svetlosti.

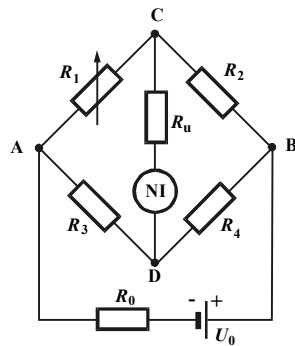
Obeležavanje otporničkih senzora. Na slici 9.1. prikazane su označke otporničkih senzora. Vrednost otpora je od nekoliko oma do nekoliko megaoma, što zavisi od načina rada senzora. To su sve analogni senzori, osim poslednjeg (slika 9.1h), koji predstavlja kontaktni senzor sa dva stanja. U otvorenom stanju njegov je električni otpor beskonačan, a u zatvorenom stanju otpor mu je nula.



Slika 9.1. Oznake otporničkih senzora: a) opšta oznaka, b) potenciometarski senzor pomaka, c) senzor mehaničkog naprezanja, d) termootpornik sa pozitivnim temperaturnim koeficijentom, e) termootpornik sa negativnim temperaturnim koeficijentom, f) fotoootpornik, g) fotodioda, h) kontaktni senzor

9.2. MERNE ŠEME SA OTPORNIČKIM SENZORIMA

Seme sa pasivnim mernim mostom. Principi rada pasivnih mernih mostova dobro su izučeni u teoriji merenja. Zbog svojih kvaliteta imaju značajno mesto u tehniци senzora, odnosno kod merenja otpora, kapaciteta ili induktiviteta senzora. Mostovi se u načelu dele prema izvoru napajanja na istosmerne i naizmenične. Najpoznatiji je Vitstonov most, koji se sastoji od: četiri grane u kojima su otpori, izvora napajanja, koji se dovodi na jednu dijagonalu mosta, te indikacionog instrumenta, tzv. nul-indikatora, koji se priključuje na drugu dijagonalu mosta (slika 9.2). Napon izvora U_0 za napajanje mosta određuje se prema snazi otpornika, odnosno prema maksimalnoj dozvoljenoj struci I_{\max} kroz otpornike u granama BCA i BDA: $U_0 = I_{\max}(R_1 + R_2)$ ili $U_0 = I_{\max}(R_3 + R_4)$. Podatak o vrednosti I_{\max} može se lako izračunati iz poznate snage otpornika: $P_{\text{nom}} = I_{\max}^2 R_{\text{nom}}$. Obično su svi otpornici u mostu iste snage.



Slika 9.2. Vitstonov most s otporničkim senzorom

Ako je unutrašnji otpor naponskog izvora $R_0 \approx 0$, struja u izlaznoj dijagonali mosta CD može se odrediti primenom Tevenenove teoreme:

$$I = U_0 \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)R_u + R_1 R_4(R_2 + R_3) + R_2 R_3(R_1 + R_4)} . \quad (9.9)$$

Ravnotežno stanje mosta karakteristično je za početni trenutak, kada je struja $I = 0$. Na osnovu jednačine (9.9) uslov ravnoteže može se napisati u obliku:

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 . \quad (9.10)$$

Ako se promeni otpor senzora R_1 , ravnoteža mosta se naruši. Neuravnoteženost mosta indicira se na nul-instrumentu: galvanometru, koji meri struju I kroz dijagonalu CD ili voltmetru, koji meri napon U na toj dijagonali. Kvalitetan galvanometar ima približno $R_u = 0$, pa je struja dijagonale, na osnovu opšte jednačine (9.9) može da se napiše u obliku:

$$I = U_0 \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 R_4(R_2 + R_3) + R_2 R_3(R_1 + R_4)} . \quad (9.11)$$

Za merenje napona upotrebljavaju se kvalitetni instrumenti, sa velikim unutrašnjim otporom $R_u = \infty$, tako da je:

$$U = U_0 \left[\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right] = U_0 \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} . \quad (9.12)$$

Osnovni pokazatelji statičke karakteristike mosta definišu se pomoću osetljivosti i linearnosti. Razlikuju se:

- osetljivost izlazne struje I u zavisnosti od promene otpora R_1 :

$$S_I = \Delta I / \Delta R_1 \quad [\text{A}/\Omega] ; \quad (9.13)$$

- osetljivost izlaznog napona U zavisno od promene otpora senzora:

$$S_U = \Delta U / \Delta R_1 \quad [\text{V}/\Omega] , \quad (9.14)$$

- osetljivost izlazne snage mosta P zavisno od promene otpora senzora R_1 :

$$S_P = \Delta P / \Delta R_1 \quad [\text{W}/\Omega] ; \quad (9.15)$$

- osetljivost izlaznog napona U na promene napona napajanja U_0 :

$$S_{U_0} = \Delta U / \Delta U_0 \quad [\text{V}/\text{V}] ; \quad (9.16)$$

- osetljivost mosta sa galvanometarskim indikacionim instrumentom:

$$S_\alpha = \Delta \alpha / R_1 = (\Delta \alpha / \Delta I) (\Delta I / \Delta R_1) \quad [{}^\circ/\Omega] , \quad (9.17)$$

gde je $S_G = \Delta \alpha / \Delta I$ osetljivost samog galvanometra;

- osetljivost mosta sa visokoomskim indikacionim instrumentom:

$$S_\alpha = \Delta \alpha / \Delta R_1 = (\Delta \alpha / \Delta U) (\Delta U / \Delta R_1) \quad [{}^\circ/\Omega] , \quad (9.18)$$

gde
je $S_V = \Delta \alpha / \Delta U$ osetljivost instrumenta (voltmetra);

- osetljivost izlaznog napona U zavisno od promene otpora opterećenja R_L :

$$S_L = \Delta U / \Delta R_L \quad [\text{V}/\Omega] . \quad (9.19)$$

Poželjno je da osetljivost na R_1 bude što veća i da je konstantna na području promene otporničkog senzora R_1 . Maksimalna osetljivost $S_U = 1/4U_0$ postiže se kada je $R_1 = R_2$ i $R_3 = R_4$. Međutim, pri takvom odnosu osetljivost se menja zbog promene otpora senzora, opterećenja i napona napajanja, a izlaz je linearan samo za male vrednosti ΔR_1 . Kompromis između konstantne osetljivosti, dobre linearnosti neosetljivosti na varijacije opterećenja i napajanja na željenom opsegu $\Delta R_1 / R_1$ postiže se izborom odnosa otpornika mosta $R_2 = bR_1$, $R_3 = eR_1$ i $R_4 = ebR_1$, gde su e i b konstante mosta, određene u fazi projektovanja. Preporučuje se $1 < b < 10$ i $1 > e > 0,1$.

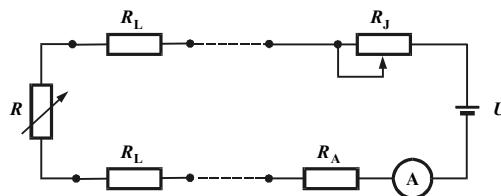
Nelinearnost mosta izračunava se kao odstupanje od realne statičke karakteristike $U=f(\Delta R/R)$ od idealnog pravca. Pravac se definiše ili kao tangenta na statičku karakteristiku u koordinatnom početku ili kao terminalni pravac koji prolazi kroz početnu tačku $(0,0)$ i krajnju tačku $[U_{\max}, (\Delta R/R)_{\max}]$. Proračun nelinearnosti zнатно je složeniji kada je otpornički senzor i sam izrazito nelinearan, kao što je to u slučaju otpornika sa negativnim temperaturnim koeficijentom. Tada se na nelinearnost mosta superponira nelinearnost senzora.

Standardni industrijski merni mostovi koji se primenjuju za detekciju promene električnog otpora imaju tačnost: do $0,5\%$ za $1 < R_1 < 100\,000$, do $1,5\%$ za $0,01 < R_1 < 0,1$, do 5% za $0,005 < R_1 < 0,01$ i $100\,000 < R_1 < 1\,000\,000\Omega$. Prema tome, merenje relativno malih otpora prati značajna greška zato što su takvi otpori istog reda veličine kao i otpori priključenih vodova i prelaznih kontakata. Da bi se smanjili ovi efekti i povećala tačnost do $0,05\%$, za $0,001 < R_1 < 1\,000$, primenjuje se složeniji Tomsonov most – tzv. dvostruki Vitstonov most. Kao što je istaknuto, električni otpor svih otpornika u manjoj ili većoj meri zavisi od temperature. Radi smanjivanja uticaja temperature primenjuju se specifične konstrukcije Vitstonovog mosta: most sa dva identična senzora u susednim granama, most sa identičnim senzorima u suprotnim granama, te most koji u sve četiri grane ima senzorski otpornik.

Merna šema za distaciono merenje otpora (I-metod). Često je potrebno otpornički senzor postaviti na veću udaljenost od centralne mernе aparature. Ako se most postavi bliže aparaturi, tada otpor priključenih vodova od senzora do mosta smanjuje tačnost mernog mosta. Zbog toga je dobro most postaviti bliže senzoru, ali se tada troši više kablova na povezivanje mosta sa centralnom aparaturom. Zato se za distaciono merenje otporničkog senzora primenjuje metod merenja struje (slika 9.3):

$$I = \frac{U}{R + R_A + R_J + 2R_L} , \quad (9.20)$$

gde su: R otpor senzora, R_A unutrašnji otpor ampermetra, $2R_L$ otpor priključenih vodova, U napon napajanja, I struja u mernom kolu. Nadomesni otpor R_J podešava se tako da ukupna suma bude $R_J + R_A + 2R_L = 50\Omega$.



Slika 9.3. Distaciono merenje otpora I-metodom

Struja I je obrnuto proporcionalna sa otporom senzora R . Zbog toga osjetljivost izlazne struje nije konstantna:

$$S_I = \frac{\Delta I}{\Delta R} = -\frac{U}{(R + R_A + R_J + 2R_L)^2} . \quad (9.21)$$

Na tačnost distacione metode utiče promena otpora vodova $\Delta R_L / R$. Uticaj je veći ako su male promene $\Delta R / R$, a gotovo je zanemariv ako su velike promene $\Delta R / R$.

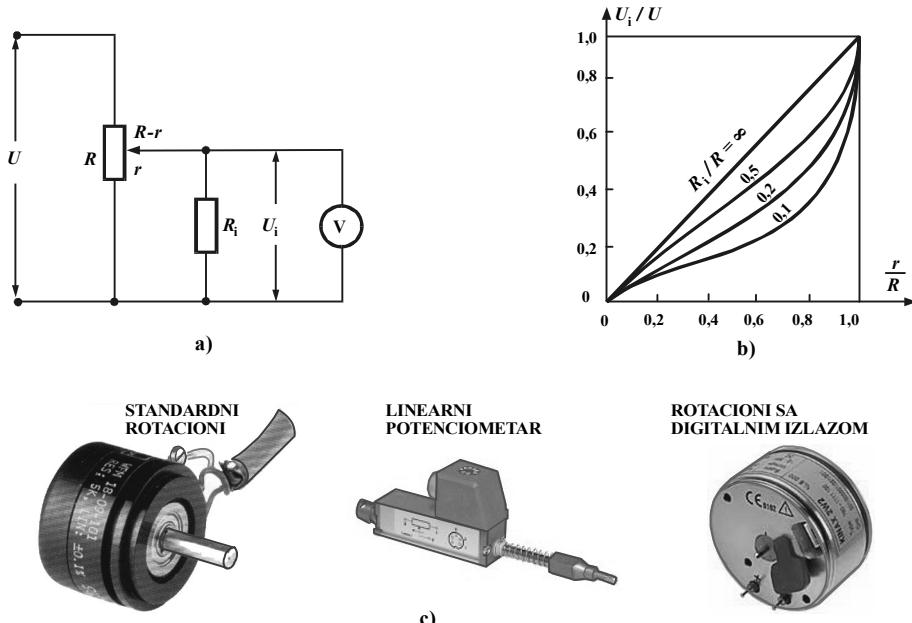
Osim toga, ako su male $\Delta R/R$, promena izlazne struje je veoma mala i samerljiva je sa delovanjem smetnji.

Potenciometarska šema (U-metod) primenjuje se za merenje otpora senzora na bliskim rastojanjima (slika 9.4a). Senzor u ovom slučaju ima oblik potenciometra, tj. otpornika sa klizačem i pogodan je za merenje mehaničkih veličina.

Na izlaz potenciometarskog pretvarača priključuje se merni blok čiji je ulazni otpor R_i . Izlazni napon je:

$$U_i = \frac{U}{(R-r) + \frac{rR_i}{r+R_i}} \frac{rR_i}{r+R_i} = U \frac{rR_i}{RR_i + Rr - r^2}, \quad (9.22)$$

gde su: U istosmerni ili naizmenični napon napajanja potenciometra, r deo otpora potenciometra proporcionalan delovanju neke mehaničke veličine.



Slika 9.4. Detekcija promene otpora potenciometarskog senzora: a) merna šema, b) statička karakteristika, c) realizacije potenciometarskih senzora

Prema pravilu serijskog povezivanja blokova sa naponskim signalima, merni blok sa beskonačno velikim ulaznim otporom R_i neće opterećivati potenciometarski pretvarač. U tom slučaju statička karakteristika potenciometarskog senzora je pravac:

$$U_i = \frac{U}{R} r, \quad (9.23)$$

a osetljivost izlaznog napona je:

$$S_U = \frac{\Delta U_i}{\Delta r} = \frac{U}{R} = \text{const.} \quad (9.24)$$

Realni merni blok nema beskonačan ulazni otpor, zbog čega je senzor opterećen. Promena napona zbog priključenog opterećenja je greška merenja, tj. razlika idealnog izlaznog napona (9.23) i stvarnog izlaznog napona (9.22):

$$\Delta U = U \frac{r}{R} \left[1 - \frac{R_i R}{R_i R + r (R-r)} \right] = U \frac{r}{R} \frac{r (R-r)}{R_i R + r (R-r)} . \quad (9.25)$$

Razlika između neopterećenog i opterećenog potenciometarskog senzora je manja što je otpor opterećenja, odnosno unutrašnji otpor mernog bloka R_i veći. Ako je $R_i \gg R$, tada je, na osnovu jednačine (9.25):

$$\Delta U \approx U \frac{r^2 (R-r)}{R^2 R_i} . \quad (9.26)$$

Maksimalna vrednost odstupanja izlaznog napona računa se iz uslova da je prvi izvod nula: $d\Delta U/dr = 0$, što će biti kada je klizač u položaju $r = 2R/3$, pa je:

$$\Delta U_{\max} = 0,15 U \frac{R}{R_i} . \quad (9.27)$$

Na slici 9.4b prikazana je familija krivih u relativnom obliku, koje predstavljaju zavisnost izlaznog napona U_i u funkciji otpora r za različite vrednosti otpora opterećenja R_i .

Moguće je da se napon sa potenciometarskog senzora meri pomoću kvalitetnog instrumenta, a da statička karakteristika ipak nije linearna. Razlog je obično u prevelikoj dužini priključnih kablova.

U praksi se primenjuje više načina za smanjenje nelinearnosti, tj. otklanjanje uticaja otpora opterećenja na izlazni napon potenciometarskog senzora:

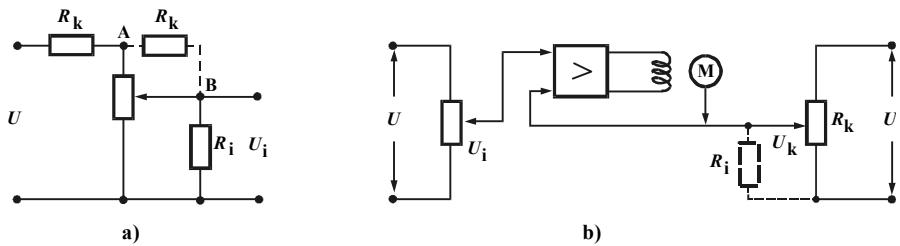
- Dodavanje kompenzacijonog otpornika R_k u seriju sa potenciometarskim senzorom (slika 9.5a). Izlazni napon je tada:

$$U_i = U \frac{r R_i}{R R_i + (R_k + R)r + R_k R_i - r^2} , \quad (9.28)$$

a

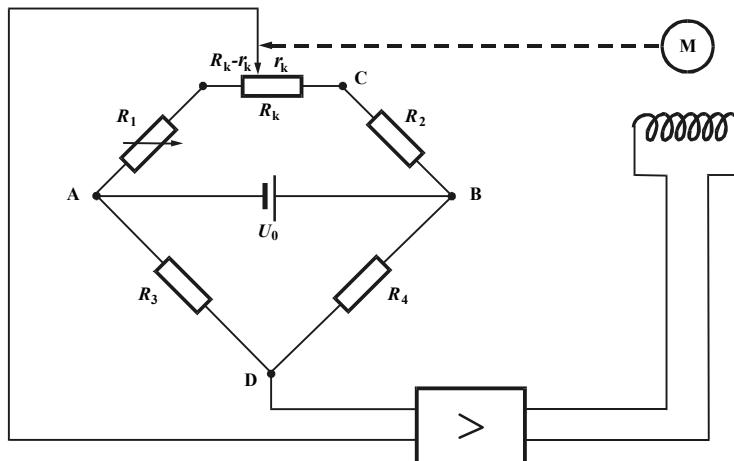
najблиži je idealnoj statičkoj karakteristici ako se R_k odabere tako da je $R_k = 0,5R$. Sličan efekat postiže se kada je komponizacioni otpornik $R_k = R$ priključen između tačaka A i B.

- Automatska kompenzacija na principu servomehanizma. Na jednom dodatnom potenciometru R_k kompenzacijonom metodom formira se napon U_k , jednak naponu senzora (slika 9.5b). Naponom U_k može se napajati otpor opterećenja. Čim taj otpor svojim delovanjem smanji napon U_k , servomehanizam automatski ponovo uspostavlja ravnotežu $U_k = U_r$, tako da se promena opterećenja ne odražava na tačnost.
- Postavljanje impedanjtnog rastavljača (naponskog sledila) između potenciometarskog senzora i opterećenja.



Slika 9.5. Otklanjanje uticaja opterećenja: a) uvođenjem kompenzacijonog otpornika,
b) automatskom kompenzacijom

Metod kompenzacije ili uravnoteživanja podrazumeva da se most, nakon što se otpor senzora promenio, doveđe ponovo u ravnotežno stanje. U tehnici senzora ima smisla samo automatska kompenzacija (slika 9.6). Kada most nije u ravnoteži, na dijagonali CD formira se napon, koji se pojačava. Pojačani napon pokreće jednosmerni servomotor. Osovina motora je spregnuta s klizačem potenciometra za kompenzaciju. Zakretanje osovine motora ima takav smer da most teži ravnotežnom stanju. Kada je veličina napona koji se dovodi na motor manja od njegovog praga osetljivosti, motor miruje i proces kompenzacije smatra se završenim. Kazaljka indikacionog instrumenta takođe je povezana sa osovinom motora i na skali pokazuje vrednost merene fizikalne veličine.



Slika 9.6. Merenje otpora senzora metodom automatskog uravnoteživanja mernog mosta

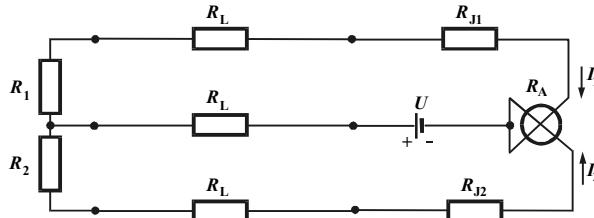
Prednost ove metode je da pokazivanje uravnoteženog mosta ne zavisi od napona napajanja. Ravnotežno stanje u početnom momentu ($\Delta R_1 = 0$) je $(R_1 + R_k)R_4 = R_2R_3$ jer je klizač potenciometra tada u krajnjem desnom (nultom) položaju. Nakon promene otpora R_1 za ΔR_1 je $(R_1 + \Delta R_1 + R_k - r_k)R_4 = (R_2 + r_k)R_3$. Odатле proizilazi:

$$r_k = \frac{R_4}{R_2 + R_3} \Delta R_1. \quad (9.29)$$

Vidi se da je otpor r_k direktno proporcionalan promeni otpora senzora R_1 , zbog čega je linearost uravnoveženih mostova znatno veća nego neuravnoveženih. Proces kompenzacije odvija se u okolini ravnotežnog stanja, što znači da je izlazni napon mali, pa je za ovu klasu mostova karakteristična mala osetljivost izlaznog napona i struje. Tipična tačnost automatskih mostova je od 0,25% do 1%, a vremenska konstanta procesa kompenzacije je 1 – 10 s.

Merne šeme sa logometrom primenjuju se za distanciono merenje otpora senzora temperature (slika 9.7). Logometar je instrument sa dva namotaja, ukrštena pod uglom α na pokretnom sistemu, koji se nalazi u vazdušnom zazoru stalnog magneta. S obzirom na poseban profil zazora, u njemu je nehomogeno magnetno polje. Električni moment jednog namotaja $M_1 = k_1 I_1 f_1(\alpha)$ uravnotežava se električnim momentom drugog $M_2 = k_2 I_2 f_2(\alpha)$. Pokazivanje logometra je funkcija odnosa struja u namotajima:

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left(\frac{R_2 + (R_A + R_{J2} + 2R_L)}{R_1 + (R_A + R_{J1} + 2R_L)}\right) . \quad (9.30)$$



Slika 9.7. Šema otporničkog senzora sa logometrom

Statička karakteristika, zavisnost između pokazivanja α i merenog otpora je približno linearna kada je mereni otpor R_2 , a nelinearna kada je mereni otpor R_1 . Osetljivost merenja u prvom slučaju je konstantna, a u drugom zavisna od trenutne vrednosti R_1 :

$$S_\alpha = \frac{\Delta\alpha}{\Delta R_2} = \text{const} \quad \text{i} \quad S_\alpha = \frac{\Delta\alpha}{\Delta R_1} \neq \text{const.} \quad (9.31)$$

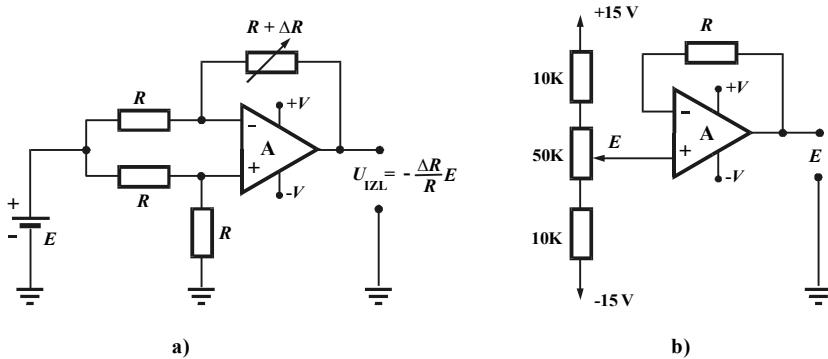
Osnovne prednosti mernih šema sa logometrom pokazuju se u mostovima i mernim kolima s nestabilnim napajanjem. Naime, struje u oba namotaja logometra proporcionalne su naponu napajanja, pa pokazivanje kao funkcija njihovog odnosa ne zavisi od napona. Ova osobina logometra očuvana je u dijapazonu promene napona napajanja od $\pm 30\%$ od nominalne vrednosti. Justirni otpor R_j određuje se tako da ukupni otpor linije $R_L + R_j$ bude jednak dogovorenoj vrednosti, na primer 50Ω .

Metod mosnih pojačavača. U klasičnoj tehnici senzora promena otpora koja nastaje zbog delovanja neke fizikalne veličine najčešće se meri pomoću Vitstonovog mosta. Kao što je istaknuto, najveće ograničenje ove metode je osetljivost izlaznog napona na nestabilnost napona napajanja i nelinearnost statičke karakteristike.

Radi poboljšanja merenja često se upotrebljavaju mosni pojačavači. Operacioni pojačavač, tri otpornika jednake otpornosti i otpornički senzor, aranžirani kao na slici 9.8a, obrazuju osnovnu šemu mosnog pojačavača. Radi jednostavnije analize

sklopa, otpornički senzor je predstavljen pomoću nominalnog otpora R plus promene otpora ΔR .

Napon napajanja E treba da je stabilan i pogodno odabran kako bi se dobio što povoljniji izlazni signal. Na slici 9.8b. prikazana je praktična šema, koja iza otporničkog delitelja ima prosto naponsko sledilo. Napon E je tako manje osetljiv na uticaj opterećenja. U konkretnom slučaju E se može regulisati u opsegu od $-10,7$ V do $+10,7$ V.



Slika 9.8. Mosni pojačavač: a) principijelna šema, b) napajanje

Principijelna šema mosnog pojačavača (slika 9.8a) nije pogodna za praktičnu primenu, jer je teško ostvariti da sva tri otpornika R imaju otpor jednak otporu senzora za početne uslove. Zato se posebno realizuju šeme za velike, a posebno za male promene otpora senzora. Šema za velike promene otpora senzora (slika 9.8a) ima samo dva jednakota otpornika R_1 . Otpornički senzor postavljen je u povratnoj grani pojačavača.

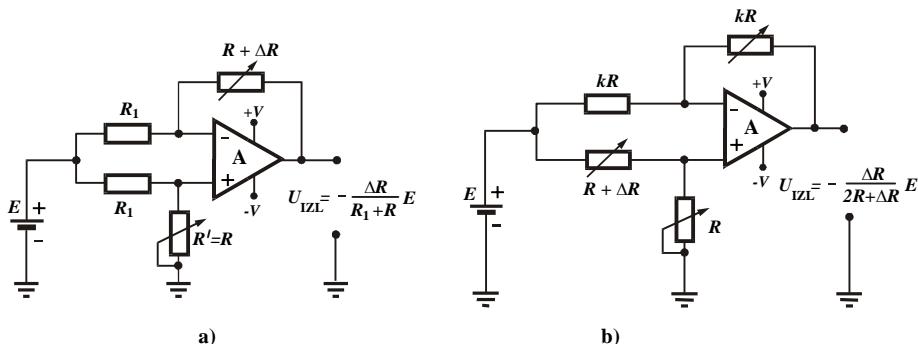
Za efikasno merenje veoma je bitno tačno podešavanje nule. U tom smislu treba uraditi sledeće:

- smestiti senzor u okolinu sa zadatim početnim uslovima;
- podesiti vrednost R' tako da bude $U_{izl} = 0$ V (tada će R' biti tačno jednak početnoj vrednosti R);
- poželjno je obezbediti što veće E da bi se u celosti iskoristio izlazni opseg pojačavača, obično je $E = 5 - 10$ V.

Nakon ove procedure most je kalibriran i izlazni napon je proporcionalan promeni otpora senzora ΔR . Vrednost U_{izl} računa se pomoću jednačine:

$$U_{izl} = -E \frac{\Delta R}{R_1 + R}, \quad (9.32)$$

gde minus znači da izlazni signal ima suprotan polaritet u odnosu na mereni prirast otpora ΔR . Ovaj nedostatak otklanja se dodavanjem jednog invertora.



Slika 9.9. Mosni pojačavač: a) za senzore sa velikom promenom otpora, b) za senzore sa malom promenom otpora (šema sa podešavanjem opterećenja pojačavača)

Za male promene otpora primenjuje se mosna šema sa senzorom na neinvertirajućem ulazu pojačavača (slika 9.9b). Ostale modifikacije u odnosu na prethodnu šemu vezane su za koeficijent k . Promenom koeficijenta k podešava se izlazna struja, čime se uzimaju u obzir mogućnosti pojačavača u pogledu opterećenja.

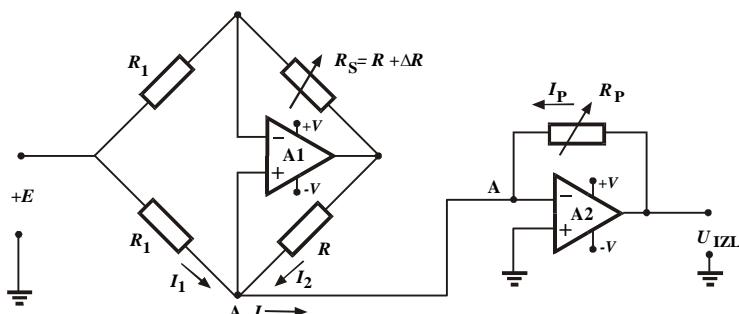
Vitstonov most se i danas mnogo primenjuje u tehnici senzora. Međutim, kada se u jednu granu mosta priključi otpornički senzor, napon na izlaznoj dijagonali mosta je nelinearan sa promenom otpora senzora. Samo za male promene može se smatrati da je izlaz linearan. Linearizacija se lako postiže sa dva operaciona pojačavača (slika 9.10). Tačka A je na potencijalu nula (virtuelna masa), pa se na osnovu balansa struja u toj tački ($I_1 + I_2 = -I_p$) dobija:

$$\frac{E}{R_1} - \frac{R + \Delta R}{R_1} \cdot \frac{E}{R} = -\frac{U_{IZL}}{R_p}, \quad (9.33)$$

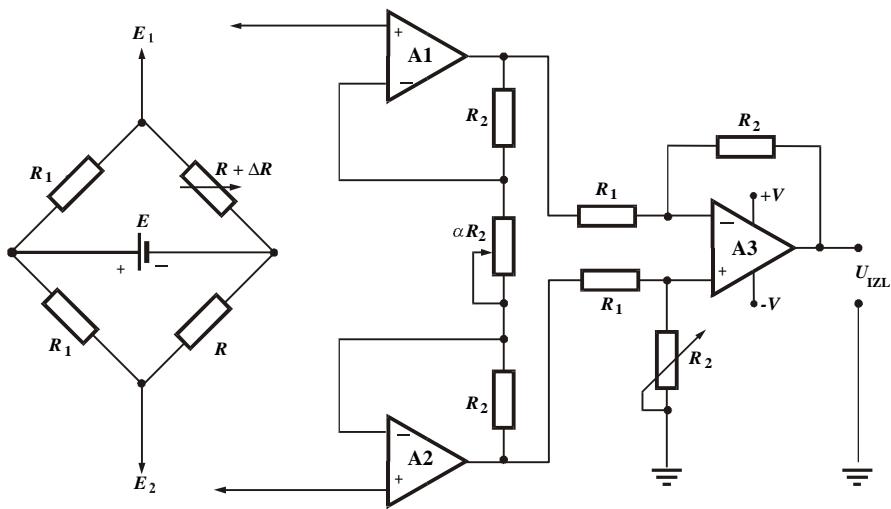
Izlazni napon je direktno proporcionalan promeni otpora senzora:

$$U_{IZL} = \frac{ER_p}{RR_1} \cdot \Delta R \quad (\text{ili: } \frac{U_{IZL}}{E} = \frac{R_p}{RR_1} \Delta R). \quad (9.34)$$

Pomoću potenciometra podešava se izlazni opseg signala. Dvostrano napanjanje izlaznog pojačavača omogućava detekciju negativnih vrednosti ΔR , tj. smanjivanje R_s u odnosu na nominalnu vrednost.



Slika 9.10. Kolo za linearizaciju izlaza Vitstonovog mosta



Slika 9.11. Priključivanje Vitstonovog mosta na instrumentacioni pojačavač

Veću osetljivost izlaznog napona i bolju linearnost daje konfiguracija sa mernim kolom i tzv. instrumentacionim mernim pojačavačem (slika 9.11). Otpornici R upareni su sa tačnošću do 1%. Senzor je i ovde predstavljen sa $R + \Delta R$. Potenciometar R podešava se tako da njegov otpor bude jednak početnoj vrednosti otpora senzora R . Nakon uključenja mernog mosta, pomoću potenciometra αR_2 podesi se da izlazni napon bude nula, tj. $U_{izl} = 0$.

Pošto su otpornici R_1 upareni, to je $E_1 = 0,5E$, pa je:

$$E_1 - E_2 = \frac{E}{2} \frac{\Delta R}{2R + \Delta R}. \quad (9.35)$$

S obzirom na to da je ΔR znatno manje od R , iz prethodne jednačine proizilazi da je:

$$E_1 - E_2 = \frac{E}{4} \frac{\Delta R}{R}. \quad (9.36)$$

Pojačanje instrumentacionog mernog pojačavača je:

$$\frac{U_{izl}}{E_1 - E_2} = -\frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{2}{\alpha} \right), \quad (9.37)$$

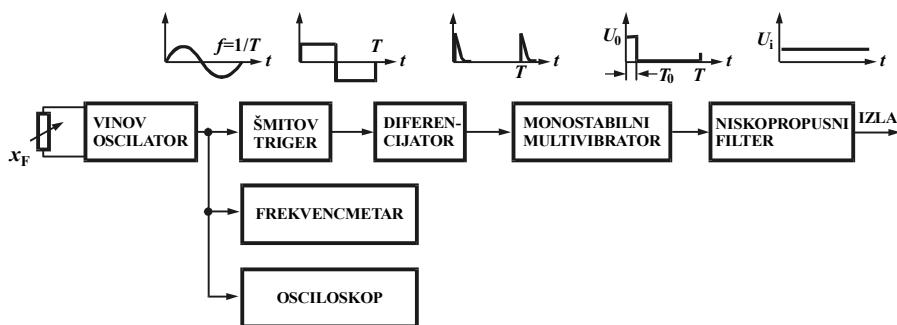
gde se α može podešavati po želji.

Izlazni napon konačno je:

$$U_{izl} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{E}{4} \frac{\Delta R}{R} \cdot \left(1 + \frac{2}{\alpha} \right). \quad (9.38)$$

Prema tome za $\Delta R \ll R$ izlazni napon proporcionalan je ΔR , a izlazni opseg može se podešavati prema potrebi zahvaljujući podešljivosti pojačanja. Osim linearog izlaza i velikog pojačanja, primena instrumentacionog pojačavača omogućava i veliko potiskivanje zajedničke jednosmerne komponente na ulazu. Njena vrednost u konkretnom primeru je $E_1 = E_2 = 0,5E$ pri $U_{izl} = 0$.

Šeme sa frekventnom modulacijom imaju veliku stabilnost i rezoluciju. Promene otpora u harmonijski ili impulsni signal čija frekvencija zavisi od merenog otpora primenjuje se za senzore koji su locirani daleko od mikroprocesora, pri čemu se ujedno postiže i veća zaštita od šumova. Najčešće je otpornički senzor priključen u kolo Vinovog RC -oscilatora. Njegova rezonantna frekvencija menja se prema Tomsonovom obrascu $f_r = 1/2\pi RC$ u kome je R mereni otpor i C kapacitet fiksног kondenzatora. Za očitanje frekvencije izlaznog signala potreban je konvertor frekvencije u napon, frekvenčmetar ili osciloskop (slika 9.12).



Slika 9.12. Pretvaranje promene otpora u frekvenciju

Konvertor f/U sadrži Šmitov triger koji služi za formiranje pravilnih pravougaonih impulsa perioda $T = 1/f$, zatim diferencijator pozitivne promene napona koji služi za detekciju usponske ivice, monostabilnog multivibratora koji daje impuls U_0 konstantne širine $T_0 < T$, te niskopropusni filter na čijem je izlazu jednosmerni napon proporcionalan frekvenciji f :

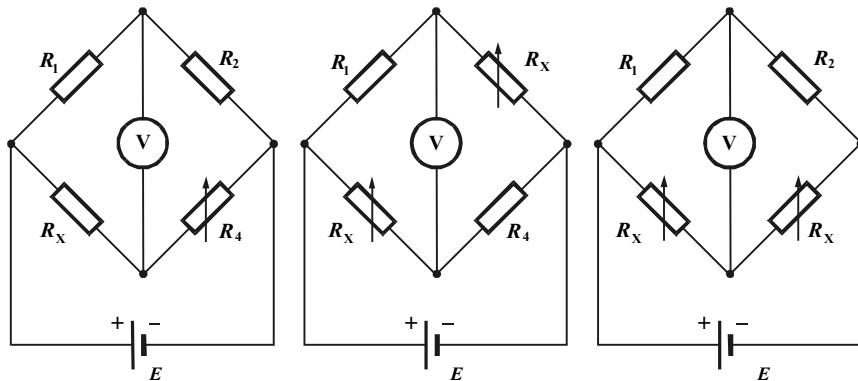
$$U_i = \frac{U_0 T_0 + 0 \cdot (T - T_0)}{T} = \frac{U_0 T_0}{T} = k_i f. \quad (9.39)$$

PITANJA I ZADACI

- 1) Odrediti osetljivost statičke karakteristike izlazni napon – otpor senzora za Vitstonove mostove koji su aranžirani kao na slici 9.13. Smatrati da je unutrašnji otpor naponskog izvora jednak nuli, da je ulazni otpor voltmetra beskonachen, te da je $R_1 = R_2 = R_4 = R$.

Napomena: osetljivost je $S_U = \lim_{\Delta R_x \rightarrow 0} (\Delta U / \Delta R_x)$.

Rešenje: a) $S_U = \frac{ER}{(R_x + R)^2}$, b) $S_U = \frac{2ER}{(R_x + R)^2}$, c) $S_U = 0$.



Slika 9.13

- 2) Vitstonov most napaja se iz baterije $U_0 = 5 \text{ V}$ (slika 9.14a). Galvanometar ima unutrašnji otpor $R_u = 100 \Omega$ i strujnu osetljivost $S_G = 10 \text{ mm}/\mu\text{A}$. Ako se otpornost senzora $R = 2000 \Omega$ promeni za $\Delta R = 5 \Omega$, za koliko se pomeri kazaljka galvanometra?

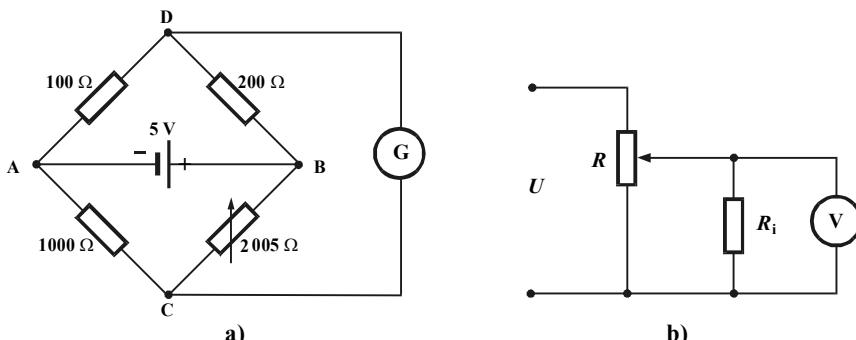
Rešenje: $d = S_G I_G = 33,4 \text{ mm}$.

Napomena: prema Tevenenovoj teoremi je $I_G = U_{eq}/(R_{eq} + R_u) = 3,34 \mu\text{A}$, gde su $U_{eq} = U_{CD} = 2,73 \text{ mV}$ i $R_{eq} = (100\parallel 200) + (1000\parallel 2005) = 730 \Omega$

- 3) Za potenciometarski senzor ukupnog otpora $R = 3 \text{ k}\Omega$, i napona napajanja $U = 5 \text{ V}$ izlazni napon meri se voltmetrom koji ima unutrašnji otpor $R_i = 100 \text{ k}\Omega$. Odrediti kolika je maksimalna absolutna i relativna greška pokazivanja u odnosu na pokazivanje voltmетra koji ne opterećuje senzor (slika 9.14b).

Rešenje:

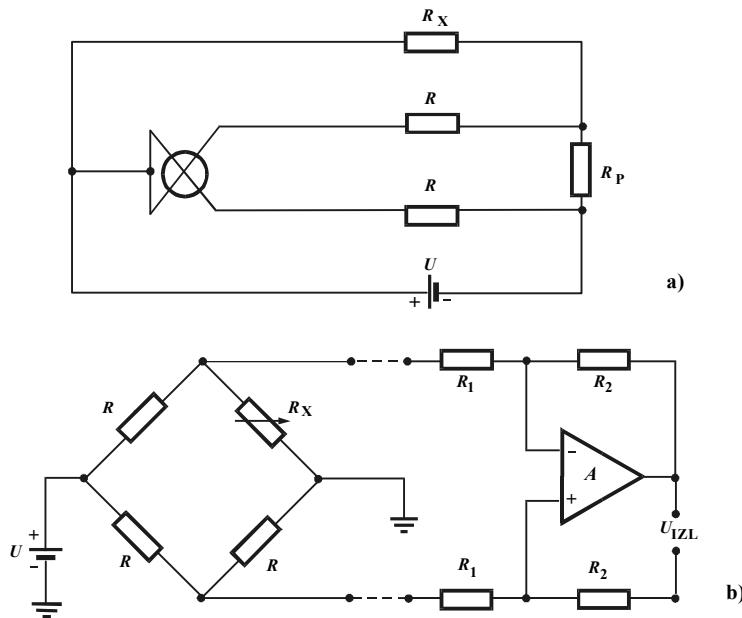
$$\Delta U_{i,max} = 0,0225 \text{ V}, \varepsilon = (\Delta U_{i,max}/U_{i,max})100\% = 0,45\%$$



Slika 9.14.

- 4) Za merenje manjih otpora R_x primenjuju se šeme u kojima je jedan namotaj logometra preko predotpora R_1 spojen paralelno otporu R_x , a drugi namotaj je preko predotpora R_2 spojen na izvor napajanja U (slika 9.15a). Odrediti pokazivanje logometra $\alpha = f(I_1/I_2)$.

Rešenje: $\alpha = f\left(\frac{R_2 R_x}{R_1 R_p + R_x (R_p + R_1)}\right)$.



Slika 9.15.

5) Izračunati vrednost izlaznog napona za Vitstonov most sa pojačavačkim stepenom (slika 9.15b). Dato je $R_x = 1,1R$, $R_1 = R_3 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = R_4 = 10 \text{ k}\Omega$ i $U = 5 \text{ V}$.

Rešenje: $U_{izl} = -1,25 \text{ V}$.

LITERATURA

1. V. Vugić, M. Popović: *Neki aspekti primjene mosnih pojačavača kod mjernih pretvarača temperature*, JUREMA, 28(1989), 4 svezak, str. 56-59.
2. P. Til': *Električeskie izmerenija neelektričeskikh veličin*, Energoatomizdat, Moskva, 1987.
3. *Električeskie izmerenija električeskikh i neelektričeskikh veličin* (red. E.S. Poliščuk), Višča škola, Kijev, 1984.
4. G.K. Nečaev: *Električeskie izmerenija i avtomatičeskij kontrol'*, Višča škola, Kijev, 1983.
5. Dž. Rutkovskij: *Integral'nye operacionnye usiliteli* (prev. sa engl.), Mir, Moskva, 1978.
6. T. Brodić: *Linearni integrirani sklopovi*, Svetlost, Sarajevo, 1979.
7. D. Stanković: *Zbirka rešenih zadataka iz fizičko-tehničkih merenja*, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 1984.
8. N.D. Kuznecov, V.S. Čistjakov: *Sbornik zadač i voprosov po teplotehničeskim izmerenijam i priborom*, Energiya, Moskva, 1978.
9. *Sensors and control*, CD-ROM, Honeywell, 2003.
10. *Principi rada otporničkih senzora*: www.sensormag.com/resource/lit_show
11. *Dokumentacija proizvodača*: www.motorola.com,

10

KAPACITIVNI SENZORI

10.1. PRINCIP RADA

Osnovne postavke. Dve metalne ploče između kojih se nalazi dielektrični (izolacioni) materijal grade kondenzator (slika 10.1a) kapaciteta:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d}, \quad (10.1)$$

gde su: S površina ploča [m^2], d rastojanje [m], ϵ relativna dielektrična konstanta, koja je uvek veća od jedinice, a za gasove gotovo jednaka jedinici, te ϵ_0 dielektrična konstanta vakuuma:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} [\text{F/m}]. \quad (10.2)$$

Ukoliko se na S , d ili ϵ utiče nekom nenelektričnom veličinom, tada kapacitet C zavisi od te veličine, pa se na taj način dobija kapacitivni senzor. Već prema tome utiče li se na S , d ili ϵ , postoje razne konstrukcije kapacitivnih senzora. Za sve njih je zajedničko da spadaju u pasivne senzore.

Dobre osobine kapacitivnih senzora su: jednostavnost, preglednost, visoka osjetljivost, svestrana upotrebljivost (kako za praćenje stacionarnih tako i za praćenje brzo promenljivih fizikalnih veličina), te primena i kod viših temperatura. Loša osobina kapacitivnih senzora je njihov veliki unutrašnji otpor, koji zahteva još veći ulazni otpor mernog elektronskog bloka. Na primer, kapacitivni senzor sa elektrodama površine 10 cm^2 , koje su na međusobnom rastojanju 1 mm u vazduhu, ima kapacitet $8,8 \text{ pF}$. Modul njegove impedanse $1/(j\omega C)$ na frekvenciji $f=50 \text{ kHz}$ je $320 \text{ k}\Omega$, a na frekvenciji 20 kHz čak $905 \text{ k}\Omega$. Nedostatak je takođe i osjetljivost relativne dielektrične konstante dielektrika na delovanje tečnosti sa $\epsilon_r > 1$, kao što su razna ulja, a naročito voda ($\epsilon_r = 80$).

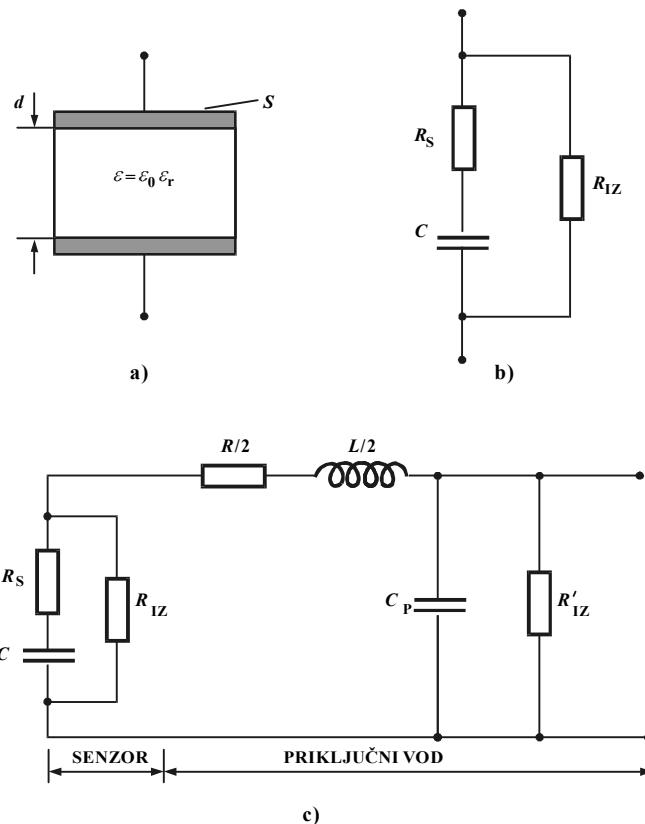
Ekvivalentna šema kapacitivnog senzora. Kapacitivni senzori nemaju samo kapacitet, već uvek poseduju i izvesnu induktivnost i omski otpor. Induktivnost im je mala, i najčešće se zanemaruje, dok otpor može biti značajan. Ove osobine kapacitivnog senzora mogu se prikazati ekvivalentnom šemom (slika 10.1b).

Otpor R_v je aktivni otpor realnog kondenzatora zbog kojeg dolazi do disipacije energije u dielektriku. Označava se kao vlastiti otpor kondenzatora ili otpor gubitaka u dielektriku. Na ekvivalentnoj šemi predstavljen je u serijskoj vezi sa kondenzatorom, pri čemu je $R_s \ll 1/\omega C$. Otpor gubitaka može se predstaviti u

paralelnom spoju sa kondenzatorom. Tada je $R_p \gg 1/\omega C$ i $R_p = (1/\omega C)^2/R_s$. Gubici energije izražavaju se tangensom ugla gubitaka:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U_{R_s}}{U_c} = \frac{IR_s}{I\frac{1}{\omega C}} = R_s \omega C \quad \text{ili: } \operatorname{tg} \delta = \frac{I_{R_p}}{I_{X_c}} = \frac{U/R_p}{U/X_c} = \frac{1}{\omega R_p C}, \quad (10.3)$$

koji zavisi od kružne frekvencije ω naizmeničnog napona U priključenog na krajevima kondenzatora.



Slika 10.1. Kapacitivni senzor: a) opšti prikaz, b) ekvivalentna šema sa vlastitom otpornošću u seriji, c) ekvivalentna šema kapacitivnog senzora sa priključnim vodovima

S obzirom na male vrednosti ugla δ (delovi stepena), može se smatrati da je $\operatorname{tg} \delta \approx \delta$. Kvalitet (dobrota) kondenzatora često se izražava recipročnom vrednošću od δ , tj. kao odnos reaktivne snage nagomilane u kondenzatoru prema aktivnoj snazi (snazi gubitaka): $Q_c = P_r/P_{gub} = UI \sin \phi / UI \cos \phi = UI \cos \delta / UI \sin \delta = 1/\delta$ ili $Q_c = R_p \omega C = 1/R_s \omega C$. Pored gubitaka usled nesavršenosti dielektrika, u kapacitivnom senzoru postoje i Džulovi gubici – zbog proticanja struje kroz vodljive obloge, te gubici usled polarizacije dielektrika.

Otpor izolacije R_{iz} zavisi od provodnosti dielektrika i držača ploča. Ovaj otpor je izražen kad je napajanje istosmernim naponom. Kod napajanja sa naizmeničnim naponom njegov uticaj može se zanemariti ako je frekvencija napona dovoljno velika da je $(1/\omega C) \ll R_{iz}$.

Ekvivalentna šema kapacitivnog senzora sa priključnim vodovima (slika 10.1c) bitna je za razmatranje električnih veza između kapacitivnog senzora i sredstava za obradu informacija.

Na osjetljivost kapacitivnog senzora utiču omski otpor R i induktivnost priključnih vodova L , a takođe i otpor izolacije između vodova R'_{iz} i kapacitet između vodova C_p . Kapacitet između vodova uključuje i parazitni kapacitet između elektroda. Uticaj priključnih vodova je zanemarljiv ako je ispunjen uslov:

$$R, \omega L \ll \frac{1}{\omega C} \ll R'_{iz}, \frac{1}{\omega C_p}. \quad (10.4)$$

Statička karakteristika kapacitivnog senzora nije određena jednoznačno. U zavisnosti od toga da li se kapacitet menja zbog promene površine obloga S , njihovog rastojanja d ili zbog promene relativne dielektrične konstante dielektrika ϵ , razlikuju se:

a) statička karakteristika

$$C = C(S) = k_1 S, \quad (10.5)$$

koja je linearna, pa je osjetljivost kapacitivnog senzora na promenu površine:

$$\frac{\Delta C}{\Delta S} = k_1 = \epsilon_0 \epsilon \frac{1}{d} = \text{const}; \quad (10.6)$$

b) statička karakteristika

$$C = C(d) = k_2 \frac{1}{d}, \quad (10.7)$$

koja je nelinearna, pa osjetljivost nije ista u svakoj tački karakteristike:

$$\frac{\Delta C}{\Delta d} = -k_2 = -\epsilon_0 \epsilon \frac{S}{d^2} \neq \text{const}; \quad (10.8)$$

c) statička karakteristika

$$C = C(\epsilon) = k_3 \epsilon, \quad (10.9)$$

koja je linearna, pa je osjetljivost na promenu dielektrične konstante:

$$\frac{\Delta C}{\Delta \epsilon} = k_3 = \epsilon_0 \frac{S}{d} = \text{const}. \quad (10.10)$$

10.2. NAČINI GRADNJE KAPACITIVNIH SENZORA

10.2.1. Kapacitivni senzori sa promenljivom površinom

Načini gradnje kapacitivnih senzora razlikuju se prema tome da li se promena kapaciteta ostvaruje: menjanjem aktivne površine između ploča (elektroda), menjanjem zazora između elektroda ili promenom dielektrika. Svaki način ima dobre i manje dobre osobine. Prema konkretnim tehničkim zahtevima, pažljivom analizom određuju se najpogodniji.

Prosti pločasti kapacitivni senzor. Ovaj tip senzora napravljen je na bazi pločastog kondenzatora (slika 10.2a). Jedna ploča je fiksna, a druga se pomiče, tako da je kapacitet određen preklapajućom površinom na dužini x :

$$C = \epsilon_0 \epsilon \frac{xb}{d}, \quad (10.11)$$

ili, u relativnom obliku, u odnosu na maksimalni kapacitet za $x=l$:

$$\frac{C}{C_{\max}} = \frac{x}{l}. \quad (10.12)$$

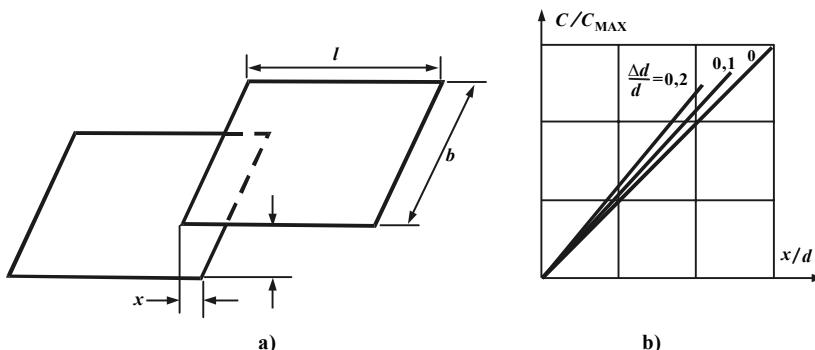
Dobijena statička karakteristika je linearna. Međutim, rubni efekti elektrostatičkog polja utiču na kapacitet. Posebno je teško održavati pravac kretanja ploče tako da se ne javi poprečno kretanje, tj. odstupanje razmaka između ploča za Δd . Ako postoje ovi uticaji, statička karakteristika postaje nelinearna:

$$\frac{C}{C_{\max}} = \frac{x}{l} \frac{1}{1 - (\Delta d/d)}. \quad (10.13)$$

Kako je $(\Delta d/d) \ll 1$, linearizacijom se dobija:

$$\frac{C}{C_{\max}} = \frac{x}{l} \left(1 + \frac{\Delta d}{d} \right). \quad (10.14)$$

Uticaj bočnog kretanja na statičku karakteristiku manifestuje se, dakle, kao multiplikativna greška. Na slici 10.2b. prikazana je familija realnih statičkih karakteristika za tipične vrednosti multiplikativne greške.



Slika 10.2. Prosti pločasti kapacitivni senzor: a) način gradnje, b) statička karakteristika

Poboljšani pločasti senzor (slika 10.3a) je pogodniji za tehničku realizaciju jer je manje osetljiv na poprečno kretanje. Promenu kapaciteta opisuje jednačina:

$$\frac{C}{C_{\max}} = \frac{x}{l} \frac{1}{1 - (\Delta d/d)^2}. \quad (10.15)$$

Bočno odstupanje zbog neparalelnog kretanja je relativno malo, odnosno $(\Delta d/d) \ll 1$. Nakon razvoja u red dobije se statička karakteristika sa multiplikativnom greškom:

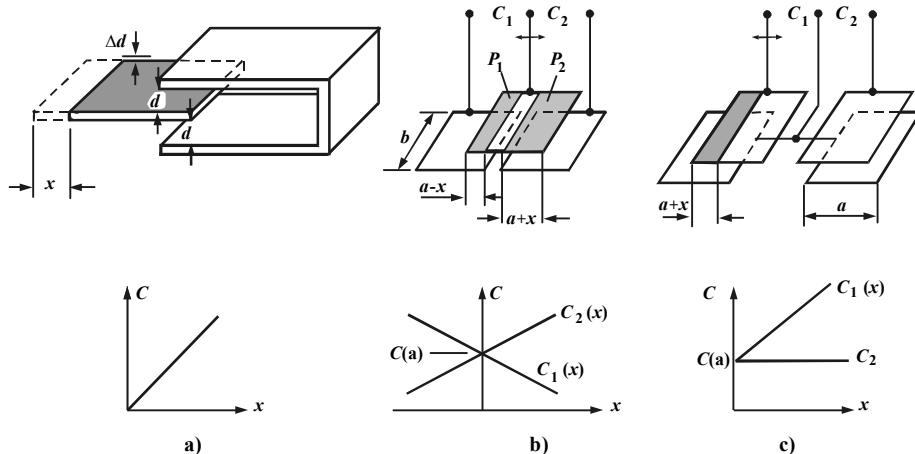
$$\frac{C}{C_{\max}} = \frac{x}{l} \left[1 + \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^2 \right]. \quad (10.16)$$

Greška je kvadrat male veličine, pa je zato znatno manja nego kod prostog kapacitivnog senzora.

Diferencijalni senzor sa promenljivom površinom između ploča sastoji se od dve fiksne i jedne pokretne ploče. Takav senzor ima dva radna kondenzatora (slika 10.3b). Prilikom pomeranja pokretne ploče kapacitet jednog kondenzatora se povećava, a drugog smanjuje:

$$C_1 = \epsilon_0 \epsilon \frac{b(a+x)}{d} \quad \text{i} \quad C_2 = \epsilon_0 \epsilon \frac{b(a'-x)}{d}. \quad (10.17)$$

Ugradnjom diferencijalnog kapacitivnog senzora u mosni spoj omogućava se istovremeno praćenje promena na oba kondenzatora, pa je statička karakteristika takvog spoja razlika $C_1 - C_2$. Time se proširuje merni opseg, i postiže veća tačnost nego kod prostog kapacitivnog senzora.



Slika 10.3. Izvedbe pločastih kapacitivnih senzora i njihove statičke karakteristike:
a) poboljšana varijanta, b) diferencijalni, c) poludiferencijalni

Poludiferencijalni kapacitivni senzor sa promenljivom površinom (slika 10.3c). Ovakav senzor sastoji se od dva kondenzatora, od kojih je jedan radni, a drugi fiksni:

$$C_1 = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{b(a+x)}{d} \quad \text{i} \quad C_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{ba'}{d}. \quad (10.18)$$

Statička karakteristika poludiferencijalnog kapacitivnog senzora linearna i u celosti se nalazi u prvom kvadrantu.

Ugaoni kapacitivni senzor. Ploče kod kapacitivnog senzora mogu biti izvedene kao kod ugaonog kondenzatora. Statorska ploča je fiksna a rotorska se zakreće za ugao α (slika 10.4a). Statička karakteristika u relativnom obliku je modifikovana jednačina (10.12), odnosno:

$$\frac{C}{C_{\max}} = \frac{\alpha}{180^\circ}, \quad (10.19)$$

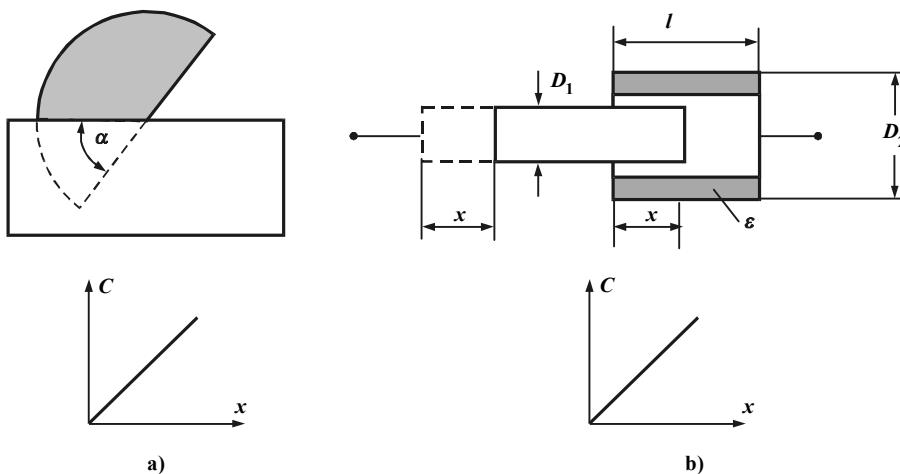
pa sve ono što se odnosi na pločaste kapacitivne senzore sa uzdužnim pomeranjem ploča važi i za zakretne pločaste kondenzatore. Ovi senzori izgrađeni su tako da je zakretni moment rotorske ploče veoma mali, reda 0,1 Nm.

Cilindrični kapacitivni senzor. Za praktične primene veoma je pogodan senzor na bazi cilindričnog kondenzatora (slika 10.4b). Metalne elektrode su u obliku cilindra, poluprečnika r_1 i r_2 , a između njih je dielektrički dielektrične konstante ε .

Kapacitet cilindričnog senzora računa se na osnovu formule

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{2\pi x}{\ln(r_2/r_1)}, \quad (10.20)$$

pri čemu je njegova maksimalna vrednost za $x = l$.



Slika 10.4. Izvedbe kapacitivnih senzora: a) ugaoni, b) cilindrični

Pretpostavi li se da je poprečno odstupanje u kretanju pomicnog cilindra takvo da je $(\Delta d/d) \ll 1$, statička karakteristika je:

$$\frac{C}{C_{\max}} = \frac{x}{l} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^2 \right]. \quad (10.21)$$

Kao što se vidi, uticaj multiplikativne greške koja nastaje zbog neparalelnog kretanja pokretnе elektrode kod cilindričnog senzora je dvostruko manji nego kod poboljšane verzije prostog pločastog senzora.

10.2.2. Kapacitivni senzori sa promenljivim razmakom između ploča

Kapacitivni senzori sa promenljivim razmakom između ploča imaju nelinearnu statičku karakteristiku sa velikom osetljivošću u odnosu na promenu razmaka između ploča Δd . Konstrukcije gde je primenjen ovaj princip svode se na proste pločaste senzore jednokapacitivnog tipa ili složenije pločaste senzore dvokapacitivnog tipa – diferencijalne i poludiferencijalne.

Promena kapaciteta je veoma osetljiva na promenu razmaka između ploča senzora, pa se zato ovi senzori upotrebljavaju za praćenje fizikalnih veličina koje se manifestuju kao mali pomaci reda milimetra, mikrometra, pa i manje.

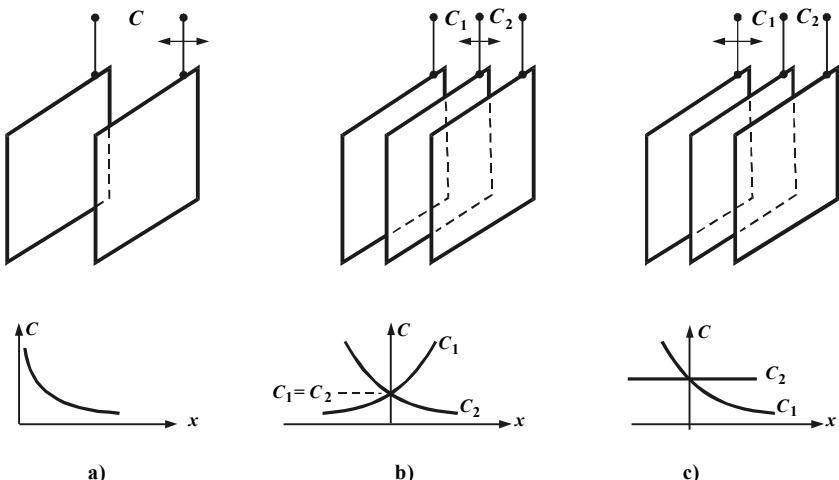
Prosti pločasti kapacitivni senzor sa promenljivim razmakom između ploča (slika 10.5a), u skladu s jednačinom (10.8), ima negativnu osetljivost $\Delta C/\Delta d$. To znači da s porastom pomaka kapacitet senzora opada i obratno.

Osnovni nedostatak prostih, jednokapacitivnih senzora, bilo da im se kapacitet menja zavisno od veličine aktivne površine ploča bilo veličine zazora između njih, jest zavisnost kapaciteta i od drugih veličina, a ne samo od merene. Zbog toga, tačno izmeren kapacitet ne znači i tačno određivanje merene veličine. Naprotiv, takvo merenje uvek sadrži grešku. Ovu činjenicu treba imati u vidu prilikom izbora merne šeme sa jednokapacitivnim senzorima. Kapacitet ovakvih senzora određuje se komparacijom sa etalonom kapaciteta. Klasične kapacitivne sonde imaju samo radni kapacitet (senzor), dok je etalon kapaciteta smešten u mernom elektronskom bloku. Savremene sonde sadrže i radni kapacitet i etalon kapaciteta kao referencu. Poremećaji utiču jednako na oba kapaciteta, pa se u većini slučajeva dobija invarijantno merenje u odnosu na smetnje.

Diferencijalni kapacitivni senzor sa promenljivim zazorom ima tri elektrode (slika 10.5b). Središnja elektroda se pokreće u skladu sa delovanjem merene veličine. Senzor se sastoji od dva kondenzatora, čiji su kapaciteti:

$$C_1 = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{bl}{d_0 - x} = C_{\max} \frac{1}{1 - x/d_0} \quad (10.22)$$

$$C_2 = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{bl}{d_0 + x} = C_{\max} \frac{1}{1 + x/d_0}. \quad (10.23)$$



Slika 10.5. Kapacitivni senzor sa promenljivim zazorom: a) prosti, b) diferencijalni, c) poludiferencijalni

Statička karakteristika je dvokvadrantna ako se izlaz uzima sa oba kondenzatora. U tom slučaju merni opseg dvostruko je veći nego kod prostog pločastog kapacitivnog senzora:

$$\frac{x}{d_0} = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} . \quad (10.24)$$

Karakteristika je linearna samo za male pomeraje, odnosno za $(x/d_0) << 1$.

Poludiferencijalni kapacitivni senzor sa promenljivim zazorom ima pokretnu jednu vanjsku elektrodu (slika 10.5c). Statička karakteristika je linearna samo za $\Delta d << d$. Kod ovakvih senzora prisutna su dva izlazna električna parametra: kapacitet C_1 , koji se menja sa promenom merene veličine, i kapacitet C_2 , na koji promene merene veličine ne utiču. Ova osobina primeniće se u gradnji kapacitivnih senzora odnosa dveju fizikalnih veličina od kojih je jedna fiksna.

Osnovne odlike dvokapacitivnih senzora (diferencijalnih i poludiferencijalnih) u odnosu na jednokapacitivne su manja osetljivost na smetnje, veća stabilnost i veće mogućnosti primene.

10.2.3. Kapacitivni senzori sa promenljivim dielektrikom

Kapacitet linearno zavisi od dielektrične konstante izolatora. Ova činjenica omogućava gradnju pločastih i cilindričnih kapacitivnih senzora za direktno praćenje: nivoa tečnosti (mazuta, goriva, vode, kiseline), nivoa sipkastih materijala (pesak, cement, ugljena prašina), vlažnost tvrdih i sipkih materijala, debljine, te mnogih drugih veličina koje se mogu dovesti u vezu sa promenom dielektrične konstante. Bitan uslov je da materijal između elektroda kondenzatora ne sme biti električno vodljiv.

Pločasti kapacitivni senzor sa promenljivim dielektrikom. Homogeni dielektrik, najčešće višeslojni, smešten je paralelno sa elektrodama i okomito na elektrode.

U prvom slučaju senzor se razmatra kao kondenzator sa serijskom vezom od dva kondenzatora sa posebnim dielektricima (slika 10.6a). Ukupni kapacitet je:

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \varepsilon_0 \frac{S}{d_1/\varepsilon_1 + d_2/\varepsilon_2}, \quad (10.25)$$

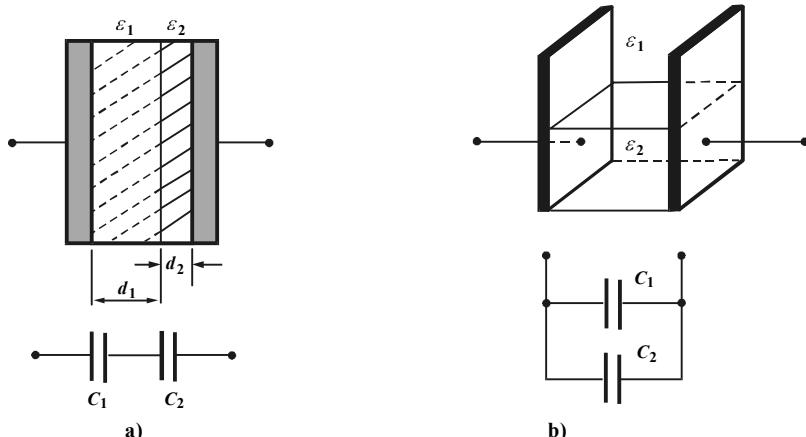
gde su: S površina elektroda senzora, ε_1 i ε_2 relativne dielektrične konstante materijala, te d_1 i d_2 debljine slojeva materijala između elektroda.

Neka se dielektrična konstanta jednog materijala, na primer ε_1 , menja, zadržavajući pri tome istu debljinu. U tom slučaju je statička karakteristika $C(\varepsilon_1)$ nelinearna, a osetljivost $(\Delta C/\Delta\varepsilon_1) \neq \text{const}$. Samo za male promene dielektrične konstante statička karakteristika može se smatrati linearnom. Ovakav tip kapacitivnog senzora pogodan je za praćenje karakteristika neelektričnih materijala u obliku trake.

U slučju kada su slojevi dielektrika okomiti na elektrode kapacitivnog senzora (slika 10.6b), ekvivalentna šema senzora sastoji se od dva kondenzatora u serijskoj vezi čiji je ukupni kapacitet linearna funkcija visine x donjem dielektriku:

$$C = C_1 + C_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_1 \frac{b(l-x)}{d} + \varepsilon_0 \varepsilon_2 \frac{bx}{d} = k_0 + k_1 x. \quad (10.26)$$

Konstanta k_0 odgovara kapacitetu C za $x=0$, a konstanta k_1 je osetljivost senzora $(\Delta C/\Delta x)$. Ovakvi senzori služe za praćenje nivoa tečnih dielektrika.



Slika 10.6. Pločasti kapacitivni senzor sa promenljivim dielektrikom: a) dielektrici paralelno sa elektrodama, b) dielektrici okomiti na elektrode

Cilindrični kapacitivni senzor sa promenljivim dielektrikom. Dimenziije dielektrika kod cilindrične izvedbe menjaju se okomito na elektrode. Ekvivalentni kapacitivni senzor, slično kao u prethodnom slučaju, sastoji se od dva paralelna

kondenzatora, na osnovu čega se izvodi odgovarajuća statička karakteristika. Senzori ovog tipa grade se za merenje nivoa sipkastih i tečnih materijala.

10.3. MERNE ŠEME SA KAPACITIVNIM SENZORIMA

Principi gradnje mernih šema sa kapacitivnim senzorima. Osnovni problem koji se javlja prilikom uključivanja kapacitivnog senzora u mernu šemu je odstranjivanje parazitnih kapaciteta između obloga kondenzatora sa priključnim vodovima i mase. Parazitni kapaciteti su nestabilni i u mnogim slučajevima njihova vrednost je veća od radnog kapaciteta, koji je u funkcionalnoj zavisnosti od merene veličine. Uticaj parazitnih kapaciteta na tačnost pretvaranja senzora određen je tipom mjerne šeme. Na primer, u klasičnim mosnim mernim šemama kapacitivni senzor je u jednoj grani mosta. U zavisnosti od izbora tačke uzemljenja jedan od parazitnih kapaciteta kratko prespaja bilo izvor napajanja (što u principu nije opasno za uravnotežena kola) bilo jednu granu mosta (što dovodi do netačnosti, jer se impedansa te grane promeni).

Šema za eliminaciju uticaja parazitnih kapaciteta naziva se potencijalno-strujna ili trokontaktna šema. Osnovni princip ove šeme je da nijedna elektroda senzora nije direktno spojena sa masom (slika 10.7a). Na tzv. potencijalnu ili visokopotencijalnu elektrodu priključen je naponski izvor sa zanemarljivo malim unutrašnjim otporom ($Z_{izl} \rightarrow 0$). Između strujne elektrode i mase priključen je ampermetski indikacioni instrument sa malim ulaznim otporom ($Z_{ul} \rightarrow 0$), zbog čega je ta elektroda na nultom potencijalu u odnosu na masu i naziva se niskopotencijalnom elektrodom.

Struja u kolu na osnovu ove jednostavne UI šeme je:

$$I(j\omega) = U(j\omega) \cdot j\omega C . \quad (10.27)$$

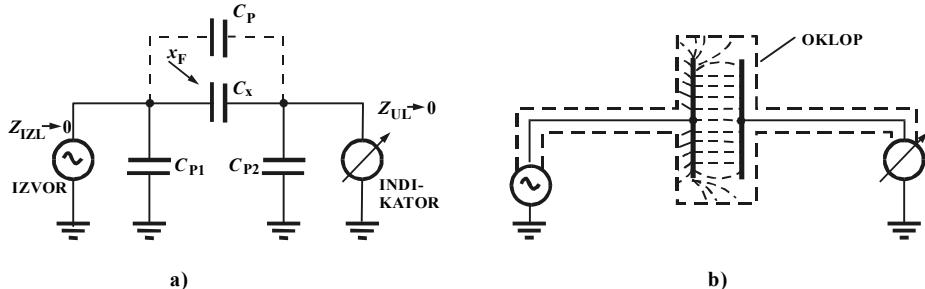
Merenje kapaciteta ima izvesna ograničenja. Ako se meri kapacitet od 10 pF, uz maksimalnu vrednost struje do 100 mA i napon izvora od $10 V_{ef}$, trebalo bi da frekvencija tog napona bude $f = 1,6$ GHz. To je velika vrednost za tehniku senzora. Treba primetiti da je struja I invarijantna u odnosu na parazitne kapacitete C_{p1} i C_{p2} ako su ispunjene nejednakosti:

$$\begin{aligned} Z_{izl} &<< 1/\omega C_{p1} \\ Z_{ul} &<< 1/\omega C_{p2}, \end{aligned} \quad (10.28)$$

gde je ω radna frekvencija.

Potencijalno-strujna šema priključivanja kapacitivnog senzora omogućava otklanjanje parazitnih kapaciteta u odnosu na masu. Za radni kapacitet senzora reda 1 pF i priključne kablove od nekoliko desetina metara, tj. za parazitne kapacitete znatno veće od radnog, ukupna greška merenja je manja od 0,01%. Međutim, vanjska elektrostatička polja uslovljavaju pojavu dodatnog kapaciteta C_p između obloga

senzora. Ovaj parazitni kapacitet je paralelan radnom kapacitetu i otklanja se oklapanjem elektroda (slika 10.7b).



Slika 10.7. Priklučivanje kapacitivnog senzora: a) potencijalno-stručna šema, b) elektrostatička zaštita

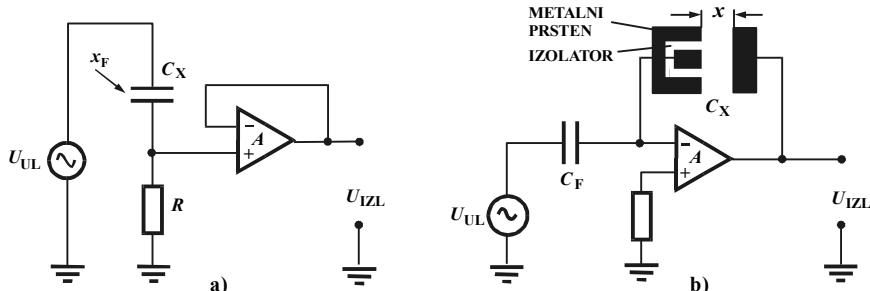
Prosta šema napravljena je na bazi pasivnog diferencijatora, tj. delitelja napona kojeg formiraju kapacitivni senzor C_x i fiksni otpornik R (slika 10.8a). Amplituda izlaznog napona:

$$U_{izl} = \frac{R}{\sqrt{(1/j\omega C_x)^2 + R^2}} U_{ul}, \quad (10.29)$$

postaje direktno proporcionalna merenom kapacitetu kada je $1/\omega C_x \gg R$:

$$U_{izl} = R\omega C_x U_{ul} = kC_x. \quad (10.30)$$

Napajanje može biti i jednosmerno, ali je tada šema primenljiva samo za dinamička merenja, dok je C_x priomenljivo. Takvo rešenje primenjuje se kod kapacitivnih mikrofona.



Slika 10.8. Proste šeme: a) sa deliteljem napona, b) sa linearizacijom izlaza

Šema sa linearizacijom izlaza. Kapacitet prostog pločastog kapacitivnog senzora menja se nelinearno sa rastojanjem između ploča: $C_x = k/x$. Kada se takav senzor postavi u povratnu spregu operacionog pojačavača (slika 10.8b), sa fiksnim kondenzatorom C_f u ulaznom krugu, dobija se izlazni napon sa amplitudom koja je direktno proporcionalna pomeraju x :

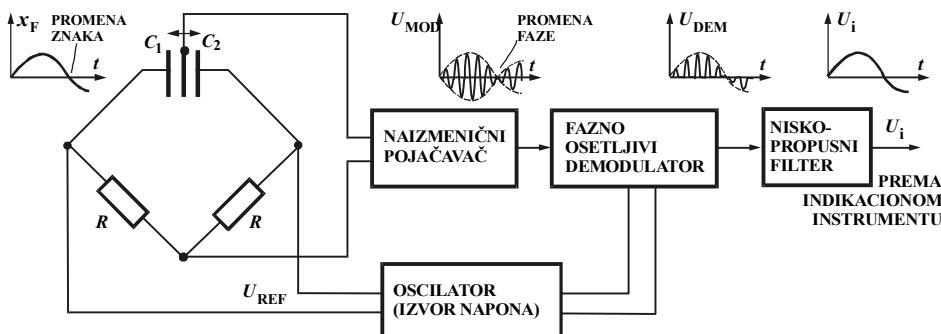
$$U_i(j\omega) = -\frac{1/j\omega C_x}{1/j\omega C_f} U_u(j\omega) = Kx. \quad (10.31)$$

Pobudni napon U_u je harmonijski signal frekvencije oko 50 kHz. Izlazni napon U_i je takođe harmonijski, sa istom frekvencijom od 50 kHz, i potrebno ga je ispraviti da bi se mogao priključiti na jednosmerni voltmeter čija se skala kalibriše u jedinicama pomeraja. Parazitni kapacitet između ploča priključen je paralelno C_x i smanjuje osetljivost merenja. Radi smanjenja njegovog uticaja oko fiksne elektrode se stavlja zaštitni metalni prsten.

Šema sa amplitudnom modulacijom. Izlazni signal u ovakvim šemama je napon čija je amplituda proporcionalna kapacitetu senzora. Na slici 10.9 predstavljena je pasivna mosna šema gde je primenjen ovaj princip. Kapacitivni senzor je u formi pločastog diferencijalnog kondenzatora sa promenljivim zazorom između ploča. Obično je most simetričan, pa je ravnotežno stanje $C_1 = C_2 = C$ i $R_3 = R_4 = R$. Ako se središnja elektroda pomeri za Δd , tada su $C_1 = C + \Delta C$ i $C_2 = C - \Delta C$, pa je izlazni napon na dijagonali mosta:

$$U_{izl} = U_{C1} - U_{R3} = \frac{\frac{1}{j\omega(C + \Delta C)}}{\frac{1}{j\omega(C + \Delta C)} + \frac{1}{j\omega(C - \Delta C)}} U - \frac{1}{2} U = -\frac{1}{2} \frac{\Delta C}{C} U. \quad (10.32)$$

Statička karakteristika $U_{izl} = f(\Delta C/C)$ je linearna. Znak minus znači da je izlazni napon u protivfazi sa naponom napajanja U_{REF} . Ako se izlaz posmatra u odnosu na fiksnu elektrodu kondenzatora $C_2 = C - \Delta C$, signal je u fazi sa naponom napajanja U . To znači da prilikom prolaska pomične elektrode kroz nulti položaj izlazni napon menja znak. Osim toga, izlazni je napon (10.32) niskog nivoa, pa ga je potrebno pojačati pre dovođenja na indikacioni instrument. Amplitudno modulisani signal sa izlaza mosta najpre se pojačava, onda demoduliše pomoću demodulatora sa detekcijom faze i na kraju propusti kroz niskopropusni filter da bi se dobio signal proporcionalan merenoj veličini x_F . Napon napajanja mosta mora imati veliku frekvenciju (10–50 kHz) kako bi ispravljanje napona u demodulatoru bilo tačnije. Priključivanje kapacitivnog senzora u mosni spoj sa amplitudnom modulacijom primenjuje se za praćenje brzo promenljivih mehaničkih veličina.



Slika 10.9. Šema sa amplitudnom modulacijom

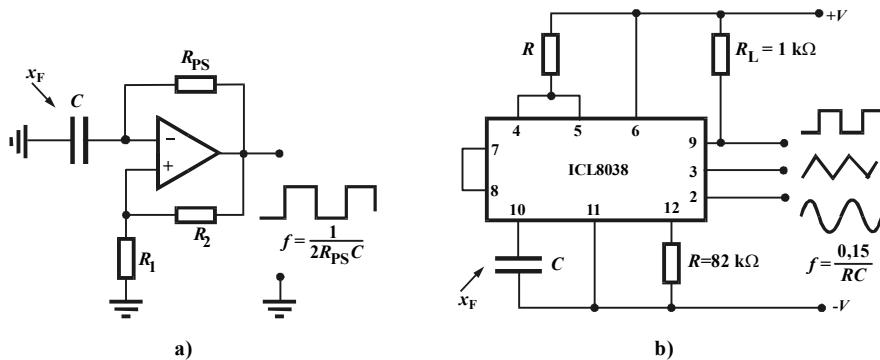
Šema sa frekventnom modulacijom. Kapacitivni senzor je deo ulaznog kruga harmonijskog oscilatora – Hartlijevog, Kolpitsovog ili Vinovog. Na izlazu oscilatora je napon konstantne amplitudne sa frekvencijom koja zavisi od merenog

kapaciteta: $f_r = 1/2\pi RC$ ili $f_r = 1/2\pi\sqrt{LC}$. Konstrukcijom oscilatora podešeno je da se u radnom području senzora ima frekvencija proporcionalna kapacitetu.

Ukoliko nije potrebna velika stabilnost radne frekvencije, onda se može upotrebiti jednostavni relaksacioni oscilator (slika 10.10a). Kolo radi u režimu zasićenja. Kada se izlazni napon komparatora sa $+U_{ZAS}$ promeni na $-U_{ZAS}$, kondenzator se prazni prema $-U_{ZAS}$ sa vremenskom konstantom $R_{PS}C$. Pražnjenje traje sve dok napon na invertujućem ulazu pojačavača, tj. napon na kondenzatoru U_C , ne dostigne napon donjeg praga na neinvertujućem ulazu $U_{DP} = -U_{ZAS}R_2/(R_1 + R_2)$, a tada izlaz ponovo postaje U_{ZAS} . Zatim počinje proces punjenja kondenzatora do napona gornjeg praga $U_{GP} = U_{ZAS}R_2/(R_1 + R_2)$. Obično je kolo simetrično, pa su periodi punjenja i pražnjenja jednaki, odnosno ukupni period oscilacija je $T = 2R_{PS}C \ln(1 + 2R_2/R_1)$. Ako se odabere odnos otpornika $R_2 = 0,86R_1$, dobija se da je frekvencija četvrtki:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2R_{PS}C} . \quad (10.33)$$

Ova frekvencija menja se u intervalu od 10 Hz do 10 kHz, zavisno od vrednosti kapaciteta senzora C . Znatno bolja stabilnost frekvencije oscilovanja i veći opseg promene frekvencije može se ostvariti pomoću specijalnih integrisanih kola namenjenih za generisanje impulsa ili funkcija (LM555, ICL8038). Prednost kola ICL8038 je što sa svega nekoliko eksternih komponenti daje četvrtke, trougaoni i



Slika 10.10. Šema sa frekventnom modulacijom: a) kapacitivni senzor u kolu relaksacionog oscilatora, b) primena integralnog kola za generisanje funkcija

sinusni napon frekvencije $f = 0,15/RC$ od 0,001 Hz do 300 kHz (slika 10.10b).

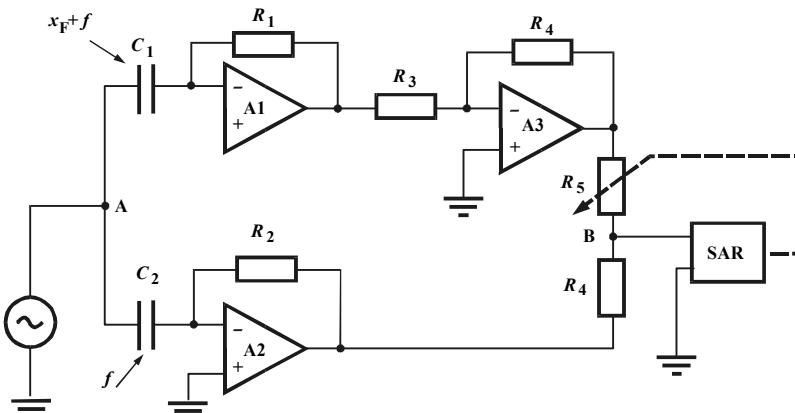
Da se signal dovede na indikacioni instrument, mora se prvo izvršiti demodulacija signala iz oscilatora, kao što je rečeno u tekstu koji se odnosi na sliku 9.11. Pri tome, pretvaranje frekvencije u analogni izlazni napon mora biti linearno u radnom području. Detekcija kapaciteta pomoću šeme sa frekventnom modulacijom izlaznog signala ima bitne prednosti u odnosu na šeme sa amplitudnom modulacijom: višestruko bolja rezolucija očitanja frekvencije od amplitude, mogućnost prenosa izlaza na veća rastojanja i direktno povezivanje sa mikroprocesorom.

Kompenzaciono-mosne šeme koje služe za uključivanje kapacitivnih senzora rade na principu kompenzacije struje ili napona. Uravnoteživanje se provodi reguliranjem struje ili napona u nekoj tački šeme pomoću elektronskih kola, a ne pomoću fiksnih ili promenljivih etalonskih vrednosti kapaciteta kao kod klasičnih mernih mostova.

Na slici 10.11 prikazana je principijelna izvedba kompenzaciono-mosne šeme sa poludiferencijalnim kapacitivnim senzorom. Šema se sastoji od senzora, sistema za automatsku regulaciju nule strujnih signala na izlazu, te sklopa koji omogućava potencijalno-strujno uključivanje senzora. Senzor je predstavljen radnim kapacitetom C_1 i fiksним (referentnim) kapacitetom C_2 . Elektronski sklopovi sa operacionim pojačavačima A_1 i A_2 su pretvarači struje u napon, odnosno omogućavaju potencijalno-strujno uključivanje kondenzatora C_1 i C_2 , a sklop A_3 je invertor. Naponi na izlazu iz A_2 i A_3 su u protivfazi i proporcionalni vrednostima C_1 i C_2 . Uslovi ravnoteže ovih struja u tački B određeni su relacijom

$$C_1 R_1 R_4 / R_3 R_5 = C_2 R_2 / R_6. \quad (10.34)$$

Kao izlazni parametar uzima se odnos tekuće i maksimalne vrednosti



Slika 10.11. Principijelna kompenzaciono-mosna šema za poludiferencijalni kapacitivni senzor

ravnotežnog otpora $R_5/R_{5\max}$. Ako se ostali otpori odaberu tako da je $R_1 R_4 R_6 = R_2 R_3 R_{5\max}$, tada je trenutna vrednost radnog kapaciteta senzora određena u odnosu na referentnu vrednost C_2 kao $C_1/C_2 = R_5/R_{5\max}$.

PITANJA I ZADACI

- 1) Odrediti zavisnost kapaciteta cilindričnog kapacitivnog senzora sa promenljivim dielektrikom (slika 10.12a).

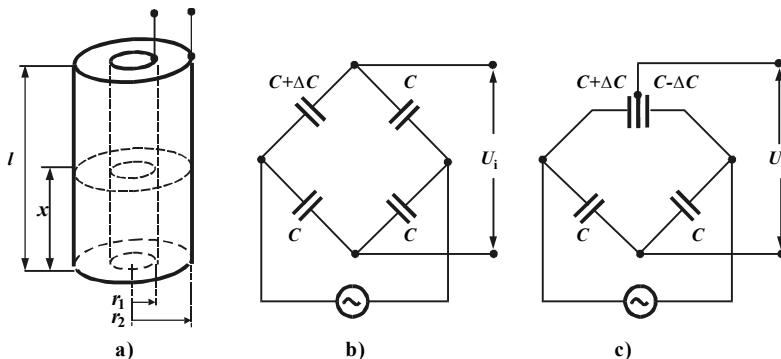
Rešenje: $C = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln(r_2/r_1)} + \frac{2\pi\epsilon_0(\epsilon_1 - 1)x}{\ln(r_2/r_1)}$

- 2) Odrediti osetljivost naizmeničnog mosta za detekciju kapaciteta prostog pločastog kapacitivnog senzora (slika 10.12b), te mosta sa diferencijalnim kapacitivnim senzorom. U oba slučaja promena kapaciteta ostvaruje se promenom zazora između ploča. Uporediti dobijene rezultate.

Rešenje: a) $U_{izl} = -U\Delta C / (4C + 2\Delta C)$, b) $U_{izl} = -U\Delta C / 2C$

- 3) Kapacitivni senzor ima paralelne kružne elektrode prečnika 2 cm na rastojanju 0,25 mm. Između elektroda je vazduh. Izračunati osetljivost na pomeraj.

Rešenje:



Slika 10.12

$$S_d = \frac{\partial C}{\partial d} = -\epsilon_0 \frac{S}{d^2} = -400 \text{ pF/cm}$$

- 4) Uporediti statičke karakteristike kapacitivnih senzora sa promenljivom površinom elektrodama, sa promenljivim zazorom i sa promenljivim dielektrikom.

- 5) Objasniti princip potencijalno-strujnog uključivanja kapacitivnog senzora.

LITERATURA

- D. Milatović, Lj. Milošević, E. Skopljak: *Kapacitivna metoda određivanja nivoa tečnosti*, Zb. Simpozijum Istraživanje vodnog bogatstva kraških predjela, 20(1-17), Sarajevo, 1978.
- F.B. Grinevič, A.I. Novak: *Izmeritel'nye kompensacionno-mostovye ustrojstva s jomkostnymi datčikami*, Naukova dumka, Kijev, 1987.
- W.H. Hinsen: *A simple method of obtaining an analogue output from capacitance as a transducer*, Journal of Physical Electronics, Vol. 4, No 10 (778-779).1971.
- P. Til': *Električeskie izmerenija neelektričeskikh veličin*, (prevod sa njem.), Energoatomizdat, Moskva, 1987.
- J. Millman, C.C. Halkias: *Integrated electronics*, McGraw Hill, New York, 1975.
- D. Stanković: *Fizičko-tehnička merenja. Merenje neelektričnih veličina električnim putem*, Naučna knjiga, Beograd, 1987.
- Principi rada i primena kapacitivnih senzora*: <http://www.lionprecision.com/theory/index.html>
<http://www.sensorland.com/HowPage018.html>
<http://www.capacitance-sensors.com>

11

ELEKTROMAGNETNI SENZORI

11.1. INDUKTIVNI SENZORI

11.1.1. Princip rada

Rad elektromagnetičnih senzora zasniva se na zavisnosti induktivnosti kalema od promene otpora elektromagnetskog kola ili na elektromagnetskoj indukciji. U tom smislu razlikuju se induktivni, međuinduktivni i indukcioni (elektrodinamički) senzori. Induktivni i međuinduktivni spadaju u pasivne, a indukcioni u aktivne senzore.

Induktivnost kalema (svitka, solenoida) sa jezgrom od feromagnetskog materijala i vazdušnim zazorom računa se pomoću sledeće jednačine:

$$\begin{aligned} L &= \frac{N^2}{Z_m} = \frac{N^2}{\sqrt{(R_m + R_\delta)^2 + R_g^2}} = \\ &= \frac{N^2}{\sqrt{\left[\frac{l_m}{\mu_0 \mu_r S_m} + \frac{2\delta}{\mu_0 S_\delta} \right]^2 + \left[\frac{2P_m}{N\phi_m^2} \right]^2}} , \end{aligned} \quad (11.1)$$

gde su: Z_m ukupni magnetni otpor (reluktansa) kola [H^{-1}], R_m , R_δ i R_g magnetni otpor jezgra, zazora i gubitaka [H^{-1}], δ širina zazora [m], S_m i S_δ površina poprečnog preseka jezgra i zazora [m^2], $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$ magnetni permeabilitet vakuma, μ_r relativni magnetni permeabilitet feromagnetika, l_m srednja dužina magnetnih silnica [m], P_m gubitak snage u jezgru [W], ϕ magnetni tok [Wb] i N broj navoja.

Magnetni otpor jezgra i navoja R_m mnogo je manji od magnetnog otpora vazdušnog zazora, tj. $R_m \ll R_\delta$. Pošto je mali magnetni otpor jezgra, gubici u jezgru se mogu zanemariti, tako da je induktivnost određena izrazom:

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S_\delta}{2\delta} , \quad (11.2)$$

gde je S_δ/δ faktor oblika kalema.

Statičke karakteristike. Magnetni permeabilitet, broj navoja i geometrija elektromagnetskog kola menjaju se pod uticajem mehaničkih veličina, te se na osnovu toga grade odgovarajući induktivni senzori. Njihove statičke karakteristike su:

a) induktivnost – širina zazora:

$$L = L(\delta) = k_1 \frac{1}{\delta}, \quad (11.3)$$

gde je osetljivost induktivnosti na promenu zazora:

$$\frac{\Delta L}{\Delta \delta} = -\frac{k_1}{\delta^2} = -\mu_0 N^2 S_\delta \frac{1}{2\delta^2} \neq \text{const}; \quad (11.4)$$

b) induktivnost – površina zazora:

$$L = L(S_\delta) = k_2 S_\delta, \quad (11.5)$$

gde je k_2 osetljivost na promenu površine:

$$\frac{\Delta L}{\Delta S_\delta} = k_2 = \mu_0 N^2 = \text{const}; \quad (11.6)$$

c) induktivnost – magnetni permeabilitet zazora:

$$L = L(\mu_0) = k_3 \mu_0, \quad (11.7)$$

gde je k_3 osetljivost na promenu magnetnog permeabiliteta vazduha u zazoru:

$$\frac{\Delta L}{\Delta \mu_0} = k_3 = \frac{N^2 S_\delta}{2\delta} = \text{const}. \quad (11.8)$$

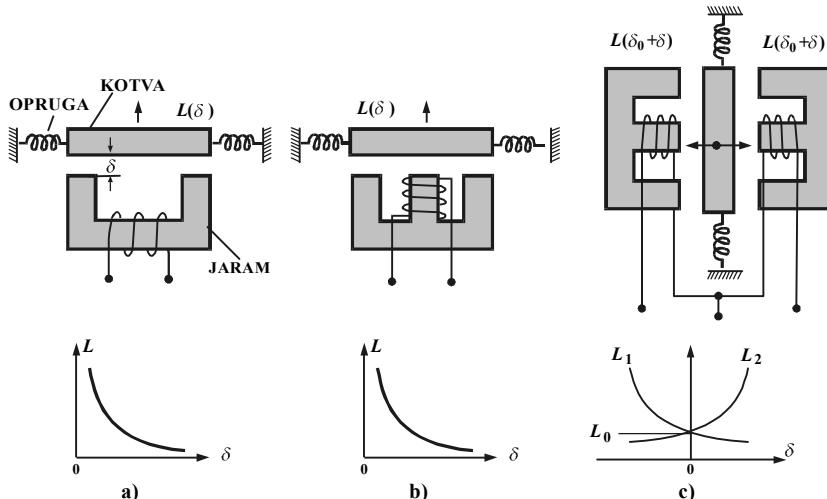
Samo je statička karakteristika koja se odnosi na širinu zazora nelinearna, a odgovarajuća osetljivost nije konstantna, već zavisi od radne tačke unutar opsega mernih veličina. Statičke karakteristike koje se odnose na magnetni permeabilitet zazora i površinu zazora su linearne, pa je i osetljivost senzora u odnosu na te veličine konstantna.

11.1.2. Način gradnje induktivnih senzora

Induktivni senzori sa promenljivim zazorom. Induktivnost ovog senzora menja se zavisno od promene vazdušnog zazora između jezgra (jarma) i pokretnog dela od feromagnetika (kotve). Prosti induktivni senzor ima jaram u obliku slova U (slika 11.1a) ili E (slika 11.1b). Kada se kotva približi jarmu, zazor se smanji, a induktivnost naraste. Statička karakteristika je linearna samo za male relativne promene vazdušnog zazora. Realni induktivni senzori prave se sa relativnom promenom zazora $\Delta\delta/\delta = 0,1 - 15$, čime se osigurava linearnost karakteristike $1 - 3\%$. Za napajanje se primenjuje napon frekvencije od 5 ili 50 kHz, a induktivnost je 5 ili 0,5 mH.

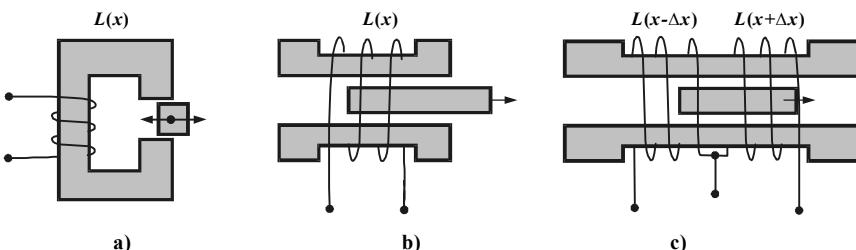
Ozbiljan nedostatak prostih induktivnih senzora je nelinearnost statičke karakteristike i mali opseg promene zazora. Osim toga, kada kroz kalem teče konstantna struja I , između jarma i kotve deluje privlačna sila $F = (I^2/2)/(dL/d\delta)$, koja izaziva nepoželjno kretanje kotve. Mnogo je bolji diferencijalni induktivni senzor (slika 11.1c) koji je, zapravo napravljen od dva induktivna senzora tipa E . Prilikom kretanja

kotva se primiče jednom kalemu, a od drugog se udaljava, tako da induktivnost jednog kalemata raste a drugog opada. Statička karakteristika diferencijalnog induktivnog senzora dobija se kao razlika karakteristika dvaju prostih induktivnih senzora: $L = L_1 - L_2$. Diferencijalni senzor omogućava merenje pozitivnog i negativnog pomeraja kotve, na dvostruko većem opsegu u odnosu na prosti senzor. Za priključivanje diferencijalnog senzora koristi se simetrična mosna šema.



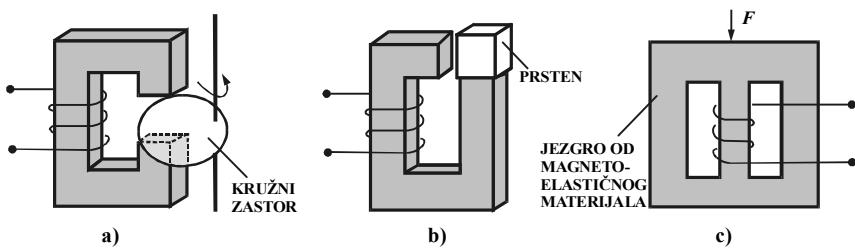
Slika 11.1. Induktivni senzori sa promenljivim zazorom i njihove statičke karakteristike: a) prosti induktivni senzor sa U-presekom, b) prosti sa E-presekom, c) diferencijalni induktivni senzor

Induktivni senzori sa promenljivom površinom vazdušnog zazora. Kotva ovih senzora pomera se paralelno s navojima. Proste varijante imaju U ili E-presek jezgra (slika 11.2a). Mnogo su praktičnije izvedbe sa pomičnim jezgrom (slika 11.2b). Proširenje opsega i poboljšanje linearnosti postiže se i u ovom slučaju izradom diferencijalnog induktivnog senzora (slika 11.2c).



Slika 11.2. Induktivni senzori sa promenljivom površinom: a) prosti, b) prosti sa pomičnim jezgrom, c) cilindrični diferencijalni

Induktivni senzori sa promenljivim magnetnim permeabilitetom. Magnetni permeabilitet zazora menja se pomoću metalnog zastora u obliku ploče (slika 11.3a) ili prstena (slika 11.3b). Promena je efikasnija ako je metal feromagneti. Kada je zastor od magnetno nepropustljivog materijala – aluminijuma ili mesinga – tada se na njemu javljaju površinske struje koje onda dovode do promene induktivnosti senzorskog kalemata.



Slika 11.3. Induktivni senzori sa promenljivim permeabilitetom: a) prosti senzor sa kružnim zastorom, b) prosti senzor sa pomičnim prstenom, c) magnetoelastični senzor

Posebna klasa induktivnih senzora su magnetoelastični senzori. Njihov rad zasniva se na svojstvu nekih magnetskih materijala da menjaju permeabilnost usled mehaničkog naprezanja. U termodinamičkom pogledu reč je o inverznoj magnetostrikciji, odnosno o pojavi da se pod uticajem magnetskog polja menjaju naprezanje materijala. Osnovna karakteristika magnetoelastičnih senzora je faktor magnetoelastične osetljivosti:

$$K_{\mu} = \frac{\Delta\mu/\mu}{\Delta l/l}, \quad (11.9)$$

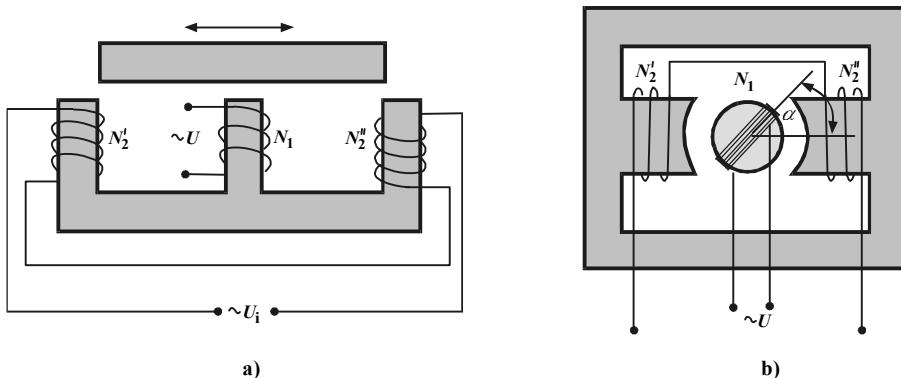
koji predstavlja odnos relativne promene magnetne permeabilnosti materijala $\Delta\mu/\mu$ i relativne deformacije $\Delta l/l$. Za legure od gvožđa i nikla tipa permaloj faktor magnetoelastične osetljivosti je oko 200.

Magnetoelastični senzori odlikuju se jednostavnosću i principijelno se ne razlikuju od običnih induktivnih senzora. Razlika je jedino u tome što im je jezgro od magnetoelastičnog materijala (slika 11.3c). Na tačnost ovih senzora najviše utiču temperatura i zaostali mehanički naponi. Tačnost im je obično reda 3–4%.

11.2. MEĐUINDUKTIVNI SENZORI

Princip rada. Ovo je posebna klasa induktivnih senzora jer imaju po dva navoja magnetno povezana. Zahvaljujući tome, između izvora napajanja i izlaza postoji transformatorska veza, pa se ovi senzori nazivaju i transformatorski. Grade se tako da imaju promenljivu širinu zazora ili promenljivu površinu preseka. Pogodni su za merenje malih mehaničkih pomeraja.

Na slici 11.4a prikazana je tipična realizacija međuinduktivnog senzora sa linearnim pomeranjem kotve. Na primarni namotaj N_1 , koji je ravnomerno raspoređen po celoj dužini senzora, priključen je naizmenični napon napajanja U . Sekundar je podeljen na dva navoja, N'_2 i N''_2 , koji su suprotno namotani i vezani u seriju. Proporcionalno položaju pomičnog jezgra na njima se indukuju naponi U'_2 i U''_2 , odnosno ukupni izlazni napon je $U_i = U'_2 - U''_2$. Prilikom prolaska kroz središnji položaj izlazni signal menja znak, što odgovara promeni faze za 180° .



Slika 11.4. Transformatorski indukcioni sezor: a) sa linearnim pomeranjem kotve,
b) sa ugaonim zakretanjem rotora

Konstrukcija diferencijalnog međuinduktivnog (transformatorskog) senzora omogućava proširenje mernog opsega i bolju linearnost. Amplituda izlaznog signala proporcionalna je pomeraju kotve, a faza izlaznog signala pozitivnom/negativnom pomeraju u odnosu na nulti položaj.

11.3. INDUKCIONI SENZORI

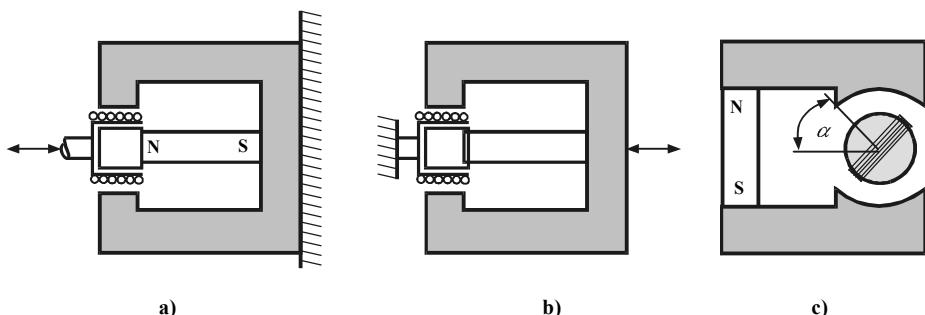
Princip rada ovih senzora zasniva se na elektrodinamičkoj indukciji. U provodniku koji se kreće i preseca silnice stalnog magnetnog polja (slika 11.5a) indukuje se napon:

$$U = NlBv, \quad (11.10)$$

gde su: N broj zavoja, $l = \pi D$ dužina jednog navoja, B magnetna indukcija [T], v brzina kretanja kalema. Brzina kretanja kalema (ili magneta) linearna je ($v = dx/dt$) ili ugaona ($\omega = d\theta/dt$), pa se indukcioni senzori upotrebljavaju za detekciju brzine ili veličina koje su sa njom u funkcionalnoj vezi. Izlaz je jednak nuli kada pokretni deo senzora miruje.

Za razliku od induktivnih i međuinduktivnih senzora, indukcioni senzori elektrodinamičkog tipa su u suštini generatori, te spadaju u grupu aktivnih senzora. Kao izvanredni detektori vibracija primenjuju se u alarmnim sistemima pod različitim komercijalnim nazivima (geofon, vibrafon). Na tačnost indukcionih senzora utiču temperatura i nestabilnost parametara magnetske usled starenja, kao i nelinearnost magnetnog polja u zazoru. Uobičajena tačnost je reda 0,1 – 1%.

Način gradnje elektrodinamičkih indukcionih senzora zavisi od toga da li se radi o izvedbi sa pokretnim kalemom (slika 11.5a) ili pokretnim magnetom (slika 11.5b), odnosno da li su namenjeni za detekciju ugaone brzine (slika 11.5c).



Slika 11.5. Indukcioni senzori: a) sa pokretnim kalemom, b) sa pokretnim magnetom, c) za detekciju ugaone brzine

11.4. MERNE ŠEME SA ELEKTROMAGNETNIM SENZORIMA

Šeme sa elektromagnetskim senzorima razlikuju se po tome da li su namenjene za induktivne i međuinduktivne ili za indukcione senzore. Prva grupa šema deli se, dalje, na one koje se primenjuju za proste i na one koje su namenjene za različite varijante diferencijalnih senzora.

Merne šeme sa prostim induktivnim senzorima. Spajanje ovih senzora sa mernim uređajima vrši se na jednostavan način – dodavanjem otpora opterećenja u napojni krug (slika 11.6a). Izlazni signal je napon na otporu opterećenja R :

$$U_{iz} = IR = \frac{RU}{\sqrt{(R_N + R)^2 + x_N^2}}, \quad (11.11)$$

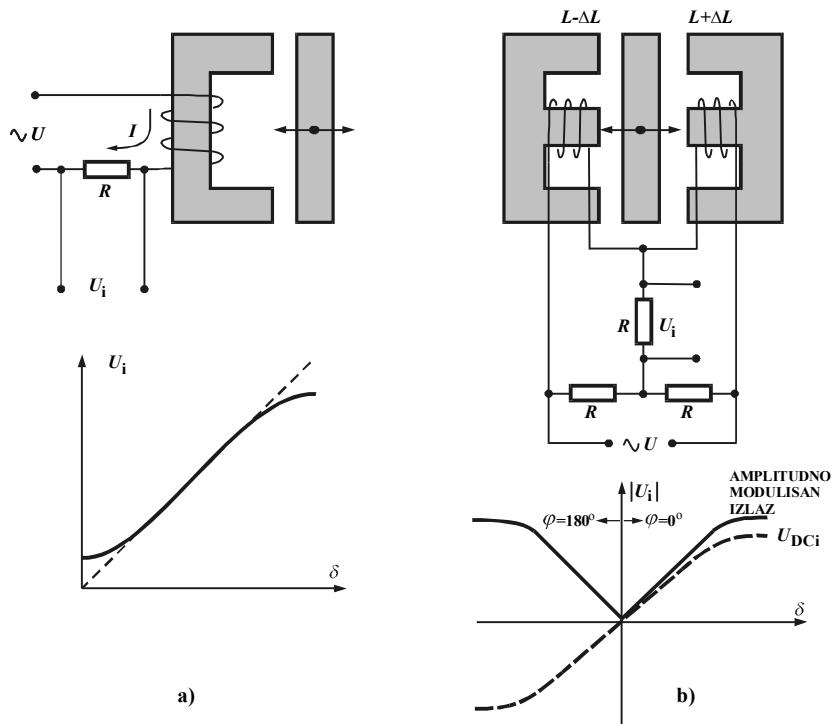
gde su R_N aktivni i x_N induktivni otpor navoja. Kako je $x_N \gg (R_N + R)$, izlazni signal je

$$U_{iz} \approx \frac{UR}{\omega L} = \frac{2UR\delta}{\omega N^2 \mu_0 S_\delta} = k\delta. \quad (11.12)$$

Male vrednosti δ utiču na porast otpora feromagnetika, a velike vrednosti δ utiču na porast gubitaka. Realna statička karakteristika zato odstupa od idelane (11.12) i na krajevima ima nelinearne delove.

Merne šeme sa diferencijalnim induktivnim senzorima. S obzirom da se radi o diferencijalnom spoju dva prosta senzora, šema se u ovom slučaju svodi na merni most. Najčešće je to simetrični most sa dva induktiviteta ($L + \Delta L$ i $L - \Delta L$) i dva otpornika (slika 11.6b). Izlazni signal je:

$$U_i = \frac{1}{2} \frac{\Delta L}{L} U. \quad (11.13)$$



Slika 11.6. Merne šeme sa induktivnim senzorom: a) šema za senzore U i E tipa
b) mosna šema za induktivne senzore diferencijalnog tipa

Izlazni napon je amplitudno modulisan. Amplituda je proporcionalna udaljenosti kotve od ravnotežnog položaja, a faza menja znak prilikom prolaska kotve kroz ravnotežni položaj. Priključivanjem izlaza mosta na jednostavni fazno osjetljivi demodulator, kao kod LVD senzora na strani 248, može se dobiti odgovarajući bipolarni jednosmerni signal U_{DCi} .

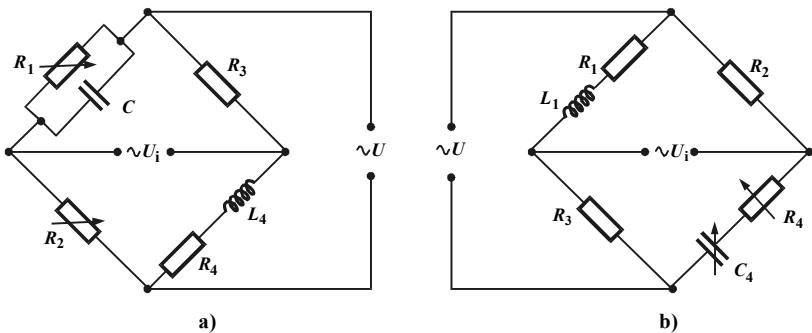
Šeme sa frekventnom modulacijom po strukturi su identične odgovarajućim šemama sa kapacitivnim senzorom, s tim što na njihovom mestu sada стоји induktivni senzor.

Međuinduktivni i indukcioni senzori priključuju se na merne uređaje bilo direktno bilo posredstvom pojačavača naizmeničnog naponskog signala.

PITANJA I ZADACI

- 1) Klasificirati elektromagnetne senzore prema principima njihovog rada.
- 2) Objasniti prednosti diferencijalnih induktivnih i međuinduktivnih senzora u odnosu na proste.

- 3) Odrediti uslov ravnoteže Maksvelovog mosta (slika 11.7a) koji služi za merenje nepoznate impedance R_4 , L_4 induktivnog senzora. Izračunati aktivni otpor i induktivnost senzora ako je ravnoteža mosta postignuta za $R_1 = 500 \Omega$ i $R_2 = 100 \Omega$, a fiksni elementi mosta su $R_3 = 200 \Omega$ i $C = 0,1 \mu\text{F}$.



Slika 11.7.

Rešenje: $R_4 = 40 \Omega$, $L_4 = 2 \text{ mH}$.

- 4) Odrediti uslov ravnoteže Hejovog mosta (slika 11.7b), koji služi za merenje induktivnosti. Kalem senzora ima veliki faktor dobrote, tj. veliki odnos induktanse i aktivnog otpora. Izračunati induktivnost senzora L_1 ako je ravnoteža mosta postignuta za $R_2 = R_3 = 1000 \Omega$ i ako je $C = 0,02 \mu\text{F}$.

Rešenje: $L_1 = 20 \text{ mH}$.

LITERATURA

1. A.I. Konovalov, D.P. Petelin: *Elementy i sistemy avtomatiki*, Visšaja škola, Moskva, 1985.
2. K.P. Belov: *Magnitostrikcionnye javlenija i ih tehnicheskie prilozhenija*, Nauka, Moskva, 1987.
3. A.S. Moris: *Principles of measurement and instrumentation*, Prentice Hall, 1988.
4. E. Humo: *Principi i elementi sistema automatske regulacije*, Svjetlost, Sarajevo, 1987.
5. *Principi rada i gradnje induktivnih senzora*: www.pepperl-fuchs.com/fa/sensors/inductive/www.cieuiteellar.com/libraryprint/0701/Novacek132/index.asp, www.sensormag.com/articles/0303/ /capacitive/main.shtml, www.newtonex.ac.uk/teaching/CDHW/Sensors/
6. *Technical essay*: www.baumerelectronic.com/usa/news/tech/BE_Displacement.pdf
7. *The educational encyclopedia, Inductive sensors*: www.users.telenet.be/educypedia/welectronics

12

PIJEZOELEKTRIČNI SENZORI

12.1. PRINCIP RADA

Pijezoelektrični efekt otkrili su eksperimentalnim putem braća Pjer i Žak Kiri 1880. Oni su primetili da izvesni dielektrični materijali monokristalne strukture kada se mehanički naprežu razvijaju električni potencijal. Najpoznatiji prirodni pijezomaterijali su: kvarc (SiO_2), Rošelova so, Senjetova so, amonijum-dihidrogen-fosfat i turmalin. Pijezoefekt tumači se nastankom ili izmenom dipolnog momenta P prilikom pomeranja električnih naboja q pod delovanjem mehaničkog naprezanja. Ovo je direktni pijezoefekt, dok se promena srednjeg rastojanja l između centara dipola pod uticajem električnog polja E označava kao inverzni pijezoefekt.

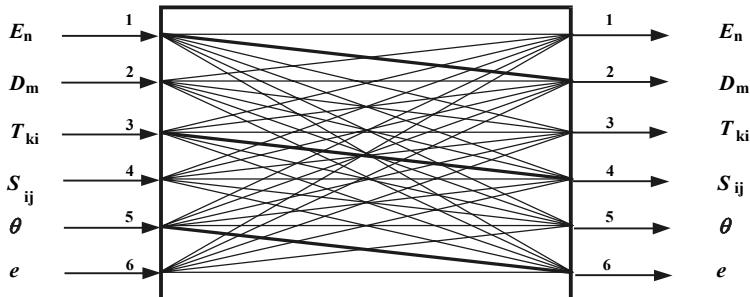
Godine 1944. ustanovljeno je da pijezoelektrična svojstva poseduju i neki keramički materijali, a već 1947. bio je napravljen prvi senzor na bazi barijum-titanata. Razvojem tehnologije sintetizovani su mnogi veštački polarizovani materijali na bazi barijum-titanata (BaTiO_3), olovo-titanata (PbTiO_3) i olovo-cirkonata (PbZrO_3 , akronim PZT), koji su poznati pod zajedničkim nazivom pijezokeramika. Polarizacija nastaje iznad Kirijeve temperature. Pod delovanjem jakog jednosmernog električnog polja (kV/mm) inače haotično orijentisani električni dipoli orijentisu se u smeru polja. Ova orijentisanost zadržava se, manje ili više, nakon uklanjanja polja i hlađenja ispod Kirijeve temperature. Godine 1969. otkrivena je visoka pijezoaktivnost PVDF, polivinilidenfluorida ($-\text{CH}_2-\text{CF}_2-$), organskog materijala tipa polarizovani fluoropolimer.

Zahvaljujući pijezokeramičkim materijalima, proširena je primena pijezoefekta na senzore u području zvučnih i ultrazvučnih signala. Usavršavanje pijezokeramike dovelo je (1965. godine) do pojave tankoslojnih pijezoelektrika. Oni se nanose na podlogu posebnim postupkom u tankom sloju, poput filma. Na bazi tankoslojnih pijezoelektrika grade se izvanredni senzori brzo promenljivih mehaničkih veličina, mikroaktuatori i generatori ultrazvuka. Debljina tankog sloja na bazi PVDF može biti svega $0,02 \mu\text{m}$. Tanki slojevi od PVDF imaju četiri puta manju akustičnu impedansu od keramičkih, a keramički imaju bolje mehaničke osobine.

Zbog njihovih dobrih osobina pijezomaterijali se upotrebljavaju u gradnji senzora različitih električnih i neelektričnih veličina. Elementi od pijezomaterijala su odlični generatori napona (i do 100 kV); imaju intenzitet otkaza reda 10^{-6} h^{-1} ; imaju dimenzije i do 100 puta manje u poređenju sa sličnim elementima od klasičnih materijala; imaju izraženu osetljivost na delovanje radijacije i temperature.

Stanje pijezoelektričnog dielektrika, u opštem slučaju, zavisi od odnosa električnih, mehaničkih i toplotnih veličina. To stanje se predstavlja kao funkcionalna zavisnost sledećih parametara: električnog polja E , mehaničkog naprezanja T ,

temperature θ , električne indukcije D (ili polarizacije P), mehaničke deformacije S i entropije e . Grafička interpretacija ove zavisnosti prikazuje pijkeolement kao složen multivarijabilni sistem, gde svaki ulaz deluje na sve izlaze (slika 12.1). Sve funkcionalne veze, odnosno odgovarajući fizikalni procesi nisu podjednako značajni za praktičnu primenu u tehnici senzora. Svi procesi mogu se podeliti u pet grupa.



Slika 12.1. Pijkeoletrik kao multivarijabilni sistem

Prvu grupu sačinjavaju dominantni ili glavni procesi (na slici označeni punom linijom): električni ($E-D$), mehanički ($T-S$) i toplotni ($\theta-e$). Drugu grupu čine procesi koji nastaju pod delovanjem električnog polja E : elektromehanički ($E-T$), obratni pijkeoletrični ($E-S$), elektrotermički ($E-\theta$) i elektrokalorični ili obratni piroelektrični ($E-e$). Treća grupa procesa nastaje pod uticajem mehaničkog naprezanja T : obratni elektromehanički ($T-E$), direktni pijkeoletrični ($T-D$), pijkeotermički ($T-\theta$) i pijkeokalorični ($T-e$). Četvrta grupa procesa manifestuje se kao promena E , D , T i S pod delovanjem temperature θ : termoelektrični ($\theta-E$); piroelektrični ($\theta-D$), termičko naprezanje ($\theta-T$) i termička ekspanzija ($\theta-S$). U petu grupu spadaju procesi koji nastaju delovanjem električne indukcije D (ulaz 2) i mehaničke deformacije S (ulaz 4), te procesi koji nastaju delovanjem entropije e (ulaz 6).

Uzročno-posledične veze u svakom kanalu su znatno složenije jer je uvek izražen i aditivni (sekundarni ili tercijarni) efekt usled delovanja neke druge veličine. Na primer, sekundarni piroelektrični proces odvija se putem $\theta-S-D$. Zbog toga se javljaju određene nelinearnosti, multiplikativne veze i čitav niz dopunskih efekata kao što su: pijkeooptički, elektrooptički, pijkeootportni, pijkeodielektrični i drugi.

Matematički modeli kojima se opisuju procesi u pijkeoletiku zasnivaju se na prepostavci da su sve uzročno-posledične veze linearne. Kada se pijkeoletrik podvrgne naprezanju $T = F/A \left[N/m^2 \right]$, na njegovoj površini A javlja se polarizacija $P = Q/A \left[C/m^2 \right]$ proporcionalna naprezanju:

$$P = dT, \quad (12.1)$$

gde je $d = Q/F$ pijkeoletrični koeficijent, $[C/N]$). Jednačina (12.1) predstavlja direktni pijkeoletrični efekt. Obrnuti pijkeoletrični efekat je pojava deformacije $S = \Delta l/l$ zbog delovanja električnog polja $E [V/m]$, a opisuje se linearnom jednačinom:

$$S = dE. \quad (12.2)$$

Veštački pijezoelektrični imaju i elastična svojstva koja opisuje Hukov zakon: $S_i = s_{ij} T_j + d_{mi} E_m$, gde je s [m^2/N] koeficijent elastičnosti pri kratko spojenim elektrodama. Pijezoelektrik je dielektrični materijal i zato treba uzeti u obzir pojavu električne indukcije D , tj. nastanak nanelektrisanja na jedinici površine zbog delovanja električnog polja: $D = \epsilon E$, gde je ϵ dielektrična konstanta pri konstantnom naprezanju. Ukupna deformacija i indukcija usled opisanih pojava zapisuje se u tenzorskom modelu:

$$S_i = s_{ij} T_j + d_{mi} E_m \quad (12.3)$$

$$D_n = d_{nj} T_j + \epsilon_{nm} E_m \quad m,n=1,2,3 \quad i,j=1,2, \dots, 6 . \quad (12.4)$$

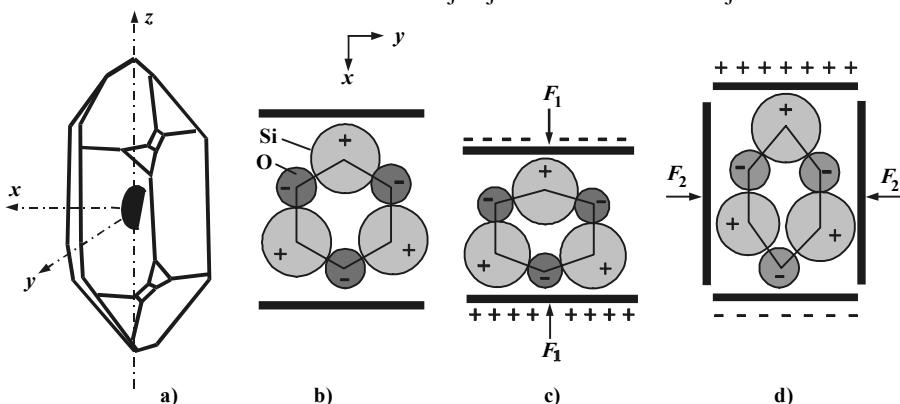
U pravouglom koordinatnom sistemu veličine duž osa X, Y, Z označavaju se indeksima 1,2,3 a oko tih osa sa indeksima 4,5,6. Za praktične primene retko je potrebno razmatrati sveukupne električne i mehaničke veze koje karakterišu pijezoelement. Model za tankoslojnu pijezokeramiku znatno je jednostavniji i sadrži samo deset koeficijenata. Na taj način, na primer, longitudinalne vibracije pijezoelektrične trake opisuju se parom jednačina:

$$S_1 = s_{11} T_1 + d_{31} E_3 \quad (12.5)$$

$$D_3 = d_{31} T_1 + \epsilon_{33} E_3 . \quad (12.6)$$

Fenomen pijezoelektričnog efekta najlakše se objašnjava na pijezoelementu od kvarca (slika 12.2a). Element je u celini električno neutralan, ali se mogu izdvojiti tri ose: uzdužna ili optička osa Z , električna osa X , koja povezuje suprotno nanelektrisane jone i suprotne bridove prizme kvarca i neutralna ili mehanička osa Y , koja povezuje suprotne površine prizme. Pošto kristal kvarca ima oblik šestougaone prizme, postoje tri električne i tri mehaničke ose. Ose XYZ su pod pravim uglom.

Kada kristal nije mehanički napregnut, svi električni naboji su u ravnoteži (slika 12.2b). Međutim, ako u smeru ose X deluje sila F_1 (slika 12.2c), ravnoteža se narušava i kao rezultat na elektrodama se javlja elektrostatički naboј:



Slika 12.2. Fenomen pijezoelektričnog efekta: a) kristal kvarca, b) neopterećeni kristal, c) mehaničko opterećenje duž ose X, d) mehaničko opterećenje duž ose Y

$$Q_{11} = d_{11}F_1, \quad (12.7)$$

pri čemu je $d_{11} = 2,3 \text{ pC/N}$ pijezoelektrični koeficijent kvarca u smeru X -ose. Opisana pojava nastaje zbog podužnog pijezoelektričnog efekta.

Ako se deluje silom F_2 duž ose Y , zbog poprečnog pijezoelektričnog efekta ponovo će se javiti električni naboј na istim elektrodama, ali sa suprotnim znakom:

$$Q_{12} = d_{12} \frac{b}{a} F_2, \quad (12.8)$$

gde su b i a dimenzije kristala duž osa X i Y , a $d_{12} = -d_{11}$ pijezoelektrični koeficijent kvarca duž Y -ose (slika 12.2d).

Važna osobina pijezoelektričnog efekta je promena znaka naboja sa izmenom smera delovanja sile, tj. prilikom prelaska sa rastezanja na sabijanje i obratno.

Uticaj temperature. Pijezoelektrici u načelu imaju jako izražen piroelektrični efekt. Zbog apsorpcije infracrvenog zračenja dolazi do porasta njihove temperature i pojave nanelektrisanja (napona) na elektrodama:

$$Q_p = \alpha_p \cdot \Delta\theta \cdot A \quad \text{ili:} \quad U_p = \alpha_p \cdot \frac{\Delta\theta}{\varepsilon} \cdot c . \quad (12.9)$$

gde je $E_p [\text{V/m}]$ indukovano električno polje, $\Delta\theta [^\circ\text{C}]$ promena temperature, $\alpha_p [^\circ\text{C}/\text{Cm}^2]$ ili $\text{V}^\circ/\text{Cm}^2$ piroelektrični koeficijent i $c[\text{m}]$ debљina pijezoelektrika. Vrednost piroelektričnog koeficijenta za polimer PVDF je oko $30 \mu\text{C}/^\circ\text{Cm}^2$, a za keramiku PZT oko $400 \mu\text{C}/^\circ\text{Cm}^2$. Piroelektrici se primenjuju u gradnji infracrvenih senzora.

Temperaturna stabilnost pijezoelektrika postiže se na više načina: kompenzacijom, termostatiranjem priključnih tačaka i samog materijala, te veštačkim starenjem pijezoelementa zagrevanjem ili primenom mehaničkog ili električnog opterećenja.

Pijezoelektrični senzori primenjuju se u radnim uslovima podložnim jakom uticaju okoline kao što su: temperatura, vlažnost i brze promene ambijentnog pritiska, tj. pojave zvučnih talasa. Visoke temperature uzrokuju smanjenje naponske osetljivosti senzora. Međutim, kad senzor prode odgovarajući temperaturni tretman, na radnom temperaturnom opsegu ponovo se uspostavlja deklarisana osetljivost. Izloženost senzora temperaturama blizu Kirijeve, međutim, dovodi do depolarizacije i trajnog oštećenja senzora. Zato se preporučuje da gornja vrednost radne temperature bude na polovini između 0°C i Kirijeve tačke: obično je to 80°C , mada visokotemperaturni pijezoelektrici rade i na temperaturama čija je gornja granica $300 - 400^\circ\text{C}$.

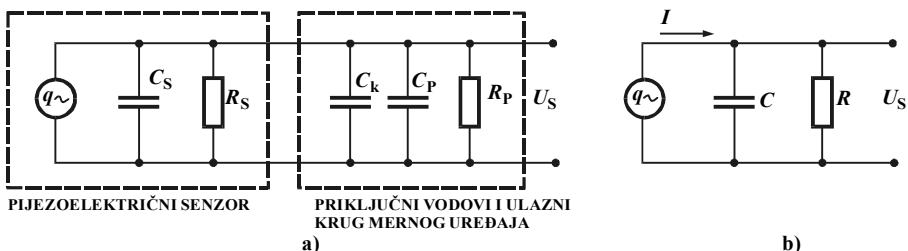
Dinamička karakteristika. Dinamička i statička svojstva pijezoelektričnog senzora određena su mnogobrojnim oblicima veza između električnih, mehaničkih i topotnih veličina. Topotni procesi su u dinamičkom smislu kvazistacionarni u odnosu na elektromehaničke, pa se često zanemaruju.

Dinamika elektromehaničkih procesa opisuje se prenosom funkcijom koja se najčešće određuje eksperimentalno-analitičkim metodom. U osnovi metoda je

predstavljanje senzora kao kondenzatora pomoću ekvivalentne električne šeme sa naponskim izvorom u seriji ili generatorom naboja u paraleli sa senzorom, (slika 12.3a). To je model za oblasti niskih radnih frekvencija. C_s je kapacitet senzora meren kao kapacitet između elektroda, C_k je kapacitet priključnih vodova, C_p kapacitet ulaznog kruga mernog uređaja, R_s je otpor senzora i R_p ulazni otpor mernog uređaja na koji se priključuje senzor. Jednostavniji oblik ekvivalentne šeme prikazan je na slici 12.3b, gde je $R = R_s R_p / (R_s + R_p)$ i $C = C_s + C_k + C_p$.

Izlazni napon senzora je:

$$U_s(s) = \frac{R/sC}{R + 1/sC} I(s) . \quad (12.10)$$



Slika 12.3. Ekvivalentna šema pijezoelektričnog senzora: a) potpuna šema, b) uprošćena šema

S obzirom da je $i(t) = dq/dt$, odnosno $I(s) = sQ(s) = sd_{ij}F(s)$, dobija se da je izlazni napon

$$U_s(s) = \frac{d_{ij}}{C} \cdot \frac{RC_s}{RC_s + 1} F(s) . \quad (12.11)$$

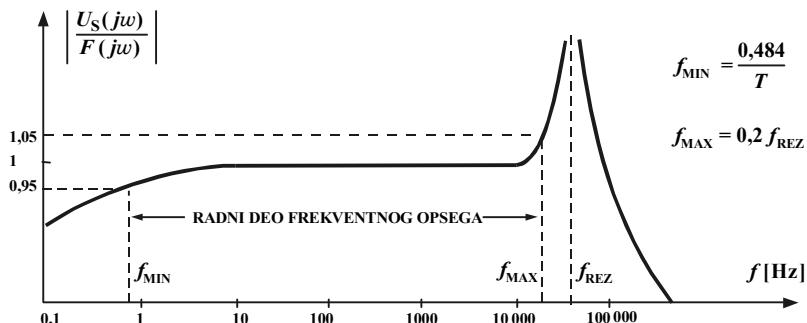
Amplitudno-frekventna karakteristika *izlazni napon - primenjena sila* ima izgled visokopropusnog filtera, slika 12.4. Za velike vrednosti frekvencije, tj. u ravnem delu gde je $\omega \gg 1/RC$, karakteristika ne zavisi od frekvencije. Izlazni napon tada je obrnuto proporcionalan kapacitetu:

$$|U_s(j\omega)/F(j\omega)| \approx \frac{d_{ij}}{C} = \frac{d_{ij}}{C_s + C_k + C_p} , \quad (12.12)$$

i zavisi od osobina upotrebljenog dielektrika i njegove geometrije, te od kapaciteta priključnih vodova i mernog uređaja (pojačavača) na koji se priključuje senzor.

Kada se govori o naponskoj osetljivosti d_{ij}/C pijezoelektričnog senzora, mora se navesti kapacitet za koji ta osetljivost važi. Proizvođači obično navode kapacitet senzora C_s u pC ili izlazni napon neopterećenog senzora $U_s = Q/C_s$ u mV/Pa. Korekcije zbog uticaja priključnih kablova i ulaznog kruga pojačavača utvrđuju se kalibracijom, zavisno od konkretne merne šeme.

Da bi se smanjila donja granična učestanost f_{min} i proširio opseg primene u oblasti niskih frekvencija, potrebno je uvećati vremensku konstantu senzora $T = RC$. Povećanje kapaciteta C nije preporučljivo, jer se onda smanjuje izlazni napon U_s .



Slika 12.4. Tipični amplitudno-frekventni dijagram pijezoelektričnog senzora

Prema tome, preostaje da se poveća otpor R , što je vezano za kvalitet pojačavača. Da bi se sprečilo curenje nanelektrisanja sa pijezoelektrika, ulazna otpornost pojačavača bi morala da bude mnogo veća od vlastite otpornosti senzora. Ovaj uslov teško je ispuniti jer je, na primer, kod tankoslojnih pijezoelektrika $R_s > 10^{12} \Omega$, pa je $R \approx R_p$. Tipične vrednosti su: vlastiti kapacitet senzora $C_s > 1 \text{ nF}$, kapacitet priključnih vodova $C_k = 75 \text{ pF/m}$, ulazni kapacitet pojačavača $C_p < 25 \text{ pF}$. Ako bi pojačavač imao ulaznu otpornost $R_p = 10 \text{ M}\Omega$, vremenska konstanta bila bi 24 ms, odnosno za $R_p = 100 \text{ M}\Omega$ vremenska konstanta mernog sistema je deset puta veća. Donja granična frekvencija f_{\min} je na ovaj način smanjena sa 20 Hz na 2 Hz. Tačna vrednost obično se računa iz uslova da amplitudno-frekventna karakteristika u odnosu na radni deo karakteristike ne opadne više od 5%, a zatim se odredi odgovarajuća vrednost za R_p .

Dinamika senzora na višim frekvencijama opisuje se pomoću složenije ekvivalentne šeme: sa RLC serijskim kolom u paraleli sa senzorom. Serijskim RLC kolom uzimaju se u obzir mehanička krutost pijezoelektrika od kojeg je senzor izgrađen, kvalitet kontakata između elektroda i pijezoelektrika, te krutost kućišta u kojem je senzor smešten. Pomoću modela u oblasti viših frekvencija može se izračunati i rezonantna frekvencija oscilacija f_{rez} , koja zavisi od svojstava pijezoelektrika i njegove geometrije. Njena tipična vrednost je 50–200 kHz. Gornja granična frekvencija radnog opsega f_{\max} je u intervalu 10–40 kHz i daje se u odnosu na rezonatnu frekvenciju: $f_{\max} = 0,2 f_{\text{rez}}$. Da bi se proširio gornji deo frekventnog opsega, poželjno je da masa pijezoelektrika i pokretnih delova bude što manja – obično je to 0,001–40 g. Radni deo frekventnog opsega definiše se od f_{\min} do f_{\max} .

Statička karakteristika postoji samo u smislu kvazistacionarnog procesa. Čim se uspostave stacionarne oscilacije, između izlaznog napona U_s i ulazne veličine x_f (sila, pritisak, pomak, akceleracija) postoji lencarna veza. Pri tome je samo bitno da promene budu unutar deklarisanih radnih frekventnih opsega senzora. Linearnost tako shvaćene statičke karakteristike je 2–10%, u najboljem slučaju 0,2–0,3%. Histerezis je reda 2%. Izuzetno, senzori od pijezoelektrika čija je Kirijeva temperatura ispod 200 °C imaju histerezis i do 20%. Nestabilnost statičke karakteristike u toku dužeg vremenskog perioda manja je od 2%/god.

Osetljivost statičke karakteristike senzora definiše se kao naponska osetljivost, osetljivost po naboju i poprečna osetljivost.

Naponska osetljivost S_u [mV/Pa] je odnos napona na elektrodama i merene fizikalne veličine:

$$S_u = U_s/x_f . \quad (12.13)$$

Jednim delom zavisi od piezoelektričnih svojstava materijala od kojeg je senzor napravljen, a drugim delom od njegove mase. Što je senzor veći, naponska osetljivost je veća. Na drugoj strani, smanjenje mase i veličine senzora povoljno utiče na povećanje njegovog frekventnog opsega. Oblikovanje piezokristala malih dimenzija je veoma teško, pa se ova protivrečnost rešava prema zahtevima konkretnog inženjerskog problema.

Osetljivost po naboju S_q [pC/Pa] je odnos električnog naboja na elektrodama senzora i merene fizikalne veličine:

$$S_q = Q/x_f = U_s C_s/x_f = S_u C_s . \quad (12.14)$$

Prilikom izbora piezoelektričnog senzora treba imati u vidu i poprečnu osetljivost. To je osetljivost u ravni okomitoj na glavnu osu duž koje deluje merena veličina. Nastaje zbog neregularnosti u piezomaterijalu i mehaničkih ograničenja u pogledu realizacije idealnih kontakata između piezoelektrika i metalnih obloga. Poprečna osetljivost izražava se u procentima referentne osetljivosti (napona ili naboja) duž glavne ose. Maksimalna vrednost poprečne osetljivosti je manja od 3% od referentne osetljivosti.

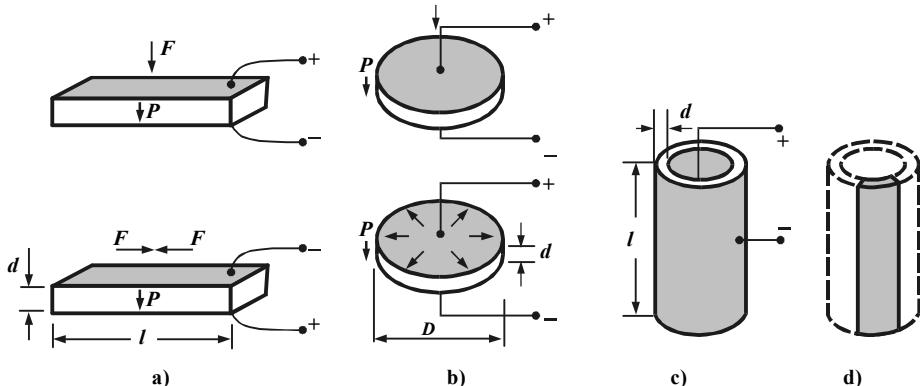
12.2. NAČIN GRADNJE PIJEZOELEKTRIČNIH SENZORA

Prosti piezoelektrični senzori grade se u obliku: prizme, diska, cilindra ili dela cilindra.

Senzor u obliku prizme je tzv. longitudinalni (d_{33}) ili transverzalni (d_{31}), generator, zavisno od toga da li sila deluje paralelno sa polarizacijom ili je okomita na nju (slika 12.5a). Najveća osetljivost (izlazni napon na jedinicu istezanja/sabijanja) je kad je maksimalni odnos l/d , tj. kad je piezoelektrik u obliku trake ($l > 4d$). Na žalost, traka ima malu čvrstinu i lako se lomi pod uzdužnim opterećenjem. Poseban tip trake je piezokabl (tribokabl), koji se polaže poprečno na kolovoz i služi kao senzor za detekciju vozila u saobraćaju.

Oblik diska (slika 12.5b) povoljniji je od trake u pogledu čvrstine ($D > 15d$). Naprezanje diska može biti normalno ili radikalno. Kako bi kontakt između piezoelektrika i priključnih vodova bio što bolji, evaporacijom se deponuju tankoslojne elektrode ($0,05 - 0,1 \mu\text{m}$) od nikla, aluminijuma, srebra ili posebnih legura.

Najbolju čvrstinu ima senzor u obliku cilindra (slika 12.5c), ali ga je tehnološki najteže proizvesti. Potrebno je, naime, obezbediti da poprečni presek što manje odstupa od kružnog prstena, kao i da debljina prstena bude jednaka po celom perimetru.



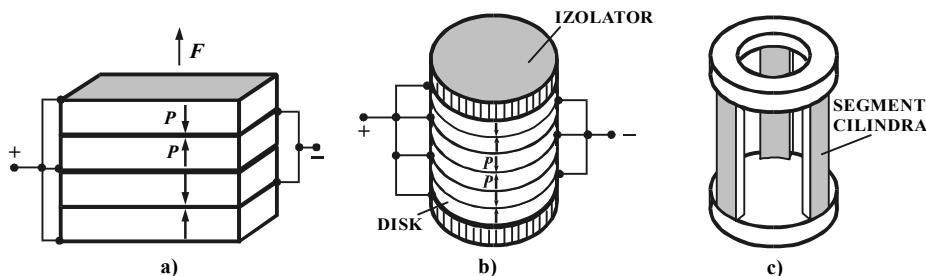
Slika 12.5. Prosti pijezoelektrični senzori: a) traka, b) disk, c) cilindar, d) uzdužni segment cilindra

Uzdužni segment cilindra ima sva dobra svojstva cilindra i zbog zakriviljenosti mnogo je čvršći od trake.

Višestruki pijezoelektrični senzori. Nedostaci prostih pijezoelektričnih senzora su mali izlazni napon i slaba mehanička čvrstina. Ovi nedostaci puno manje su izraženi kod višestrukih ili složenih senzora, koji se grade paralelno-serijskim spajanjem više prostih pijezoelektričnih senzora.

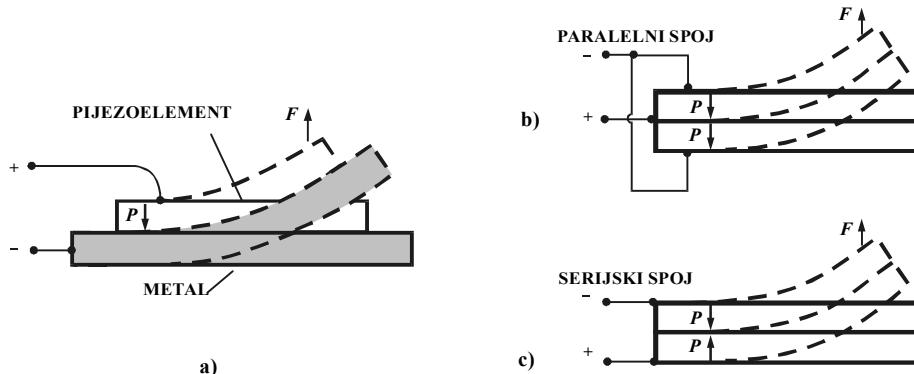
Senzori iz ove grupe najčešće se prave od više slojeva prostih trakastih (slika 12.6a) ili diskoidnih senzora (slika 12.6b). Smer polarizacije svakog narednog sloja istog je ili suprotnog smera u odnosu na polarizaciju narednog, odnosno elementi su u električnom smislu spojeni serijski ili paralelno. Tipična debljina višeslojnog senzora je 5 – 10 mm, pojedinih slojeva 0,1 – 0,25 mm, a osetljivost je 2 – 10 V/mm.

Dobre osobine uzdužnog cilindričnog segmenta dolaze do izražaja u gradnji trosegmentnog senzora (slika 12.6c). Segmenti su spojeni na krajevima pomoću prstenova. Konstrukcija omogućava praćenje kako ravnomernog tako i neravnomernog opterećenja na prstenu.



Slika 12.6. Višestruki pijezoelektrični senzori: a) lamelni, b) diskoidni, c) trosegmentni

Jednomorfni i dvomorfni pijezoelektrični senzori primenjuju se za detekciju većih mehaničkih pomeraja. Jednomorfni senzor pravi se od pijezoelektrične trake nalepljene na tanku metalnu traku (slika 12.7a). Na jednom kraju senzor je učvršćen, a na slobodnom kraju deluje mehaničko opterećenje.



Slika 12.7. Pijezoelektrični senzori: a) jednomorfni, b) dvomorfni paralelni, c) dvomorfni serijski

Veće pomeranje slobodnog kraja (i do 100 mm) i veća osetljivost postižu se pomoću bimorfnnog senzora. To su dve različite pijezoelektrične trake nalepljene jedna na drugu, tako da se jedna delovanjem opterećenja sabija, a druga isteže. Za isti pomeraj slobodnog kraja serijski spoj daje veći izlazni napon, koji je jednak sumi napona pojedinačnih pijezoelektričnih slojeva. Kada se prave aktuatori, pretvarači napona u male pomeraje, onda je povoljniji paralelni spoj jer je njegova osetljivost pomeraj-napon veća. Veća čvrstina dobije se fiksiranjem oba kraja. Tada ulazna veličina deluje u sredini. Na taj način pravi se pijezoelektrična membrana od bimorfnnog diskoidnog senzora sa učvršćenim obodom. Maksimalni progib membrane (diska) jest 1 mm.

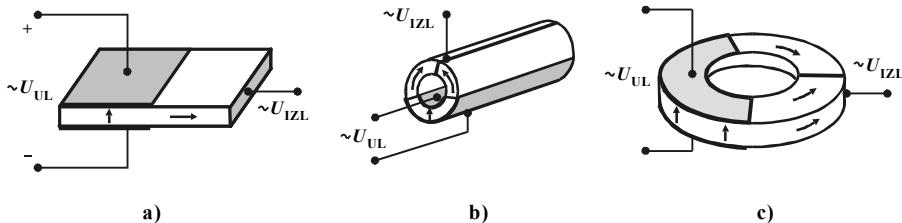
Transformatorski pijezoelektrični senzori. Ovi senzori sastoje se iz dve pijezoaktivne sekcije. Prva sekcija radi na principu obratnog pijezoefekta, tako što ulazni naponski signal pobuduje mehaničke oscilacije u oblasti rezonantnih frekvencija, gde je amplituda unutrašnjih naprezanja najveća. Druga sekcija radi na principu direktnog pijezoefekta.

Senzori ovog tipa upotrebljavaju se za merenje električnih veličina (struje, napona, frekvencije). Dele se u dve velike skupine:

- transformatori napona, sa izlaznim naponom koji je veći od ulaznog pri relativno maloj izlaznoj struci (do 1 mA) i koeficijentom transformacije do 100 za opterećeni, odnosno do 1000 za neopterećeni izlaz senzora
- transformatori struje, sa izlaznim naponom koji je manji od ulaznog, pri čemu je izlazna struja relativno velika (do 10 A).

Snaga ovih transformatora je reda 5 – 20 W. U zavisnosti od smera polarizacije i smera kretanja pobuđenih mehaničkih oscilacija, razlikuju se poprečno-poprečni, uzdužno-uzdužni i poprečno-uzdužni. Najprostija je konstrukcija trakastog

transformatorskog senzora poprečno-uzdužnog tipa (slika 12.8a). Za transformaciju većih snaga najoptimalniji je oblik cilindra (slika 12.8b). Osim toga, cilindar se odlikuje velikom čvrstinom u dinamičkim poljima i radom na rezonantnim frekvencijama prvog, drugog i trećeg harmonika. Zbog toga na amplitudno-frekventnoj karakteristici postoje tri rezonantna vrha. Kod senzora u obliku prstena (slika 12.8c) javljaju se radikalne oscilacije, a odnos između smera polarizacije i smera oscilacija je poprečno-uzdužni.



Slika 12.8. Pijezoelektrični senzori transformatorskog tipa: a) trakasti, b) cilindrični, c) prstenasti

12.3. MERNE ŠME SA PIJEZOELEKTRIČNIM SENZORIMA

Opšti pristup. U opštem slučaju merna šema sa pijezoelektričnim senzorom ima četiri elementa (slika 12.9): pijezoelektrični senzor, pojačavač, analizator i pisač.

Pojačavač ima dvostruku ulogu:

- da pojača relativno slab izlazni signal senzora
- da transformiše visoku izlaznu impedanciju senzora na nižu vrednost.



Slika 12.9. Principijelna blok-šema sa pijezoelektričnim senzorom

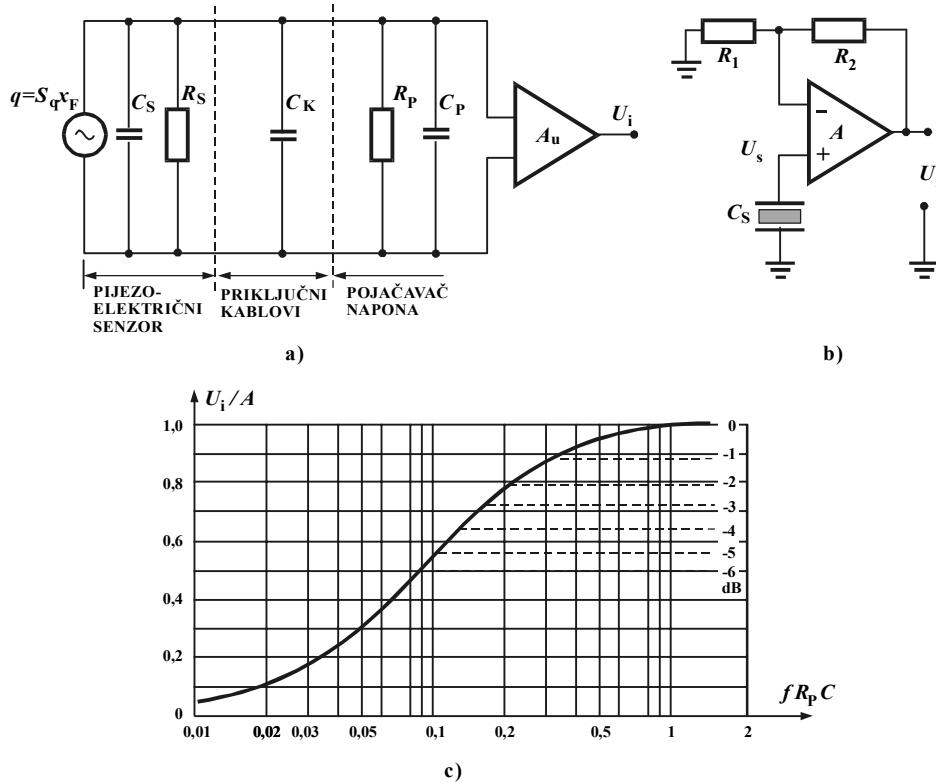
U razmatranjima vezanim za statičku karakteristiku pijezoelektričnih senzora istaknuto je da se osetljivost senzora može definisati u odnosu na napon ili naboј. U skladu s tim pojačavač se projektuje tako da je njegov izlaz proporcionalan ulaznom naponu (naponski pojačavač) ili ulaznom naboјu (pojačavač naboјa). Konstrukcije sa naponskim pojačavačem u načelu su jednostavnije i pouzdanije jer se grade sa manje elemenata. Međutim, tu je izlazni napon osetljiviji na uticaj ulaznog otpora pojačavača i kapacitet priključnih vodova, tj. na dužinu vodova između senzora i pojačavača. Uticaj ovih efekata u šemama sa pojačavačem naboјa je zanemarljiv. Maksimalna frekvencija za pojačavače napona je do $1 \text{ M}\Omega$, a za pojačavače naboјa je najviše do 100 kHz zbog filterskog delovanja kondenzatora u povratnoj sprezi.

Analizator signala je složen uređaj koji služi za merenje nekih karakteristika signala, na primer vršnih vrednosti, korena srednje kvadratne vrednosti ili srednje apsolutne vrednosti. Do ovih vrednosti dolazi se proračunom koji uzima u obzir i frekventni i fazni odziv senzora.

Šeme sa pojačavačem napona. Na slici 12.10a prikazana je ekvivalentna elektronska šema sa pijezoelektričnim senzorom, priključnim vodovima i naponskim pojačavačem. Ovakva šema pogodna je za senzore od kvarca, koji imaju male dimenzije, mali kapacitet i visoku naponsku osetljivost. Ako se zanemare efekti otpora senzora R_s i otpora priključnih vodova R_k , izlazni napon je:

$$U_i = \frac{Q}{C_s + C_k + C_p} A_u, \quad (12.15)$$

gde je A_u naponsko pojačanje.



Slika 12.10. Pijezoelektrični senzor priključen na pojačavač napona: a) ekvivalentna šema, b) neinvertujući spoj, c) dijagram za određivanje ulaznog otpora pojačavača

S obzirom na to da je:

$$Q = C_q x_f = S_u C_s x_f = U_s C_s, \quad (12.16)$$

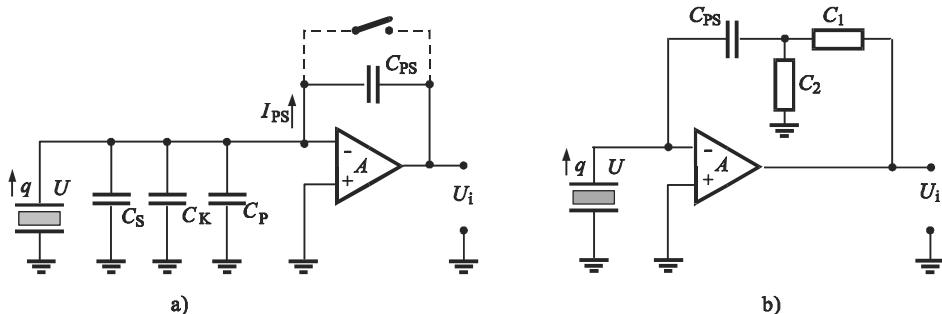
izlazni napon je:

$$U_i = \frac{C_s}{C_s + C_k + C_p} U_s A_u. \quad (12.17)$$

Prema tome, u mernim šemama u kojima je pijezoelektrični senzor priključen na pojačavač napona, izlazni napon zavisi od vrednosti kapaciteta priključnih vodova C_k i ulaznog kruga pojačavača C_p . Ako se promeni dužina priključnog kabla ili otpornost njegove izolacije, mora se izvršiti rekalibracija. Senzor je uvek priključen na neinvertujući ulaz pojačavača, sa jediničnim naponskim pojačanjem ili pojačanjem $1 + R_2/R_1$ (slika 12.10b).

Uticaj ulaznog otpora pojačavača R_p treba pažljivo razmotriti kada su u pitanju niže frekvencije ulaznog signala. Na slici 12.10.c prikazan je relativni amplitudno-frekventni dijagram izlaznog napona u funkciji frekvencije i opterećenja fR_pC , gde je f donja granica frekventnog opsega i C sumarni kapacitet senzora, kablova i ulaznog kruga pojačavača. Pomoću ovog dijagrama može se odrediti kolika treba da bude vrednost R_p da bi senzor radio na niskoj frekvenciji f . Ako se, na primer, dozvoljeno dinamičko prigušenje od -3 dB projektuje za frekvenciju f_3 , tada se minimalni ulazni otpor pojačavača računa kao $R_p = 0,16/Cf_3$.

Šema sa pojačavačem naboja. Ove šeme patentirao je W.M.Kistler 1950, a primenjuju se za senzore od keramike (PZT) ili organskih materijala (PVDF), koji imaju veće dimenzije, kapacitet i visoku osetljivost po naboju. Senzor je uvek priključen na invertujući ulaz pojačavača sa velikim pojačanjem u otvorenom A , te velikom ulaznom impedansom do $10^{14} \Omega$, koja se postiže pomoću MOSFET ulaznog stepena. U povratnoj spreti pojačavača naboja je kondenzator C_{ps} (slika 12.11a).



Slika 12.11. Pijezoelektrični senzor priključen na pojačavač naboja: a) prosta šema, b) šema sa povećanom osetljivošću

Tačka na invertujućem ulazu u pojačavaču je na virtuelnoj masi. Zbog toga je napon na ekvivalentnim kondenzatorima C_k i C_p praktično nula i oni uopšte ne utiču na odziv sistema. Naboj generisan na senzoru $Q = C_s U_s$ u celosti se prenosi povratnom spregom na izlaz:

$$U_i = -\frac{1}{C_{ps}} Q \text{ ili } U_i = -\frac{C_s}{C_{ps}} U_s. \quad (19.18)$$

Osetljivost se povećava izborom manje vrednosti za kapacitet C_{ps} , ali tada postoji opasnost od zasićenja pojačavača. Osetljivost je moguće povećati i na jednostavniji način – uvođenjem strujnog delitelja u povratnu spregu pojačavača naboja (slika 12.11b). Ako se uzme da su uspostavljeni stacionarni uslovi rada, izlazni napon takvog uređaja je

$$U_i = -\frac{1 + R_1/R_2}{C_{ps}} Q. \quad (12.19)$$

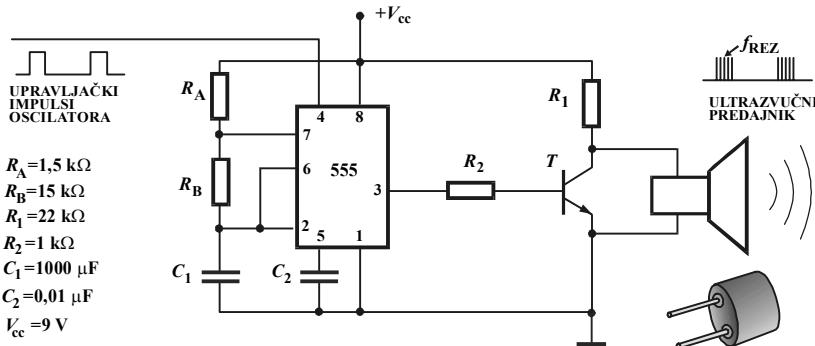
Povratna grana pojačavača naboja često ima prekidač koji služi za izbijanje naboja na kondenzatoru C_{ps} pre početka merenja.

Šema za generisanje ultrazvuka. Ultrazvuk je zvučni signal frekvencije 20 – 500 kHz. Što je frekvencija ultrazvuka veća, njegovo rasipanje je manje. Tipični merni uređaj sastoji se od predajnika i prijemnika ultrazvuka koji su postavljeni jedan naspram drugog ili jedan pored drugog. U prvom slučaju prijemnik prima ultrazvuk promenljive amplitude, zavisno od apsorpcije objekta na putu prostiranja, a u drugom slučaju meri se vreme za koje ultrazvuk pređe od predajnika do objekta i nazad do prijemnika. Proizvodači daju detaljne podatke za ultrazvučni pjezoelektrični modul, preporučujući odgovarajuću elektronsku šemu koja omogućava da modul radi kao predajnik ili kao prijemnik. Postoje i specijalni čipovi za ove namene.

U šemi predajnika najvažniji je oscilator koji daje pobudne impulse na rezonatnoj frekvenciji modula. Najviše se primenjuju moduli sa rezonantnom frekvencijom na 40 kHz. Pobuda se ostvaruje pravougaonim impulsima koje daje odgovarajući oscilator, na primer astabilni multivibrator na bazi tajmera 555 (slika 12.12). Za proračun frekvencije služi jednačina:

$$f = \frac{1,44}{(R_A + R_B)C_1}. \quad (12.20)$$

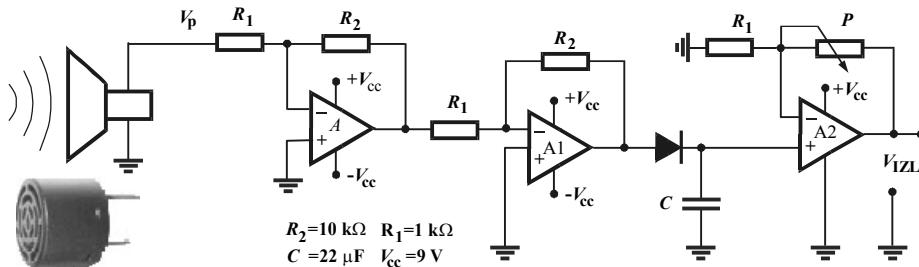
Da bi odnos signal/pauza bio približno 50%, potrebno je da bude $R_B > R_A$. Za odabrane vrednosti komponenti ($R_A = 1,5 \text{ k}\Omega$, $R_B = 15 \text{ k}\Omega$, $C = 1000 \mu\text{F}$) dobija se $f = 46 \text{ kHz}$. Tačna vrednost može da se postigne ako se umesto otpornika R_A stavi potenciometar. Ovi impulsi pojačavaju se pomoću $n-p-n$ tranzistora opšte namene, na primer 2N2222. Zavisno od izbora tranzistora računaju se vrednosti otpornika R_1 i R_2 . Pin 4 za eksterno resetovanje može biti spojen na $+V_{cc}$, ali je bolje da se sa jednog



Slika 12.12. Generisanje ultrazvuka

sličnog oscilatora na ovaj pin dovedu impulsi perioda oko 10 ms, sa odnosom signal/pauza 10%. Tako se ultrazvučni emisori emituju samo dok traje visoki nivo upravljačkog signala, a ujedno postoji definisan start za merenje vremena od početka emitovanja do prijema echo signala. Ovaj proračun obavlja se u mikrokontroleru, gde se takođe koriguje brzina ultrazvuka zbog temperaturnih promena u medijumu.

Šema za prijem ultrazvuka. Pijezomembrana u prijemniku je najčešće fabrički priključena na megaomski otpornik i FET-tranzistor, na isti način kao što je piroelektrični senzor na slici 13.11b. Napon prijemnika V_p je mali i potrebno ga je pojačati na nivo pogodan za priključivanje na mikrokontroler. Ultrazvučni echo signal prvo se pojačava oko 100 puta, a zatim poluvalno ispravlja pomoću jedne diode 1N4005 i kondenzatora C prema masi (slika 12.13). Završno podešavanje izlaznog napona V_{OUT} na opseg 0 – 5 V realizuje se pojačavačem A3.



Slika 12.13. Elektronsko kolo ultrazvučnog prijemnika

PITANJA I ZADACI

- 1) Za tankoslojni PVDF senzor prikazan na slici napisati jednačine za generisani naboj Q , odnosno napon U za koji nastaju zbog debljinske, širinske i podužne deformacije (slika 12.14).

Rešenje:

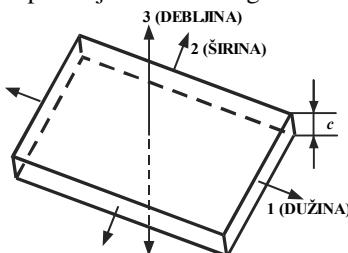
$$Q = d_{3n} T_n A; \quad n = 1, 2, 3$$

$$U = (d_{3n}/\epsilon) T_n c; \quad n = 1, 2, 3$$

$n = 1$ pravac debljinske deformacije

$n = 2$ pravac širinske deformacije

$n = 3$ pravac podužne deformacije.



Slika 12.14

- 2) Dinamičko naprezanje $T = 10\,000 \text{ N/m}^2$ deluje normalno na tankoslojni PVDF senzor na tvrdoj podlozi. Sa obe strane senzorskog sloja su tankoslojne metalne elektrode. Senzor ima debljinu $c = 100 \mu\text{m}$, dužinu $a = 2,54 \text{ cm}$ i širinu $b = 2,54 \text{ cm}$. Izračunati izlazni napon $U [\text{V/m}]$ ako pijezoelektrični koeficijent u pravcu ose z ima vrednost $d_{33}/\epsilon = 339 \cdot 10^{-3} \text{ Vm/N}$.

Rešenje: Iz $P = -d_{33}T$ dobija se $Q = -d_{33}F$, odakle je $\epsilon(A/c)U = -d_{33}F$. Prema tome, izlazni napon je $U = -(d_{33}/\epsilon) \cdot (F/ab) \cdot c = -0,37 \text{ V}$.

- 3) Na senzor iz prethodnog zadatka deluje dinamička sila $F = T \cdot ab = 6,45 \text{ N}$. Senzor je učvršćen po obodu i predstavlja membranu, tako da sila deluje po površini preseka PVDF filma bc . Koliki je izlazni napon u ovom slučaju?
 Rešenje: $U = -(d_{31}/\varepsilon)(F/bc)c = -54,9 \text{ V}$. Veći napon rezultat je delovanja sile na znatno manjoj površini.
- 4) Tankoslojni piroelektrični film debljine $c = 9 \mu\text{m}$ ima dielektričnu konstantu $\varepsilon = 106 \cdot 10^{-12} \text{ C/Vm}$ i piroelektrični naponski koeficijent $a_p = 30 \cdot 10^{-6} \text{ C/m}^2\text{K}$. Usled infracrvenog zračenja temperatura filma promenila se za $\Delta\theta = 1 \text{ K}$. Koliki je iznos piroelektričnog napona?
 Rešenje: $U_p = a_p \cdot \Delta\theta \cdot c/\varepsilon = 2,55 \text{ V}$.
- 5) Koje su dobre, a koje loše osobine pijezoelektričnih senzora?
- 6) Objasniti pojам kvazistacionarne statičke karakteristike.
- 7) Kako se definiše osetljivost pijezoelektričnog senzora?
- 8) Koje su prednosti priključivanja pijezoelektričnog senzora na merne uređaje sa pojačavačem napona u odnosu na merne uređaje sa pojačavačem naboja i obratno?

LITERATURA

1. A.A. Erofeev, G.A. Danov, F.N. Frolov: *P'ezokeramičeskie transformatory i ih primenie v radio-elektronike*, Radio svjaz', Moskva, 1988.
2. T.D. Šermegor, N.N. Strel'cova: *Plenočnye p'ezoelektriki*, Radio svjaz', Moskva, 1986.
3. R.G. Džagupov, A.A. Erofeev: *P'ezokeramičeskie elementy v priborostroenii i avtomatike*, Mašinostroenie, Lenjingrad, 1986.
4. *Application of B&K equipment to mechanical vibration and shock measurements*, Brüel & Kjaer, Naerum, Denmark, 1972.
5. R. Lerh: *Piezoelectric and acoustic finite elements as tools for the development of electroacoustic transducers*, Siemens research and development reports, Vol.17(1988), NO.6, pp.284-290
6. *The piezo book*, Burleigh, 1984.
7. C. Kittel: *Uvod u fiziku čvrstog stanja*, (prev. sa engl.), Savremena administracija, Beograd, 1970.
8. W. Welkowitz, S. Deutsch: *Biomedical instruments. Theory and design*, Academi press, New York, 1976.
9. *Piezoelectric ceramic sensors (PIEZOTITE)*, Technical Manual, Murata Manufacturing Co., www.murata.com/catalog/index.html#12, 2002.
10. *Piezoelectric technical manual*, Measurement Specialities Inc., www.msiusa.com/piezo_documentation.htm, 2000.
11. *Ultrazvučni transsiveri, transdžuseri i senzori*: www.chag.ch/PDF-Files/MSI/40khz_receiver.pdf, www.massa.com, www.transfer.pnet.pl/ultrasonic_sen0.htm
12. *Sensing and Control*, CD-ROM, Honeywell, 2003.

13

OPTOELEKTRONSKI SENZORI

13.1. PRINCIP RADA

13.1.1. Fizikalni osnov

Optoelektronski senzori privlače pažnju mnogih istraživača i korisnika. Razlog je u tome što se fizikalni osnov rada optoelektronskih senzora zasniva na promeni parametara optičkog signala sa promenom merene fizikalne veličine. Zbog toga, za razliku od otporničkih, kapacitivnih, elektromagnetskih i piezoelektričnih senzora, optoelektronski senzori nemaju galvanske i magnetne veze, već samo optičke. U tom smislu optoelektronski senzori često se označavaju samo kao optički senzori.

Zahvaljujući optičkom signalu postignuti su: galvansko razdvajanje, jednostavnije šeme priključivanja, kompatibilnost merenja i prenosa signala, zaštita od šumova, mogućnost merenja fizikalnih veličina kako u oblasti malih tako i u oblasti velikih vrednosti, standardizacija izlaznog signala, te visok kvalitet statičkih i dinamičkih karakteristika. Optički senzori u funkcionalnom pogledu su fleksibilniji, pouzdaniji i univerzalniji od klasičnih senzora, jer se mogu upotrebiti u svim uslovima delovanja jakog magnetskog polja, visoke temperature, električnih šumova i hemijske korozije. Zbog dobrih osobina optički senzori prisutni su u automatskoj regulaciji tehničkih procesa, robotici, avionici, vojnoj tehnici, medicini, specijalnim merenjima u elektroenergetici, termotehnici itd. Manje dobre osobine optičkih senzora odnose se na složenost izrade, obradu signala, osetljivost na mehaničke vibracije, te na relativno visoku cenu.

Merena fizikalna veličina dovodi se u vezu sa određenim parametrom optičkog signala, koji je, zapravo, elektromagnetni talas. Taj proces predstavlja modulaciju. Frekvencija nosećeg talasa je u opsegu $10^{13} - 10^{15}$ Hz. Ove velike mogućnosti samo su delimično iskorištene, jer moguća širina pojasa modulacije 10^{12} Hz iznosi najviše 0,1% raspoloživog spektra. Osnovni parametri optičkog signala su: amplituda, frekvencija, faza, polarizacija i rasejanje svetlosnog toka.

Promena amplitude optičkog signala tokom vremena u zavisnosti od amplitudne merene fizikalne veličine jest amplitudna modulacija. Do amplitudne modulacije dolazi bilo zbog izmene u apsorpciji ili emisiji signala bilo zbog izmene indeksa prelamanja svetlosti upotrebljenog optoelektronskog materijala. Ovo je najčešće primenjivani princip u gradnji optičkih senzora. Osnovne prednosti takvih senzora su jednostavnost konstrukcije i kompatibilnost signala sa načinom prenosa. Nedostaci su nestabilnost optičkog izvora u vremenu i gubici u prenosu za duže prenosne linije.

Promena frekvencije, odnosno talasne dužine optičkog signala u zavisnosti od amplitude merene fizikalne veličine jest frekventna modulacija. Kod frekventne modulacije apsorpcija i emisija optičkog signala, kao i indeks prelamanja svetlosti, zavise od spektra signala. Senzori koji rade na ovom principu su složeniji jer se detekcija vrši poređenjem amplituda signala na dve fiksne frekvencije. Osim toga, potrebnici su višefrekventni predajnici izvora svetlosti. Nedostatak ovih senzora je i zavisnost gubitaka od frekvencije u prenosnom optičkom kanalu.

Promena faze optičkog signala srazmerno amplitudi merene fizikalne veličine predstavlja faznu modulaciju. Detekcija merenog signala vrši se merenjem faznog pomaka. Nedostaci senzora koji rade na ovom principu su nestabilnost laserskog izvora, postojanje laserskog šuma i poteškoće u vezi sa merenjem malih faznih pomaka.

Promena polarizacije, odnosno ugla linearne polarizacije optičkog signala prema referentnoj osi srazmerno amplitudi merene fizikalne veličine predstavlja lincarni tip polarizacione modulacije. Nedostatak senzora koji rade na ovom principu je dvostruko prelamanje svetlosti zbog mehaničkih naprezanja u materijalima kroz koje se prostiru optički signali, te neophodnost primene analizatora polarizacije kao složenog uredaja.

Promena stepena rasejavanja (propusnosti, dinamičke disperzije) signala kroz materijal poznatih osobina srazmerno amplitudi merene fizikalne veličine predstavlja modulaciju apsorpcijom. Detekcija merene veličine vrši se analizom vremenskog odziva optičkog signala. Nedostatak senzora koji rade na ovom principu je pojava disperzije modova (sopstvenih oscilacija) optičkog signala u vlaknu.

13.1.2. Modulatori i deflektori optičkog signala

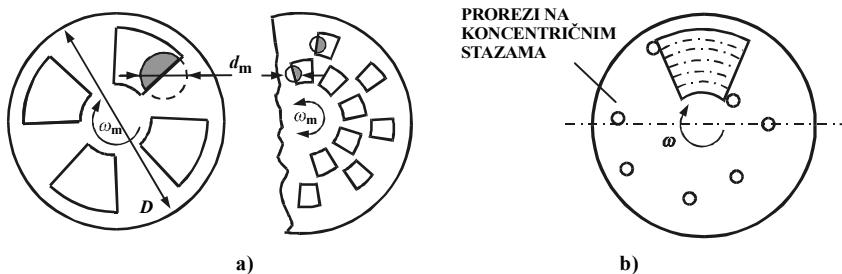
Modulatori. Promena parametara optičkog signala srazmerno amplitudi merene fizikalne veličine predstavlja modulaciju tog signala. Upravljanje amplitudom, frekvencijom, fazom, polarizacijom i rasejavanjem realizuje se u modulatoru. Modulatori optičkog signala mogu se podeliti prema:

- načinu rada
- izvedbi.

Prema načinu rada razlikuju se integralni modulatori optičkog signala, koji upravljaju vremenskim promenama amplitute signala, te prostorni modulatori, koji upravljaju raspodelom amplitute optičkog zračenja u prostoru. U odnosu na izvedbu, razlikuju se optomehanički, optoelektronski i direktni (mehaničko-optički) modulatori.

Optomehanički modulatori integralnog tipa. Promena optičkog signala optomehaničkim modulatorima ostvaruje se mehaničkim kretanjem jednog ili više optičkih elemenata. Optički elementi kao što su: ogledala, prizme, leće ili dijafragme sa otvorima pokreću se pomoću specijalnih elektromehaničkih, elektromagnetskih ili pijezoelektričnih servomotora. Najviše se upotrebljava disk sa jednim ili dva niza identičnih proreza (slika 13.1.a). Između frekventnog opsega modulacije f_m i maksimalnog preseka d_m kojim prolazi optičko zračenje postoji inverzna zavisnost. Ova

tvrdnja je očigledna budući da se f_m za dati disk može povećati samo povećavanjem broja sektora, tj. smanjivanjem d_m . Tipične vrednosti za disk podeljen na sektore su $d_m = 2 \text{ mm}$ i $f_m = 5 - 10 \text{ kHz}$. Primenom pijezoelektričnih servomotora sa istim presekom frekventni opseg modulacije se proširuje do $f_m = 50 - 100 \text{ kHz}$.



Slika 13.1. Optomehanički modulatori: a) integralna modulacija sa jednokanalnim i dvokanalnim diskom, b) disk sa prorezima za prostornu modulaciju

Optomehanički modulatori prostornog tipa omogućavaju razlaganje optičkog polja po nekoj trajektoriji skeniranja. Na slici 13.1.b prikazan je disk sa nizom proreza na stazama različite udaljenosti od centra diska. Dinamika ovakvih modulatora izražava se periodom skeniranja, koji je reda 0,01 s. Rezolucija je određena brojem linija, kojih može biti najviše 100. Nedostatak svih optomehaničkih modulatora je njihova veličina.

Optoelektronski modulatori koji se primenjuju u gradnji optičkih senzora menjaju parametre optičkog signala pomoću elementa koji menja svoja optička svojstva zahvaljujući delovanju naponskog ili strujnog signala. Optički elementi sa ovakvim svojstvima mogu biti kristali, tečnosti, poluprovodnici itd. Budući da optoelektronski modulatori nemaju pokretnih delova, omogućena je visoka frekvencija modulacije čija je gornja granica $10^5 - 10^8 \text{ Hz}$. Nedostaci ovih modulatora su velika dužina radne zone l , kroz koju prolazi optički signal prilikom modulacije, te veliki napon pomoću kojeg se upravlja modulacijom.

Optoelektronski modulatori koji se primenjuju u tehniči senzora grade se na osnovu principa Pokelsovog ili Kerovog elektrooptičkog efekta ili, rede, na principu Koton-Mutonovog magnetooptičkog efekta. Efekti se manifestuju u promeni indeksa loma pod uticajem upravljačkog električnog ili magnetnog polja. Promena indeksa loma u elektrooptičkom materijalu je:

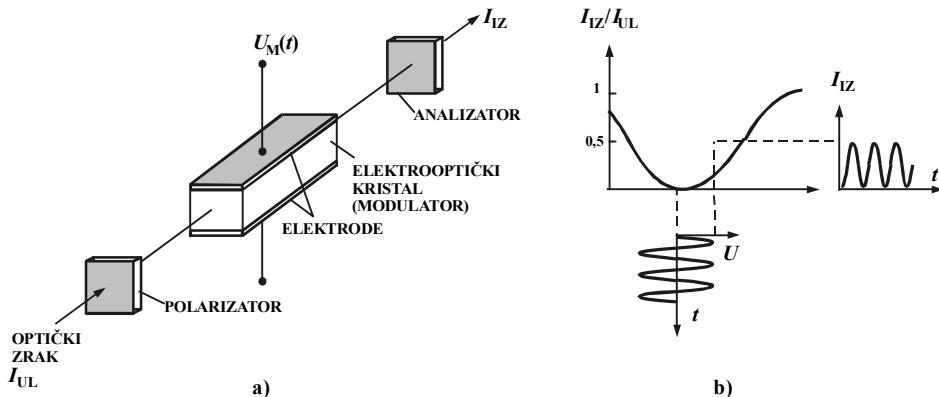
$$n - n_0 = k_1 E + k_2 E^2, \quad (13.1)$$

pri čemu je n_0 indeks loma bez električnog polja E , k_1 linearni i k_2 kvadratni elektrooptički koeficijent. Promena indeksa loma usled linearног člana predstavlja Pokelsov efekt, a promena pod uticajem kvadratnog člana $k_2 E^2$ naziva se Kerov efekt. Ovi efekti naročito su izraženi kod nitrobenzena ($C_6H_5NO_2$), litijum-niobata ($LiNbO_3$), kalijum-dihidrogenfosfata (KH_2PO_4 ili skraćeno KDP), amonijum-dihidrogenfosfata ($NH_4H_2PO_4$ ili APD), polikristalina olovotitanat modifikovanog sa lantanom (PLZT) itd.

Za praktičnu primenu interesantniji je kvadratni elektrooptički efekt, koji se javlja u tečnim kristalima. Nastajanje Kerovog efekta ilustruje slika 13.2.a. Ispred elektrooptičkog kristala nalazi se polarizator svetlosti, a iza kristala prijemnik polarizovane svetlosti – analizator. Glavni preseci polarizatora i analizatora nalaze se pod nekim uglom u odnosu na glavnu optičku osu, pa zbog toga svetlost ne prolazi kroz sistem kada nema električnog polja. Pri uključenom istosmernom naponu $U = 10 - 15 \text{ kV}$ kristal postaje anizotropan i dve ortogonalne komponente polarizovane svetlosti, usled dvostrukog prelamanja, prolaze kroz kristal različitim faznim brzinama: $\Delta\phi = 2\pi C_2 l E^2$, gde je $E = U/d$ jačina električnog polja u kristalu. Ovako pomereni zraci se iza kristala dopunjaju i formiraju eliptično polarizovanu svetlost. Deo te svetlosti prolazi kroz analizator, pa se kaže da kristal propušta svetlost. Odnos intenziteta svetlosti na izlazu i ulazu $I_{\text{iz}}/I_{\text{ul}}$ za sinusni modulacioni napon je modulaciona karakteristika (slika 13.2.b) koja se opisuje jednačinom:

$$I_{\text{iz}} = I_{\text{ul}} \sin^2(2\pi C_k l U_m^2 / d^2), \quad (13.2)$$

gde su: U_m amplituda modulirajućeg (upravljačkog) napona, d rastojanje između elektroda, l dužina ćelije i C_k Kerova konstanta karakteristična za upotrebljeni kristal. Iz jednačine (13.2) vidi se da opisani sistem pretvara faznu modulaciju u amplitudnu.



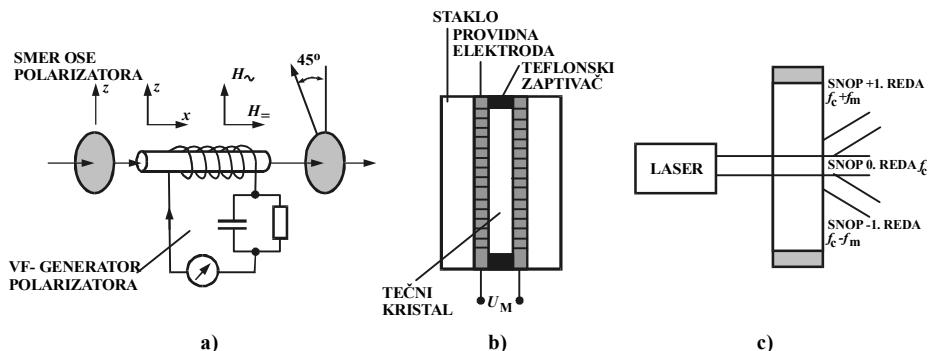
Slika 13.2. Modulacija na bazi elektrooptičkog efekta: a) Kerova ćelija, b) modulaciona karakteristika

Dobra osobina Kerovog efekta je da se on uspostavlja približno za 10^{-9} s . Nedostatak mu je što je potreban veliki istosmerni napon – do nekoliko kolovolti, a to negativno utiče na veličinu senzora i ekonomičnost.

Magnetooptički Koton-Mutonov efekt je analogan elektrooptičkom efektu. Ako se na magnetooptički materijal, kao što je itrijumov železni granat (YIG), primeni magnetno polje H (slika 13.3.a), nastaje dvostruko prelamanje polarizovane svetlosti. Pri tome se promena indeksa loma, zbog prisustva magnetnog polja, može predstaviti jednačinom:

$$n - n_0 = kH, \quad (13.3)$$

gde je k magnetooptička konstanta za dati kristal.



Slika 13.3. Optoelektronski modulator: a) magnetooptički modulator, b) modulator sa dinamičkim rasejavanjem svetlosti, c) akustikooptički modulator

Magnetooptički efekt se u technici senzora redje primjenjuje od elektrooptičkog jer je konstanta k , odnosno osetljivost, veoma mala. Osim Koton-Mutonovog magnetooptičkog efekta, primjenjuje se i Faradejev magnetooptički efekt, koji se manifestuje zakretanjem ravni polarizacije kada na optički neaktivni materijal deluje jako magnetsko polje.

Efekt dinamičkog rasejavanja primjenjuje se u technici senzora tek u novije vreme. Suština je u tome da se prozračnost nekih kristala smanjuje sa povećanjem istosmernog modulirajućeg napona na elektrodama (slika 13.3.b). Modulator sa celijom od takvog tečnog kristala je veoma pouzdan, ima period modulacije od 1 – 100 ms, a napon napajanja je svega 5 – 50 V.

Modulatori na bazi mehaničkooptičkih efekata su direktni modulatori, jer se zbog mehaničkog uticaja merene fizikalne veličine menjaju optička svojstva kristala. U ove efekte spadaju: fotoelastični, pijezooptički i akustikooptički efekt. Fotoelastični i pijezooptički efekt imaju ograničenu frekvenciju modulacije zbog frekventne karakteristike modulirajućeg materijala. Akustikooptički efekt je promena indeksa loma kristala zbog prolaska ultrazvučnih valova kroz kristal, sa frekvencijom modulacije koja je znatno veća, jer je određena samo vremenom prolaska ultrazvučnih valova kroz snop optičkog signala (slika 13.3.c).

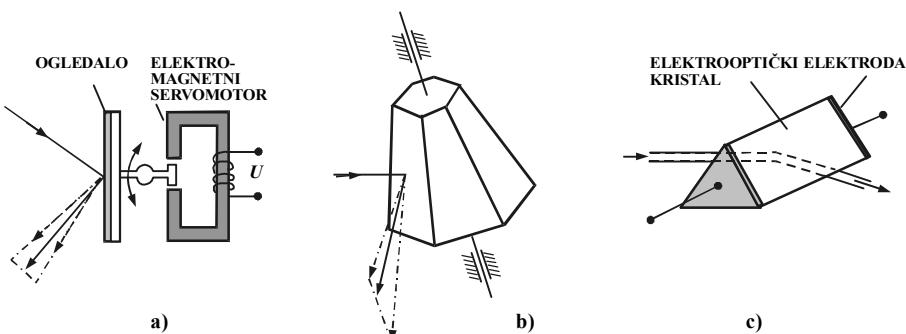
Deflektori optičkog signala služe za promenu smera prostiranja signala. Osnovni parametri koji definisu deflektor su:

- φ_{sk} maksimalni ugao otklona (skeniranja)
- f_{sk} maksimalna frekvencija skeniranja
- d_{sk} maksimalni dijametar svetlosnog snopa koji se može otkloniti
- λ_{sk} opseg spektra svetlosti koji se može otkloniti.

Razlikuju se optomehanički i optoelektrični deflektori. Optomehanički deflektori otklanjavaju svetlost pomoću pomičnih ogledala, prizmi, piramide itd. (slika 13.4.a i

13.4.b). Frekvencija skeniranja limitirana je dinamikom servomotora za pomeranje optičkog elementa. Na primer, deflektor sa elektromagnetskim servomotorom ima frekvenciju skeniranja $f_{sk} = 50$ Hz za ugao skeniranja do $\varphi_{sk} = 10^\circ$, a sa piezoelektričnim servomotorom frekvencija skeniranja je $10^4 - 10^5$ Hz za ugao $\varphi_{sk} = 2 - 5^\circ$ i širinu snopa $d_{sk} = 3 - 6$ mm.

Elektrooptički deflektori otklanjanju svetlosni signal pomoću opisanih elektrooptičkih i mehaničko-optičkih efekata, na osnovu kojih rade i modulatori. Karakteristike ovih deflektora su mnogo bolje nego optomehaničkih. Na primer, deflektorom u obliku prizme od elektrooptičkog materijala sa kvadratnim elektrooptičkim efektom (slika 13.4.c) može se ostvariti frekvencija skeniranja do 10^7 Hz – pri uglu skeniranja do 1° .



Slika 13.4. Deflektori svetlosnog signala: a) i b) optičkomehanički, c) elektrooptički

13.1.3. Optički i elektrooptički materijali

Izbor optičkog materijala je prva faza u gradnji optičkog senzora. Pogrešno odabrani materijali daju slabije statičke i dinamičke karakteristike senzora, optičkog vlakna, ali i pomoćnih elemenata kao što su objektivi, prizme, zaštitni prozori, modulatori i drugo.

Vrsta materijala određuje područje talasnih dužina za koje je senzor namenjen. Na primer, tehnologija izrade silicijuma za vidljivo i veoma blisko infracrveno područje spektra ($\lambda = 0,38 - 0,76 \mu\text{m}$) razradena je veoma dobro. Tehnologija izrade poluprovodnika za infracrveno područje većih talasnih dužina ni približno nije tako razvijena. Osnovni problem je da se dobije poluprovodnik sa malom širinom zabranjene zone kako bi energija upadnog fotona $E = hv = hc/\lambda$ mogla da proizvede slobodne nosioce nanelektrisanja. Poluprovodnici sa malom širinom zabranjene zone prave se od heterospojeva: binarnih (GaAs, InSb), pseudobinarnih i tercijarnih struktura (HgCdTe, GaInAs, InGaN) visoke homogenosti – i to samo za usko područje talasnih dužina.

13.2. PRINCIPI RADA OPTIČKIH SENZORA

Klasifikacija. Optički senzori odlikuju se velikom raznovrsnošću, pa se zbog toga njihova klasifikacija može izvesti na osnovu različitih kriterija:

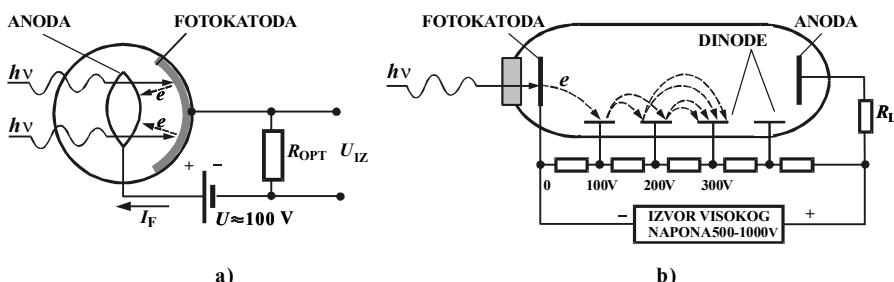
- parametra optičkog signala koji je nosilac merne informacije
- fizikalnog efekta koji dovodi do promene određenog parametra optičkog signala u zavisnosti od merene fizikalne veličine
- načina povezivanja senzora i prenosnog medija
- tipa modulacije.

Najpotpunija je klasifikacija na osnovu načina konverzije merene fizikalne veličine u mernu informaciju. Na bazi ovog opšteg kriterija razlikuju se: senzori sa analognom konverzijom, senzori sa konverzijom analognog signala u signal sa promenljivim periodom ili frekvencijom i senzori sa analogno-digitalnom konverzijom.

Analogni optički senzori. Izlazni signal optičkih senzora sa analognom konverzijom merene fizikalne veličine u mernu informaciju jest amplituda električne struje optičkog prijemnika. Ulagana informacija je intenzitet svetlosti ili pozicija na fotoosetljivoj površini prijemnika na koju pada zrak svetlosti konstantnog intenziteta. Pozicija se menja zakretanjem svetlosnog zraka pomoću nekog optičkog elementa (sočiva, ogledala, proze, prizme itd.), čije je kretanje proporcionalno merenoj fizikalnoj veličini. Dalja podela analognih optičkih senzora zavisi od tipa konverzije svetlosti u izlazni električni signal.

1) *Senzori sa fotoelektronskom emisijom* (vanjski fotoefekt). Prave se u obliku vakuumskih fotocevi kao fotodiode ili fotomultiplikatori (slika 13.5). Fotokatoda je prekrivena slojem fotoemisionog materijala (poluprovodnik *p*-tipa sa dodatkom cezijuma ili cezijum-monoksida) čiji elektroni imaju mali izlazni rad $W = 1 - 5 \text{ eV}$. Zato, kada se fotokatoda osvetli monohromatskom svetlošću talasne dužine $\lambda = c/v$, apsorbovani foton predaje elektronu dovoljno energije da savlada energetsku barijeru i sasvim napusti materijal. Kinetička energija emitovanog elektrona je odredena je Ajnštajnovom relacijom:

$$E_k = h\nu - W. \quad (13.4)$$



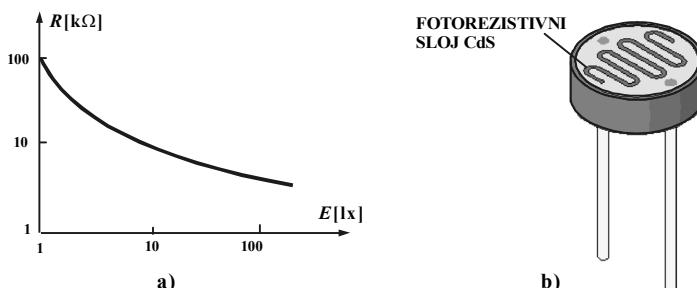
Slika 13.5. Princip rada fotoelektričnog senzora: a) fotodioda, b) fotomultiplikator

Pomoću vanjskog izvora U fotoelektroni se dalje ubrzavaju između anode i katode i sakupljaju na anodi. Rezultujuća fotostruja I_F u vakuumskoj fotodiodi registruje se direktno ili kao pad napona U_{IZ} na opteretnom otporu (slika 13.5.a). Fotoni svetlosti manje talasne dužine imaju veću energiju, pa je pojava fotoemisije verovatnija. To je razlog što se fotokatode prave od fotoemisionih materijala osetljivih na vidljivu ili infracrvenu svetlost, odnosno za talasne dužine $0,4 - 0,9 \mu\text{m}$. Kod fotomultiplikatora između katode i anode ima više elektroda (dinoda), od kojih je svaka naredna na pozitivnijem potencijalu od prethodne, tako da se struja elektrona pojačava sekundarnom emisijom (slika 13.5.b).

2) *Senzori sa efektom fotoprovodnosti* (unutrašnji fotoefekt). Kada elektroni u poluprovodniku prime energiju fotona $h\nu = hc/\lambda$, oni prelaze iz valentne u provodnu zonu ako je ta energija veća ili jednaka širini zabranjene zone E_g (1,09 eV za Si). Efekat se manifestuje u opadanju električnog otpora poluprovodničkog materijala kada na njega pada svetlost (slika 13.6). Ova promena je eksponencijalna:

$$R = (R_0/E_0)E^{-K} \quad (13.5)$$

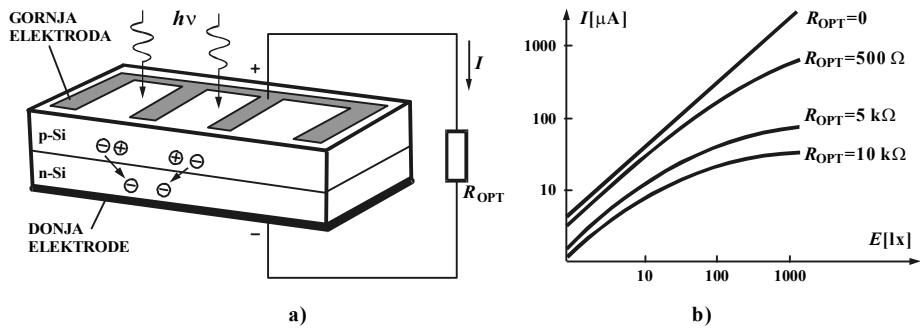
gde je konstanta K manja od 1, a R_0 otpornost za referentni intenzitet svetlosti E_0 . Materijali od kojih se prave fotootpornici (*Light Dependent Resistor*) svrstani su u tri grupe, zavisno od talasne dužine zračenja na koju su osetljivi. Na primer, ZnO i ZnS su osetljivi na ultraljubičasto zračenje, CdS, CdSe i Si na vidljivu svetlost, PbS, PbSe InSb i GeAu na infracrveno zračenje. Odnos otpora u mraku i otpora na svetlu je do $10^6:1$. Nedostatak ovakvih optičkih senzora je relativno velika vremenska konstanta, $T > 50 \text{ ms}$. Takođe, kako su osetljivi na delovanje temperature, pa je potreban hladnjak.



Slika 13.6. Fotorezistor: a) karakteristika, b) izgled

3) *Senzori sa fotonaponskim efektom* (fotoelementi). To su aktivni senzori, jer se pod uticajem svetlosti unutar $p-n$ prelaza javljaju slobodni elektroni i šupljine, te se generiše *ems*. Pri tome se p -sloj ponaša kao anoda, a n -sloj kao katoda. Linearnost statičke karakteristike izlazna struja – jačina upadne svetlosti zavisi od opterećenja (slika 13.7). Tipičan fotonaponski element je solarna čelija od silicijuma ili selenia.

4) *Senzori sa promenom otpornosti $p-n$ spoja*. Kada se fotonaponski element inverzno polarise pomoću vanjskog naponskog izvora, inverzna struja zasićenja postaje direktno proporcionalna jačini svetlosti. Inverzna polarizacija ima veliku brzinu odziva: od $1 \mu\text{s}$ do 1 ns . Predstavnici senzora koji rade na ovom principu su fotodiode (obične $p-n$, $p-i-n$ ili lavinske), fototranzistori pnp ili npn tipa. Rad



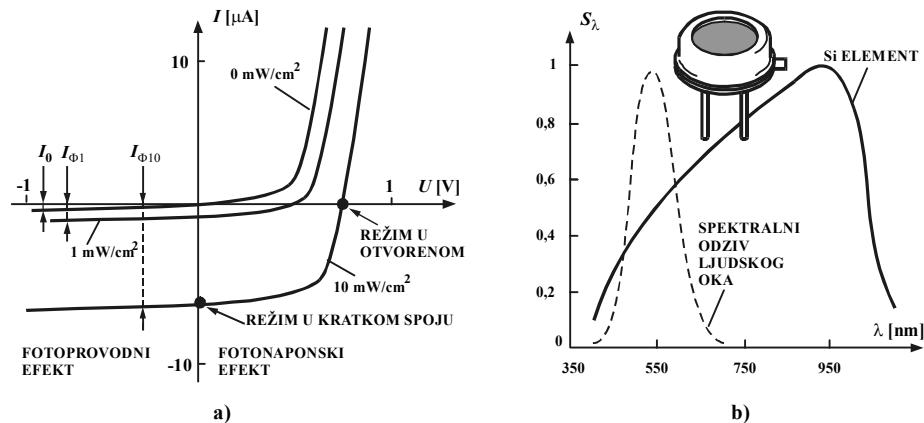
Slika 13.7. Fotonaponski efekat: a) solarna čelija, b) statička karakteristika

fotodiode i fotonaponskog elementa može se posmatrati pomoću familije $I-U$ karakteristika snimljenih za različite intenzitete zračenja. Struja se opisuje jednačinom

$$I = I_0(e^{qU/kT} - 1) - I_\Phi, \quad (13.6)$$

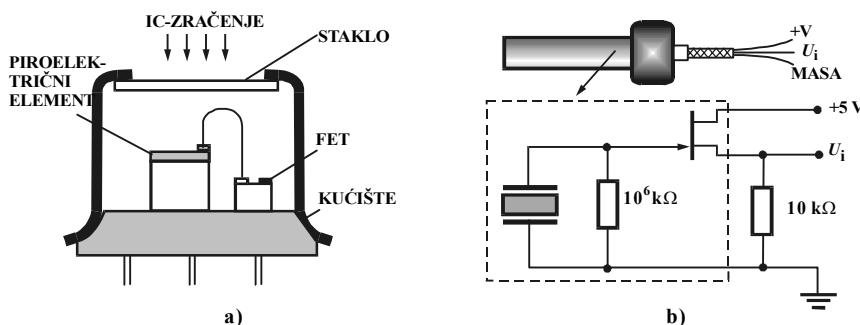
gde su: $q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C nacelktiranje jednog elektrona, k Boltzmanova konstanta, T apsolutna temperatura, I_0 inverzna struja zasićenja mraka, a I_Φ pri merenom zračenju. Fotonaponski efekat odgovara desnoj poluravni i tu je napon U pozitivni generisani napon fotonaponskog elementa. Karakteristike u levoj poluravni odgovaraju fotoprovodnom efektu i napon U je negativni napon pretpolarizacije fotodiode (slika 13.8).

Upadom fotona na fotodiodu ili MOS kondenzator stvaraju se parovi elektron-šupljina koji se razdvajaju pod delovanjem postojećeg električnog polja i gomilaju na granici ispraznjene oblasti. Konverzija fotona u nacelktiranje karakteristična je za CCD-elemente (*Charge Coupled Devices*). Ovi elementi služu se u matrice i od njih se prave senzori slike u video-kamerama.



Slika 13.8. Fotodioda: a) I-U karakteristika fotonaponskog elementa i fotodiode, b) silicijumska fotodioda i tipična spektralna karakteristika

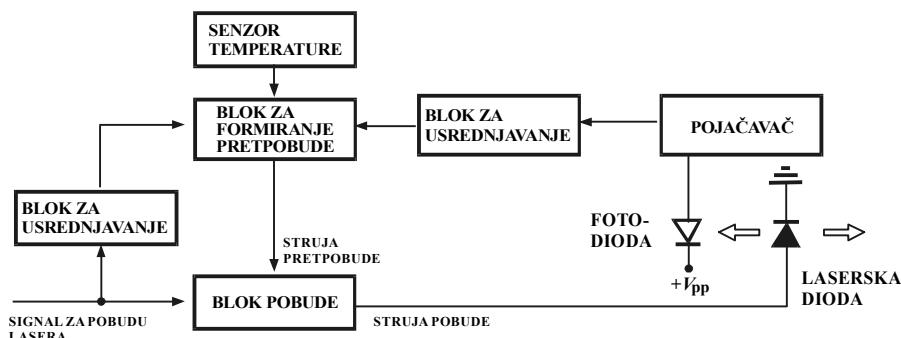
5) *Senzori sa piroelektričnim efektom.* Pod delovanjem svetla (optičke radijacije) na oblogama tanke pločice od feroelektričnog materijala menja se temperaturno polje, koje pobuduje spontanu polarizaciju, pa se na oblogama javlja električni naboј. Bitno je da je naboј proporcionalan promeni temperature, a ne samoj temperaturi. Senzor na bazi piroelektričnog efekta je, dakle, temperaturno osetljivi kapacitet. Visoki otpor piroelektričnog elementa pri veoma malom naboju transformiše se u prihvatljiv izlazni otpor pomoću megaomskog otpornika, a smanjenje struje curenja postiže se FET-tranzistorom (slika 13.9). Senzori ovog tipa najčešće se primenjuju u infracrvenom području kao jedna subklasa termičkih senzora.



Slika 13.9. Piroelektrični senzor: a) izgled, b) tipična merna šema

Optički senzori sa periodičkim ili frekventnim izlazom. Izlazni signal ove klase senzora je impulsni signal sa promenljivim vremenom trajanja ili sa promenljivom frekvencijom. Impulsi nastaju skeniranjem ulaznog signala. Pretvaranje ulaznog signala u impulse vrši se na bazi linearogn ili nelinearnogn elektrooptičkog efekta, magnetooptičkog ili akustičkooptičkog efekta.

Kao primer za ove senzore može se navesti laserska dioda, kod koje se strujom pobude direktno menja izlazni optički signal (slika 13.10). Struja pobude je suma struje praga $I_p = 100 - 200 \text{ mA}$ pri kojoj laserska dioda počinje da emituje koherentnu svetlost i impulsa struje $I_M = 10 - 100 \text{ mA}$. Struja praga I_p jako zavisi od temperature, pa je potrebna automatska regulacija izlazne snage zračenja. Struja praga



Slika 13.10. Laserska dioda sa direktnom pobudom i automatskom kontrolom izlazne snage

automatski se reguliše u kolu pretpobude, u zavisnosti od razlike srednje vrednosti digitalnog signala kojim se pobuduje laser i srednje vrednosti trenutne snage zračenja lasera koja se detektuje pomoću fotodiode postavljene uz laser.

Optički senzori sa analogno-digitalnom konverzijom. Izlazni signal ovih senzora je kod koji je proporcionalan promeni analognog ulaznog signala. Senzori sa A/D konverzijom su najperspektivniji optički senzori. Dele se u dve velike grupe.

U prvu grupu spadaju senzori sa sekvencijalnim kodiranjem. Opseg merene veličine je skup sastavnih delova – prirasta merene veličine – i svakom delu pridružene odgovarajuće jedinice najnižeg cifarskog mesta u kodu. Računajući priraste, dobija se cifarski ekvivalent merene veličine. Proračun se izvodi na osnovu promene kôda u odnosu na prethodno stanje (sumirajući, inkrementalni koder).

U drugu grupu spadaju senzori sa paralelnim kodiranjem jer se izlazni signal dobija istovremenim očitavanjem vrednosti svih cifarskih mesta (apsoltni koder).

13.3. KARAKTERISTIKE OPTIČKIH SENZORA

Kvantna efikasnost η je mera za svetlosnu snagu koju efektivno apsorbuje fotodetektor. Definiše se kao odnos prosečnog broja emitovanih ili proizvedenih elektrona na kontaktima fotodektora i prosečnog broja upadnih fotona.

Odzivnost fotodektora (*responsivity*) R_λ je odnos izlaznog signala (struje ili napona) optičkog senzora i upadne snage zračenja, koji zavisi od talasne dužine svetlosti λ . Zato se definiše spektralna odzivnost senzora, tj. promena odzivnosti u funkciji talasne dužine:

$$R_\lambda = \frac{s_\lambda}{\phi_\lambda d\lambda} [\text{V/W ili A/W}], \quad (13.7)$$

gde su s_λ izlaz senzora (A ili V), $\phi_\lambda d\lambda$ upadni fluks u opsegu $d\lambda$ oko talasne dužine λ , [W]. Izbor jedinice za izlazni električni signal nije formalne prirode. Ako je izlazni signal u voltima, onda je optički fluks izražen u foton/s. Ako je izlazni signal u amperima, tada se optički fluks izražava kao kvantna efikasnost η pomoću jedinice broj elektrona po fotonu. Ovo je važno zbog toga što je zavisnost optičkog fluksa od talasne dužine različita, već prema tome da li je reč o prvom ili drugom načinu prikazivanja.

Ukupna odzivnost R dobija se kao ukupni izlazni signal podeljen ukupnim upadnim fluksom:

$$R = \frac{\int_0^\infty s_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty \phi_\lambda d\lambda} = \frac{\int_0^\infty R_\lambda \phi_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty \phi_\lambda d\lambda}. \quad (13.8)$$

Analiza izraza (13.8) pokazuje da ukupna odzivnost optičkog senzora zavisi od spektralne odzivnosti senzora R_λ , ali i od karakteristika svetlosnog izvora. Poređenje dva senzora na osnovu podataka o njihovoj spektralnoj odzivnosti ili

ukupnoj odzivnosti implicira konstantan optički izvor sa definisanim opsegom talasnih dužina. U praktičnim merenjima primenjuje se izvor tipa crno telo na konstantnoj temperaturi.

Ekvivalentna snaga šuma. U načelu, poželjno je da odzivnost senzora bude što veća. Međutim, odzivnost kao parametar ne daje informacije koliki je najmanji optički fluks koji se detektuje. Limitirajući faktor u tom pogledu je šum. Ekvivalentna snaga šuma – NEP (*Noise Equivalent Power*) jest izvedeni parametar što određuje minimalni iznos optičkog fluksa koji senzor može da detektuje. NEP se definiše kao vrednost sinusno moduliranog upadnog optičkog zračenja za koje je odnos signal/šum jednak jedan ($S/N=1$), odnosno izlazni signal s_λ jednak efektivnoj vrednosti signala šuma N_{rms} :

$$NEP_\lambda = N_{\text{rms}}/R_\lambda , \quad (13.9)$$

gde je $NEP_\lambda = \phi_\lambda d\lambda$ [W] upadni fluks na talasnoj dužini λ na opsegu $d\lambda$. Jednakost efektivne vrednosti izlaznog signala i efektivne vrednosti šuma posmatra se za referentni opseg (1 Hz) pri datoj modulacionoj frekvenciji (400 Hz).

Ekvivalentna snaga šuma NEP zavisi od spektralnih karakteristika upadnog fluksa, spektralne odzivnosti senzora i frekventne propusnosti prepojačavača. Senzor s manjom vrednošću NEP -a je bolji.

Detektivnost i spektralna detektivnost. Detektivnost je recipročna vrednost ekvivalentne snage šuma:

$$D = 1/NEP , \quad (13.10)$$

pa je direktno proporcionalna kvalitetu optičkog senzora. U skladu sa definicijom ekvivalentne snage šuma (13.9), detektivnost se može napisati u obliku:

$$D_\lambda = \frac{1}{NEP_\lambda} = \frac{R_\lambda}{N_{\text{rms}}} \left[\text{W}^{-1} \right] . \quad (13.11)$$

Vrednosti za NEP i D zavise od frekventnog opsega šuma i prijemne površine senzora. Na primer, za šum koji nastaje zbog fluktuacije nosilaca naboja u senzoru, srednja vrednost snage šuma računa se pomoću sledeće formule:

$$N_{\text{rms}} = \left(\frac{\lambda \eta \tau A \phi_\lambda d\lambda}{hc} \right)^{\frac{1}{2}} (A \Delta f)^{\frac{1}{2}} , \quad (13.12)$$

gde su: η kvantna efikasnost, A površina senzora, τ životni vek nosilaca naboja i Δf frekventna propusnost senzora, odnosno prepojačavača na koji je priključen senzor.

Da bi se izbeglo specificiranje frekventnog opsega prepojačavača i površine senzora, uveden je pojma specifične detektivnosti:

$$D^* = (A \Delta f)^{\frac{1}{2}} D_\lambda = \frac{(A \Delta f)^{\frac{1}{2}}}{NEP_\lambda} \left[\text{mHz}^{1/2}/\text{W} \right] . \quad (13.13)$$

Između odzivnosti i specifične detektivnosti postoji sledeća veza:

$$D^* = (A\Delta f)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{R_\lambda}{N_{\text{rms}}} . \quad (13.14)$$

Dinamičke karakteristike. Konverzija svetlosnog fluksa u električni signal ne odvija se trenutno. Razlog je u ograničenjima koja se javljaju u procesu detekcije. Ova ograničenja su sledeća:

- vreme života nosilaca naboja nastalih delovanjem fotona svetlosti je konačno
- vreme prolaza generisanih naboja elektriciteta kroz materijal senzora je konačno i zavisi od vrste i dimenzije materijala
- pojava termičkog kapaciteta kod termičkih (optičkih) senzora, koji se javlja zbog toga što je potrebno izvesno vreme da materijal od kojeg je senzor napravljen promeni temperaturu nakon delovanja optičkog fluksa
- frekventna propusnost pretpojačavača i pojačavača
- modulacija optičkog fluksa koja se provodi skeniranjem ili čopovanjem kako bi se smanjio šum ili pokrilo vidno polje.

Kao rezultat ovih ograničenja, svi prethodno definisani pokazatelji optičkih senzora imaju aperiodsku zavisnost od frekvencije upadnog zračenja ω . U katalozima se najčešće mogu naći amplitudno-frekventni dijagrami $R_\lambda(\omega)$ i $D^*(\omega)$, odnosno:

- frekventna zavisnost odzivnosti senzora:

$$R_\lambda(\omega) = \frac{R_\lambda(0)}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} , \quad (13.15)$$

gde je τ vremenska konstanta odziva senzora

- frekventna zavisnost specifične detektivnosti:

$$D^*(\omega) = \frac{D^*(0)}{\sqrt{1 + (\omega\tau_d)^2}} , \quad (13.16)$$

gde je τ_d vremenska konstanta detekcije senzora.

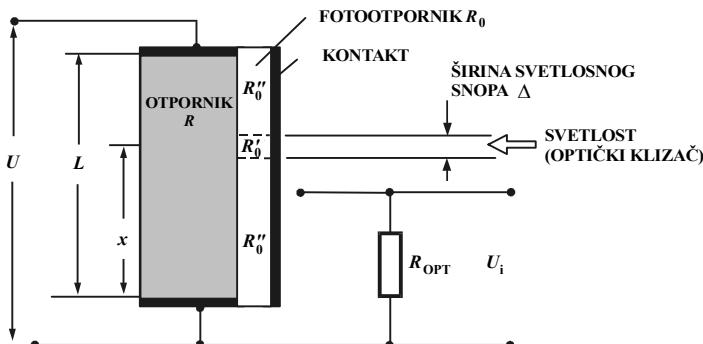
13.4. NAČIN GRADNJE OPTIČKIH SENZORA

Prijemnici svetlosti kao optički senzori. Prijemnik kao optički senzor konverteuje optičku energiju u električnu veličinu (struja, napon, otpor, kapacitet ili naboј). Razlikuju se dve velike grupe senzora optičkog zračenja. Senzori prve grupe (kvantni detektori) detektuju optičku radijaciju na bazi fotoelektričnih efekata, koji se

manifestuju u stvaranju slobodnih elektrona usled apsorpcije diskretnih vrednosti energije (fotona):

- fotoemisija; apsorbovani fotoni stvaraju slobodne elektrone, koji napuštaju površinu materijala
- fotoprovodnost; apsorbovani fotoni stvaraju slobodne nosioce elektriciteta u materijalu
- fotonapon; apsorbovani fotoni na $p-n$ prelazu stvaraju parove elektrona i šupljina i time menjaju potencijalnu barijeru $p-n$ prelaza
- fotoprelaz; apsorbovani fotoni dovode do promene električnih parametara u elementima tipa dioda ili tranzistor
- fotoionizacija; količina kretanja apsorbovanih fotona dovodi do pojave jona kao slobodnih nosilaca u poluprovodnom materijalu.

Kao primer kvantnog detektora interesantno je razmotriti optički fotopotenciometar prikazan na slici 13.11. Otpornički sloj ima otpor R i dužinu L , a između njegovih krajeva A i B priključen je napon napajanja U . Između ovog otporničkog sloja i kontakta K nalazi se fotoootpornički sloj R_0' od kadmijum-sulfida. Izlazni napon meri se između kontakta K i jednog od krajeva (A ili B). Neka se sada na fotoootpornik dovede uski snop svetlosti širine Δ , pri čemu svetlost pada okomito na ravan crteža. Osvetljeni deo fotoootportnika R_0' ima znatno manji otpor nego neosvetljeni delovi fotoootportnika R_0'' . Zbog toga osvetljeni deo kratko prespaja kontakt K i otpor R . Izlazni napon U_x proporcionalan je položaju svetlosnog snopa x .



Slika 13.11. Fotopotenciometar

Senzori druge grupe apsorbuju fotone, pri čemu apsorbovana energija dovodi do promene temperature u materijalu od kojeg je napravljen senzor (termički detektori). Najpoznatiji predstavnici ove grupe optičkih senzora su:

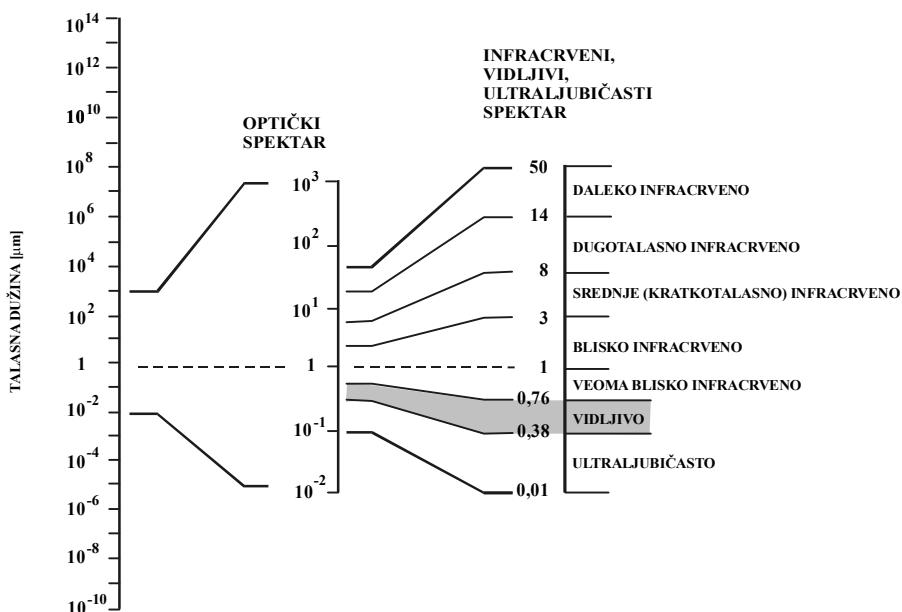
- termistor, temperaturno osjetljivi poluprovodnički otpornik;
- bolometar, dva termootportnika u diferencijalnom spoju koji mere promenu temperature proporcionalne ukupnom upadnom zračenju;

- termopar, dva različita materijala spojena na jednom kraju (koji je izložen radijaciji) generišu *ems* na otvorenom kraju koji je u senci;
- piroelektrični senzor, temperaturno osetljivi kapacitivni senzor sa piroelektričnim materijalom između elektroda;
- Golejeva ćelija, pneumatski senzor (gasni termometar), apsorbovana optička energija dovodi do promene pritiska u ćeliji.

Optički senzori prve grupe imaju uži frekventni spektar, veću osetljivost i brže vreme odziva. Postoji i treća grupa optičkih senzora, koji nemaju električni izlaz: fotohemski, fotoplastični, fotochromatski i luminiscentni.

Optički izvor kao senzor. Kao izvori svetlosti najčešće se primjenjuju LED-diode i laserske diode (LD). Zajedničko im je da emitovanje fotona nastaje prelaskom elektrona sa višeg na niži energetski nivo, tj. sa prelaskom iz provodne u valentnu zonu. Međutim, kod lasera se radi o stimulisanoj emisiji, a kod LED-dioda o spontanoj emisiji. Zbog toga laser ima manju vremensku konstantu, daje snažniji optički signal sa užim frekventnim sadržajem, ali zbog impulsnog režima ima slabije pokazatelje pouzdanosti. Za praktičnu primenu u tehnici senzora povoljnije su, ipak, LED-diode zbog linearnej karakteristike.

Poželjno je da svetlost koju zrače LED-diode i laserske diode bude koherentna, tj. odredene talasne dužine. Kao što je ranije napomenuto, LED-diode koje služe za indikaciju emituju najčešće zelenu, crvenu, žutu ili plavu svetlost. Postoje još kombinovane RGB (*red-green-blue*) diode, te ultraljubičaste i infracrvene. Na slici 13.12. prikazan je elektromagnetski spektar i podoblasti optičkog dela spektra od interesa u tehnici senzora. Treba napomenuti da su granice za podoblasti optičkog spektra, kao što su: ultravioletna (*UV*), blisko infracrveno, srednje (kratkotalasno)



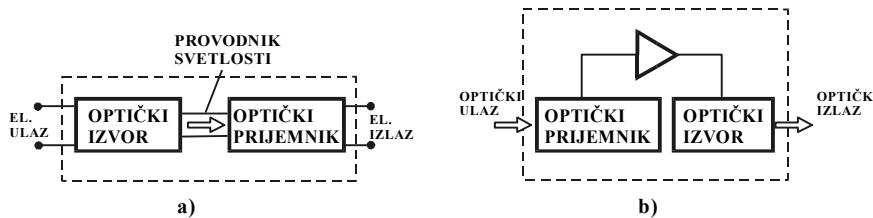
Slika 13.12. Spektar elektromagnetskog zračenja

infracrveno i slabo infracrveno, određene, na izvestan način, proizvoljno, odnosno u skladu sa praktičnim iskustvima i specifičnim aplikacijama optičkih senzora.

Optički parovi kao senzori sastoje se od tri dela: izvora, prijemnika optičkog zračenja i prenosnog medija. Između izvora i prijemnika veze mogu biti optičke ili električne.

Na slici 13.13a predstavljena je blok-struktura optičkog senzora čije su unutrašnje veze optičke, a vanjske električne. Na ulaz senzora dovodi se električni signal, koji pobuduje optički izvor. Optički signal dovodi se direktno ili pomoću optičkog vlakna do optičkog prijemnika, na čijem se izlazu generiše električni signal. Inače, ovakav optički par (*optocoupler*) ima široku primenu za galvansko razdvajanje električnih kola.

Optički senzor može biti realizovan sa vanjskim optičkim i unutrašnjim električnim vezama (slika 13.13b). U tom slučaju prijemnik optičkog signala pretvara ulazni optički signal u električni. Električni signal se pojačava i vodi na generator optičkog izlaznog signala. Ovakav optički par primenjuje se za kompenzaciju gubitaka u svetlosnim komunikacionim kablovima.



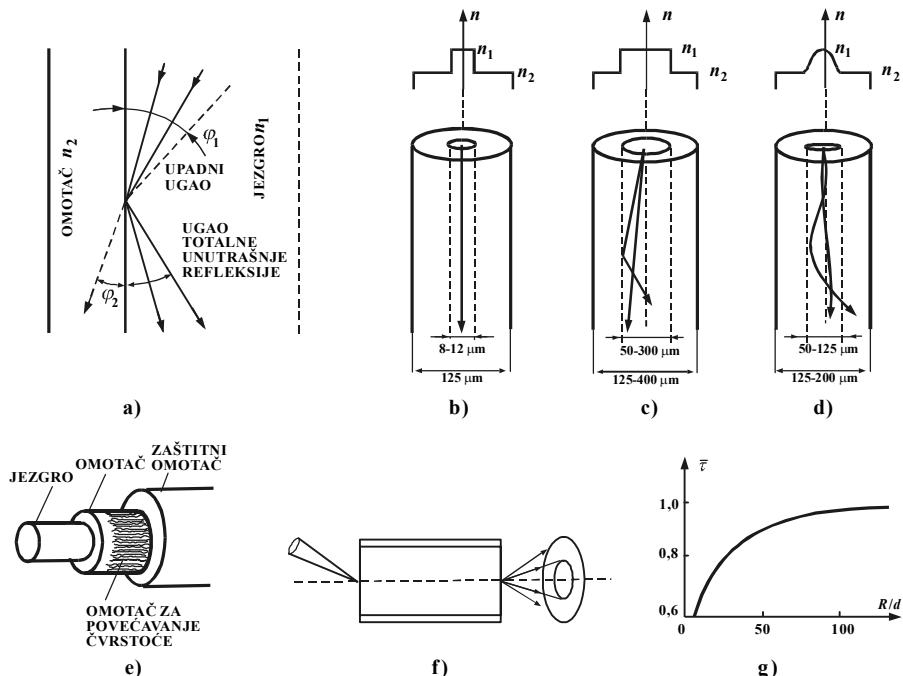
Slika 13.13. Struktura optičkog para: a) unutrašnje veze optičke, vanjske električne,
b) unutrašnje veze električne, vanjske optičke

Optičko vlakno kao senzor. Optička vlakna sve više se upotrebljavaju u sistemima komunikacija. Razlozi su sledeći:

- mali gubici u prenosu i mogućnost prenosa širokog opsega frekvencija;
- velika stabilnost parametara i neosetljivost na delovanje vanjskih smetnji kao što su: vлага, temperatura i hemijska agresija sredine;
- ne provode električnu struju, pa stoga nema pojave elektromagnetne indukcije i smetnji koje ona izaziva;
- izvanredna izolacija, pa su neosetljivi na delovanje razlike potencijala, što omogućava primenu u eksplozivno opasnom prostoru (svojstvo samosigurnosti);
- povoljne mehaničke osobine (tanki, laki i elastični);
- praktično neograničeni resursi materijala za proizvodnju.

Optičko vlakno je dielektrični provodnik svetlosti, napravljen od stakla ili akrilata. Sastoji se od jezgra i omotača, te elastičnog zaštitnog omotača (slika 13.16e). Tipične debljine jezgra su $8 - 250 \mu\text{m}$, a omotača $125 - 400 \mu\text{m}$. Kada svetlosni zrak dođe na graničnu površinu jezgro-omotač, jedan deo zraka se reflektuje, a drugi prolazi u omotač (slika 13.14a). Prelamanje svetlosti na granici dveju sredina opisuje Snelov zakon: $n_1 \sin \varphi_1 = n_2 \sin \varphi_2$. Sa smanjivanjem upadnog ugla φ_1 , ugao φ_2 teži nuli i za $\varphi_1 \leq \arcsin(n_2/n_1)$ svetlosni zrak ne prelazi u omotač već se u celosti reflektuje. Neophodan uslov je da indeks prelamanja svetlosti jezgra n_1 bude veći od indeksa prelamanja omotača: $n_1 > n_2$. Efekat totalne unutrašnje refleksije osnova je propagacije svetlosti kroz optičko vlakno. Konus sa prostornim uglom $2\varphi_a$ unutar kojeg je ispunjen uslov unutrašnje refleksije naziva se uglom apert ure.

Kroz vlakno svetlost se može prostirati na više načina (modova). Maksimalan



Slika 13.14. Optičko vlakno: a) totalna refleksija, b) monomodno vlakno sa stepenastom promenom indeksa prelamanja svetlosti, c) multimodno vlakno sa stepenastom promenom indeksa prelamanja, d) multimodno gradijentno vlakno, e) struktura vlakna, f) simetričacija snopa, g) provođenje svetlosti savijenog vlakna

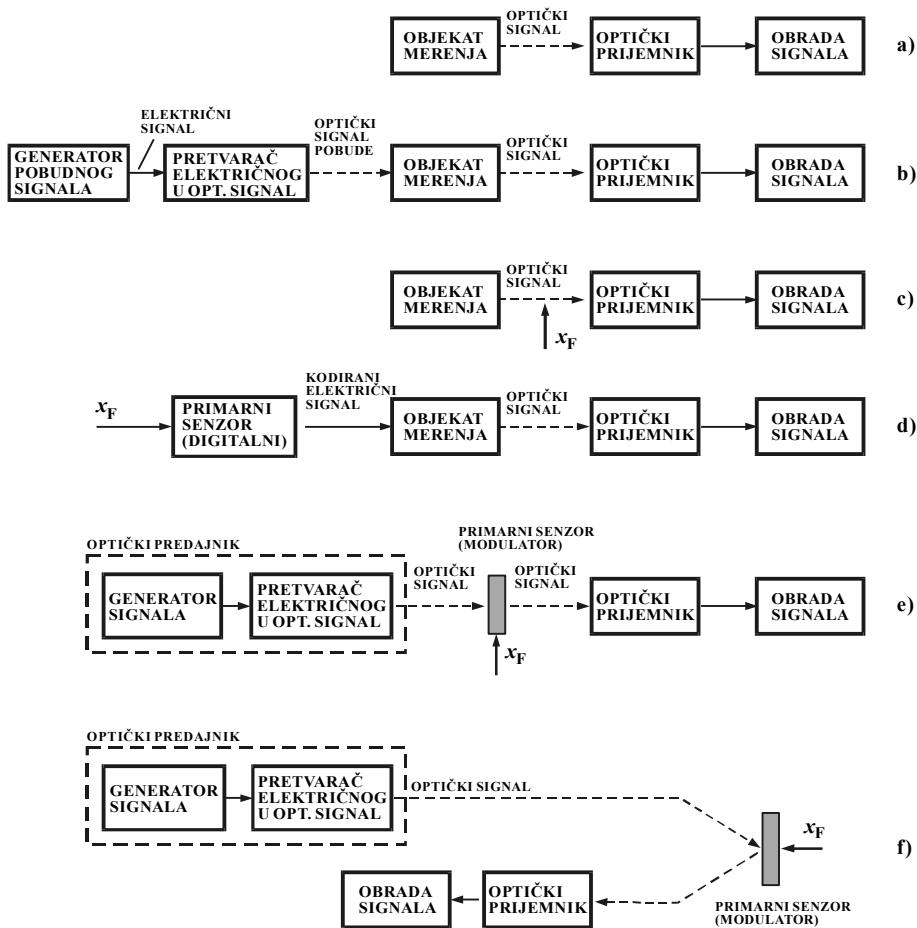
broj modova je $N = (d^2 \pi / 2 \lambda^2)(n_1^2 - n_2^2)$ gde su: d prečnik jezgra, λ talasna dužina svetlosti, n_1 i n_2 indeksi prelamanja svetlosti jezgra i omotača. Monomodna vlakna podržavaju prostiranje samo jednog – osnovnog moda. Takva vlakna imaju manji prečnik jezgra, a kao izvor svetlosti primenjuje se laserska dioda (slika 13.14b). Za multimodnu propagaciju svetlosti upotrebljavaju se vlakna sa većom debljinom jezgra ($50 - 300 \mu\text{m}$), a kao izvor svetlosti LD ili LED-dioda. Kada se svetlost sastoji, na primer, iz dva moda a i b (slika 13.14c), zrak a prolazi duži put od zraka b . To

dovodi do deformacije signala. Ona se smanjuje posebno profilisanom promenom indeksa loma svetlosti: maksimalna vrednost n_1 u osi jezgra opada parabolično do vrednosti n_2 na granici sa omotačem (slika 13.14d). To su tzv. gradijentna vlakna, sa prečnikom 50–125 μm i širokim frekventnim opsegom 100–1000 MHz (pri dužini vlakna od 1 km). Jednostavnija vlakna imaju stepenastu promenu indeksa prelamanja svetlosti (slika 13.14b,c), prečnik jezgra je veći (do 300 μm), ali je frekventna propusnost manja (20–25 MHz, pri dužini od 1 km).

Za primenu u tehnici senzora veoma važne osobine optičkog vlakna su simetrizacija svetlosnog snopa i usrednjavanje intenziteta svetlosti na izlazu iz vlakna, te zavisnost propusnosti svetlosti od ugnutosti vlakna. Simetrizacija svetlosnog snopa označava pojavu da uski konusni snop svetlosti koji pada na ulaz u optičko vlakno, na izlazu iz vlakna zauzima celi prostor, ograničen koaksijalnim konusnim površinama (slika 13.14f). Simetrizacija svetlosnog snopa unutar jezgra uzrokuje usrednjavanje raspodele svetlosti na izlazu i njegovu ravnometnu osvetljenost. Na slici 13.14g ilustrovano je važno svojstvo optičkog vlakna – provođenje svetlosti ($\bar{\tau} = \tau_R / \tau_{R=\infty}$) u vlaknu u zavisnosti od progiba vlakna R/d . Na slici se takođe vidi da za radijus progiba $R = 6 d$ provođenje svetlosti iznosi čak 60% u odnosu na nesavijeno vlakno.

Optička vlakna primenjuju se za gradnju senzora od 1977. godine. Zbog svojih dobrih karakteristika predstavljaju glavne elemente u specijalnim senzorima za praćenje akustičkih i magnetnih veličina, temperature, pritiska, brzine, ubrzanja itd. Senzori na bazi optičkog vlakna su interferometarski (merena fizikalna veličina izaziva interferencijske efekte) ili amplitudni (merena fizikalna veličina modulira intenzitet svetlosti). Za praktične potrebe prihvatljivija je podela prema načinu detekcije i merenju fizikalne veličine (slika 13.15):

- Neposredni prijem optičkog signala i njegov prenos optičkim vlaknom: fizikalna veličina meri se optičkim prijemnikom, a informacioni signal se dalje obrađuje u posebnim kolima (slika 13.15a);
- Detekcija na osnovu optičkih svojstava drugih materijala i prenos signala optičkim vlaknom: za merenje fizikalne veličine neophodno je optičko pobudivanje senzora (npr. luminiscentni senzor), a kao rezultat merenja dobije se optički signal, koji se prenosi optičkim vlaknom (slika 13.15b);
- Detekcija merene fizikalne veličine sa modulacijom parametara svetlosti u optičkom vlaknu – merena fizikalna veličina prvo se pretvara u neku pomoćnu veličinu, koja onda deluje na promenu parametara svetlosti u vlaknu (slika 13.15d). Ovaj način rada posebno je pogodan kada se primarna konverzija ostvaruje pomoću senzora sa električnim ili kodiranim izlaznim signalom;
- Primarni senzor može da deluje i kao direktni modulator intenziteta svetlosti (slika 13.15e) ili kao direktni modulator reflektovane svetlosti (slika 13.15f), i tada uvek postoji prijemno i odvodno optičko vlakno.



Slika 13.15. Senzori sa primenom optičkog vlakna: a) senzori sa direktnim prijemom optičkog signala, b) senzori sa optičkim pobudivanjem, c) senzori sa neposrednom modulacijom svetlosti u optičkom kablu, d) senzor sa pomoćnom konverzijom merene veličine, e) senzor sa pomoćnom konverzijom u funkciji modulacije intenziteta svetlosti, f) senzor sa pomoćnom konverzijom u funkciji modulacije refleksije svetlosti

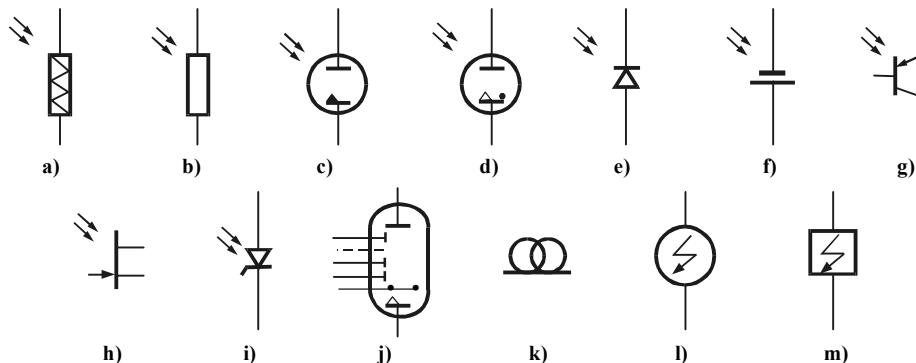
13.5. MERNE ŠEME SA OPTIČKIM SENZORIMA

13.5.1 Označavanje optičkih senzora

Na slici 13.16 prikazane su grafičke oznake za optoelektronske elemente koji se primenjuju u tehnici senzora:

- optoelektronski element u opštem slučaju (slika 13.16a);
- optički predajnik u opštem slučaju (slika 13.16f);

- optički prijemnik u opštem slučaju (slika 13.16m);
- pasivni optoelektronski elementi: fotootpornik (slika 13.16b), vakuumska fotoćelija (slika 13.16c), gasna fotoćelija (slika 13.16d), fotodioda (slika 13.16e), fototranzistor (slika 13.18.g), FET-fototranzistor (slika 13.16h), fototiristor (slika 13.16i), fotomultiplikator (slika 13.16j);
- aktivni optoelektronski elementi: fotonaponski element (slika 13.16f),
- optičko vlakno (slika 13.16k).



Slika 13.16. Označavanje optoelektronskih elemenata: a) opšta oznaka, b) fotootpornik, c) vakuumska fotoćelija, d) gasna fotoćelija, e) fotodioda, f) fotoelement, g) fototranzistor, h) FET-fototranzistor, i) fototiristor, j) fotomultiplikator, k) optičko vlakno, l) optički predajnik, m) optički prijemnik

13.5.2. Merne šeme sa optičkim prijemnicima

Šeme sa prijemnicima na bazi unutrašnjeg fotoefekta. Za optičke prijemnike sa unutrašnjim fotoefektom, tj. za fotootporne najčešće se primenjuju šeme sa otporničkim deliteljem (slika 13.17a) ili sa tranzistorom (slika 13.17b). Tipične vrednosti fotootpora u mraku su $10\text{ k}\Omega$ i $1\text{ M}\Omega$, a pri maksimalnom upadnom fluksu $50 - 100\text{ }\Omega$.

U šemi sa otporničkim deliteljem izlazni napon je

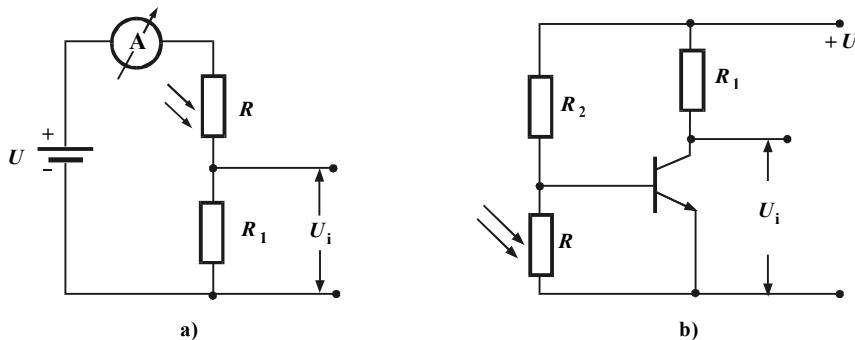
$$U_i = \frac{UR_1}{R + R_1} \quad (13.17)$$

i obrnuto je proporcionalan promeni fotootpora R . Međutim, kako veći upadni svetlosni fluks daje manji otpor R , to je izlazni napon direktno proporcionalan svetlosnom fluksu: $U_i = k\phi$, odnosno merenoj fizikalnoj veličini, koja je u vezi sa fluksom. Izlazni signal u šemi sa otporničkim senzorom može da bude i struja. Prethodna razmatranja naponskog izlaza važe i za strujni izlaz. Na naponsku osetljivost senzora $S_u = \Delta U_i / \Delta \phi$ utiče izbor delitelja, pa se zato osetljivost fotootporničkog senzora u šemi sa otporničkim deliteljem izražava kao strujna:

$$S_I = \Delta I_i / \Delta \phi [\text{A/lx}] . \quad (13.18)$$

Za referentni svetlosni izvor od $\phi = 50 \text{ lx}$ i napon napajanja od $U = 10 \text{ V}$ tipična osetljivost je $S_I = 10 \mu\text{A/lx} - 1 \text{ mA/lx}$.

Tranzistorska šema za detekciju promene otpora fotootpornika zasniva se na primeni otporničkog delitelja u bazi tranzistora. Izlazni signal je napon sa kolektora.

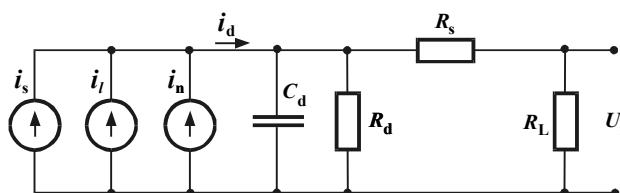


Slika 13.17. Šeme sa fotootpornikom: a) sa otporničkim deliteljem, b) sa tranzistorom

Merne šeme sa prijemnicima na bazi vanjskog fotoefekta. Optički prijemnici sa vanjskim fotoefektom su vakuumskе cevi. Fotokatoda generiše struju slobodnih elektrona proporcionalno delovanju svetla. Svetlosni fluks koji dolazi do optičkog prijemnika veoma je mali, pa je osnovni zadatak mernih uredaja da omoguće pojačanje izlaznog signala. Od optičkih prijemnika zahteva se visoka osetljivost, nizak šum, te vremenski i temperaturno stabilne karakteristike. Najpovoljnije osobine u navedenom pogledu imaju fotomultiplikatori, optički prijemnici koji vrše internu pojačanje fotostruje, dakle, pre nego što struja dode u vanjsko kolo. Njihovo glavno svojstvo je da imaju malu vremensku konstantu i stoga se primenjuju kao detektori impulsa svetlosti u subnanosekundnom području.

Merne šeme sa prijemnicima na bazi fotonaponskog i fotokonduktivnog efekta. Pojednostavljeno ekvivalentno kolo fotodiode prikazano je na slici 13.18. Fotodioda je u suštini generator struje I_d koja je suma senzorske fotostruje I_s , struje curenja I_l , i struje šuma I_n . Kapacitet diode C_d je kapacitet $p-n$ prelaza i on zavisi od širine ispraznjene zone, tj. od prednapona. Paralelni otpor fotodiode R_d je reda megaoma, a R_s je serijski otpor fotodiode. Statička karakteristika, tj. izlazni napon na opteretnom otporu R_L je:

$$U_i = (I_s + I_l + I_n) \cdot \frac{R_L R_d}{R_L + R_d + R_s}. \quad (13.19)$$



Slika 13.18. Ekvivalentna šema fotodiode

Kako je $R_d \gg R_s$, prethodna jednačina dobija jednostavniji oblik:

$$U_i = (I_s + I_l + I_n) \cdot \frac{R_L R_d}{R_L + R_d}. \quad (13.20)$$

Dinamička analiza fotodiode provodi se pomoću funkcije frekventnog odziva, koja se takođe dobija na osnovu ekvivalentnog kola:

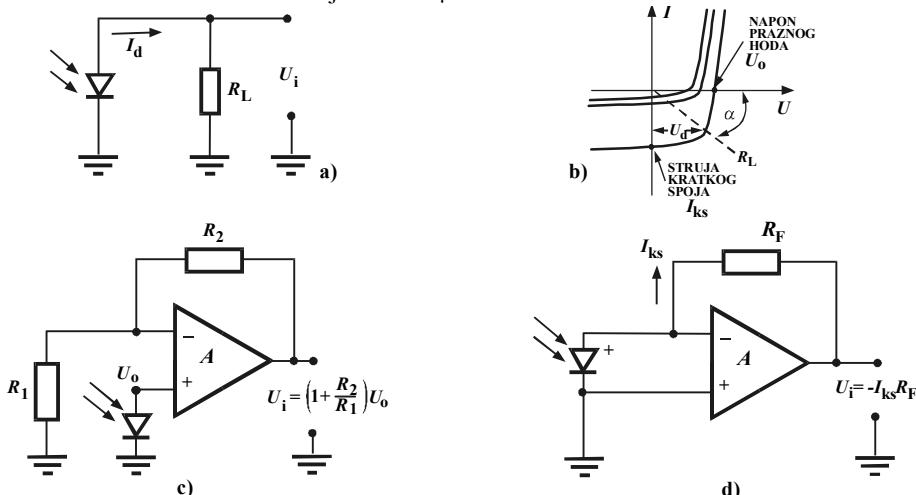
$$\frac{U_i(j\omega)}{I_d(j\omega)} = \frac{R}{1 + j\omega R C_d}, \quad (13.21)$$

gde je R paralelna veza R_d i R_L .

Kada fotodioda radi kao fotonaponski element, onda je $R_d \ll R_L$ i generisana fotostruja prolazi kroz R_d uzrokujući pojavu fotonapona $U_d = U_i$ (slika 13.19a). Vrednost R_d eksponencijalno raste sa porastom jačine upadne svetlosti, a fotonapon logaritamski. Karakteristike fotonaponskog elementa opterećenog sa R_L dobijaju se pomoću radne prave:

$$U_d = -R_L I_d. \quad (13.22)$$

Za velike vrednosti R_L prava se poklapa sa U osom ($\alpha = 0$), (slika 13.19b). U presečištim UI karakteristika i U ose dobijaju se tačke U_0 na osnovu kojih se crta logaritamska zavisnost generisanog napona od upadnog fluksa – što je veće R_L , zasićenje krive će se javljati pri manjem fluksu (osetljivost raste sa R_L). Ovaj način rada fotodiode (kao fotoelementa) označava se kao režim praznog hoda ili režim u otvorenom. Za merenje napona praznog hoda primenjuje se neinvertujući operacioni pojačavač (slika 13.19c). Pri skokovitoj promeni fotostruje, saglasno sa jednačinom (13.21), napon praznog hoda U_0 eksponencijalno će da raste sa vremenskom konstantom $T = R_L C_p$. Fotonaponski element ima spor odziv jer C_d raste sa pozitivnim prednaponom, a R_L ne može da se smanjuje jer se tada gubi na osetljivosti. Tipična vrednost vremenske konstante je oko $10 \mu\text{s}$.



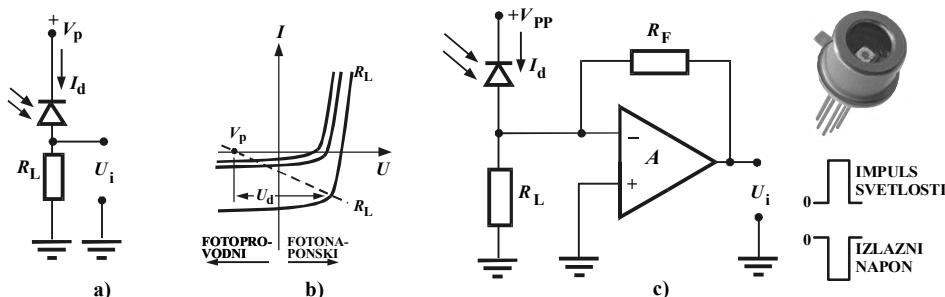
Slika 13.19. Fotodioda kao fotonaponski element: a) ekvivalentna šema, b) UI dijagrami, c) merenje napona praznog hoda, d) merenje struje kratkog spoja

Sa smanjenjem opterećenja R_L radna prava postaje sve strmija i na kraju se poklapa sa I osom ($\alpha = -90^\circ$). Ovaj način rada fotodiode označava se kao režim struje kratkog spoja. Zavisnost struje kratkog spoja I_{ks} od jačine upadne svetlosti je linearna, što se koristi za gradnju luksmetra (slika 13.19d). Da bi izlazni napon $U_i = -I_{ks}R_F$ bio pozitivan, dovoljno je da se dioda na posmatranoj šemi okrene.

Kada se fotonaponski element priključi na dovoljno veliki inverzni napon V_p , kroz osvetljeni $p-n$ prelaz teče struja koja je proporcionalna upadnom svetlosnom fluksu i nezavisna je od prednapona (slika 13.20a). Kao što je ranije istaknuto, ova pojava rezultat je fotoprovodnog efekta (slika 13.20b). Linija opterećenja je:

$$U_d = -I_d R_L - V_p . \quad (13.23)$$

Promena prednapona ne utiče na osetljivost jer je izlazni napon $U_i = -U_d R_L$. Međutim, veći prednapon V_p smanjuje kapacitet fotodiode C_d i njen odziv postaje brži. Za tipične vrednosti: $R_L = 50 \Omega$, i $C_p = 0.3 \text{ pF}$ vremenska konstanta ulaznog kola je $T = 0.05 \text{ ns}$, odnosno njegova gornja granična frekvencija je $\omega = 20 \text{ GHz}$. Zbog malih dimenzija, velike osetljivosti i brzine odziva, kao detektor kratkotrajnih impulsa svetlosti najviše se upotrebljavaju PIN-diode i APD-diode. PIN-diode imaju tri sloja: p -sloj, n -sloj i unutrašnji i -sloj (*intrinsic*). Prema nazivu slojeva izvedena je skraćenica za ove diode. Karakteristično je za PIN-diode da jedan foton proizvodi jedan par elektron-šupljina. Kod APD-dioda jedan foton proizvodi više parova elektron-šupljina, pa se zato i zovu lavinske fotodiode (*Avalanche Photodiodes*).



Slika 13.20. Fotodioda sa pretpolarizacijom: a) osnovna šema, režim kratkog spoja, b) statičke karakteristike, c) šema sa operacionim pojačavačem

Osnovni zadatak koji se postavlja prilikom projektovanja šeme sa fotodiodom je minimizacija šumova, tj. optimizacija odnosa signal/šum. Sa porastom prednapona raste struja curenja i šum postaje veći nego u fotonaponskom načinu rada. U šemi sa operacionim pojačavačem odnos signal/šum i osetljivost rastu proporcionalno sa R_f (slika 13.20c). Međutim, u pogledu izbora R_f postoje ograničenja zbog ograničenog dinamičkog opsega pojačavača ($\pm 15 \text{ V}$) i prisustva parazitnog kapaciteta ($C_p = 0.3 \text{ pF}$), koji je paralelan sa R_f . U vezi s tim postoje dva ograničenja:

$$R_f < 15/I_{\max} \quad \text{i} \quad R_f < 1/(\omega_g C_f) , \quad (13.24)$$

gde su: I_{\max} maksimalna struja u fotodiidi i ω_g gornja granična frekvencija opsega. Tipična vrednost je $R_f \approx 1 \text{ G}\Omega$, pri $\omega_g \approx 1 \text{ kHz}$. Na slici 13.22c prikazan je izgled PIN-diode sa ugrađenim pojačavačem.

13.5.3. Merne šeme sa optičkim izvorima

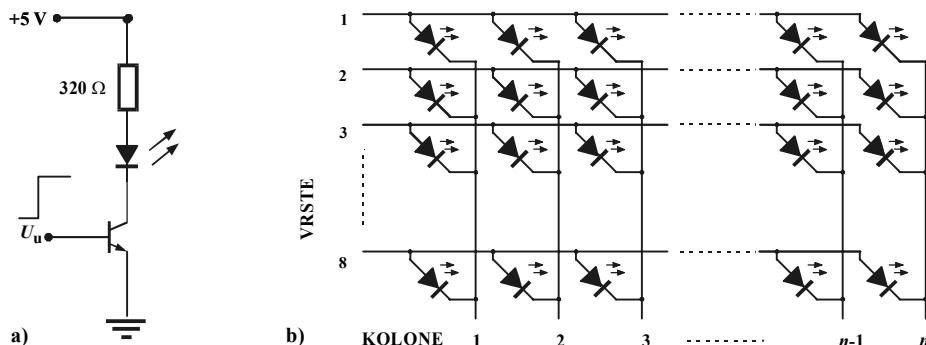
Šeme sa svetlećim diodama. Kao optički izvori u tehničkoj praksi najviše se primenjuju poluprovodničke LED-diode i LD-diode, kod kojih se direktna modulacija svetlosti postiže promenom upravljačke struje. Prilikom projektovanja šema polazi se od statičke karakteristike snaga optičkog izlaza – ulazna struja, koja je specificirana u dokumentaciji proizvodača.

Kada je LED-dioda propusno polarizovana, ona emituje svetlost. Tipična struja potrebna za rad diode je $I_{LED} = 4 - 100 \text{ mA}$, pad napona na diodi ΔU_{LED} je 1,8 V (za crvene) i 2,1 V (za zelene i žute), brzina prekidanja (prelaska iz jednog u drugo stanje) je 1 – 100 ns, aktivna površina zračenja oko $0,1 \text{ mm}^2$, ugao zračenja $\pm 15 - 100^\circ$, jačina emitovane svetlosti je 10 – 100 mcd (za supersjajne diode punjene helijumom i do nekoliko kandela). Veća struja I_{LED} daje veću izlaznu snagu zračenja. LED-dioda se priključuje na izvor preko zaštitnog otpornika koji ograničava jačinu struje na propisanu vrednost:

$$R = \frac{U - \Delta U_{LED}}{I_{LED}}. \quad (13.25)$$

Na slici 13.21a prikazan je tranzistorski drafver za LED diode. Ako je upravljački napon $U_u > 0$, tranzistor vodi i zaštitni otpornik treba da ima vrednost $R = 320 \Omega$ (pri $U = +5 \text{ V}$, $\Delta U_{LED} = 1,8 \text{ V}$, $I_{LED} = 10 \text{ mA}$). Jačina struje I_{LED} može biti i mnogo veća, ali tada dioda radi u impulsnom režimu sa tačno određenim odnosom signal/pauza. Srednja snaga zračenja u impulsnom režimu ne sme da bude veća od propisane snage za konstantnu jednosmernu struju.

LED-diode pogodne su za jednostavne svetlosne indikatore (slika 5.3), ali i za displeje sa velikim brojem LED-dioda tako da se može upisivati i prikazivati tekst, grafički simboli i animacije. U novije vreme upis podataka za prikazivanje obavlja se preko AT-PS/2 tastature i RF komunikacije (slika 5.4). Takav displej konstruiše se kao matrica sastavljena od niza clemenata formata 7×5 u kojoj su anode dioda vezane u 7 vrsta, a katode u n kolona (slika 13.21b). Osmi bit u drafveru vrsta je rezerva koja se može upotrebiti za latinična slova sa dijakritičkim znacima ili za proširivanje prostora za grafičke prikaze. Pobuda displeja ostvaruje se pomoću



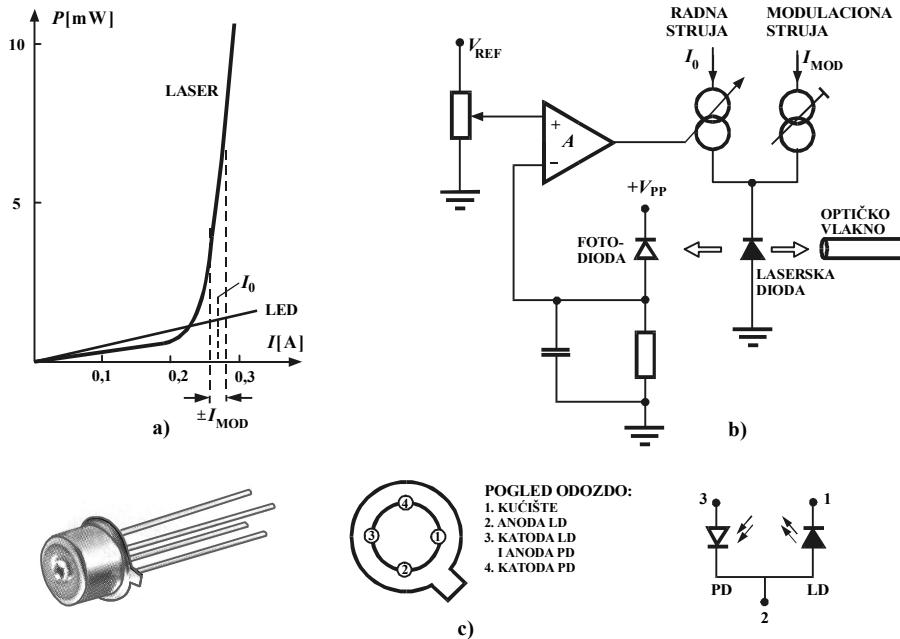
Slika 13.21. LED dioda: a) tranzistorski drafver, b) matrica LED-disплеја

drajvera vrsta i drajvera kolona. Svaka poruka, tekst ili grafički prikaz, sastoji se od n bajtova koji se redom, jedan po jedan, upisuju u drajver vrsta, a zatim se aktiviraju pomoću drajvera kolona. Drajveri primaju podatak od mikrokontrolera u serijskom obliku i pretvaraju ga u 8-bitni paralelni.

Šeme sa laserskim diodama. Svojstvo laserskih dioda je da svetlost nastaje spontanom emisijom kada je direktna struja manja od struje praga. Tada se laserska dioda ponaša kao obična LED-diода, kao što je prikazano na statičkoj karakteristici (slika 13.22a). Međutim, kada direktna struja postane veća od struje praga (tačka loma na karakteristici), dolazi do stimulisanog zračenja, za koje je karakteristično sužavanje po spektru i po prostornom uglu. Tipična vrednost struje praga $I_{th} \approx 0,2 \text{ A}$. Da bi dioda radila kao laser, direktna (radna) struja mora biti veća od struje praga, ali manja od maksimalno dozvoljene $I_{max} = I_{th} + \Delta$.

Direktna modulacija izlazne svetlosti ima izvesnih ograničenja. Prvo ograničenje je termičke prirode. Naime, struja praga raste sa porastom temperature, pa je potrebna sve veća direktna struja ili hlađenje da bi laser radio kontinualno. Drugo ograničenje odnosi se na više nivoe srednje snage optičkog izlaza, kada se zbog modulacije javljaju opasni vrhovi snage (uvck treba da je $P < P_{max}$). Treće ograničenje odnosi se na pojavu kašnjenja. Kada je direktna struja veća od struje praga, do emisije svetlosti ne dolazi odmah, već sa kašnjenjem od nekoliko nanosekundi. Postoji više metoda direktne modulacije poluprovodničkih izvora svetlosti čiji je osnovni cilj da se umanje efekti navedenih ograničenja.

Metod srednje snage podrazumeva održavanje konstantne vrednosti srednje izlazne snage po principu kompenzacije (slika 13.22b). U povratnoj sprezi

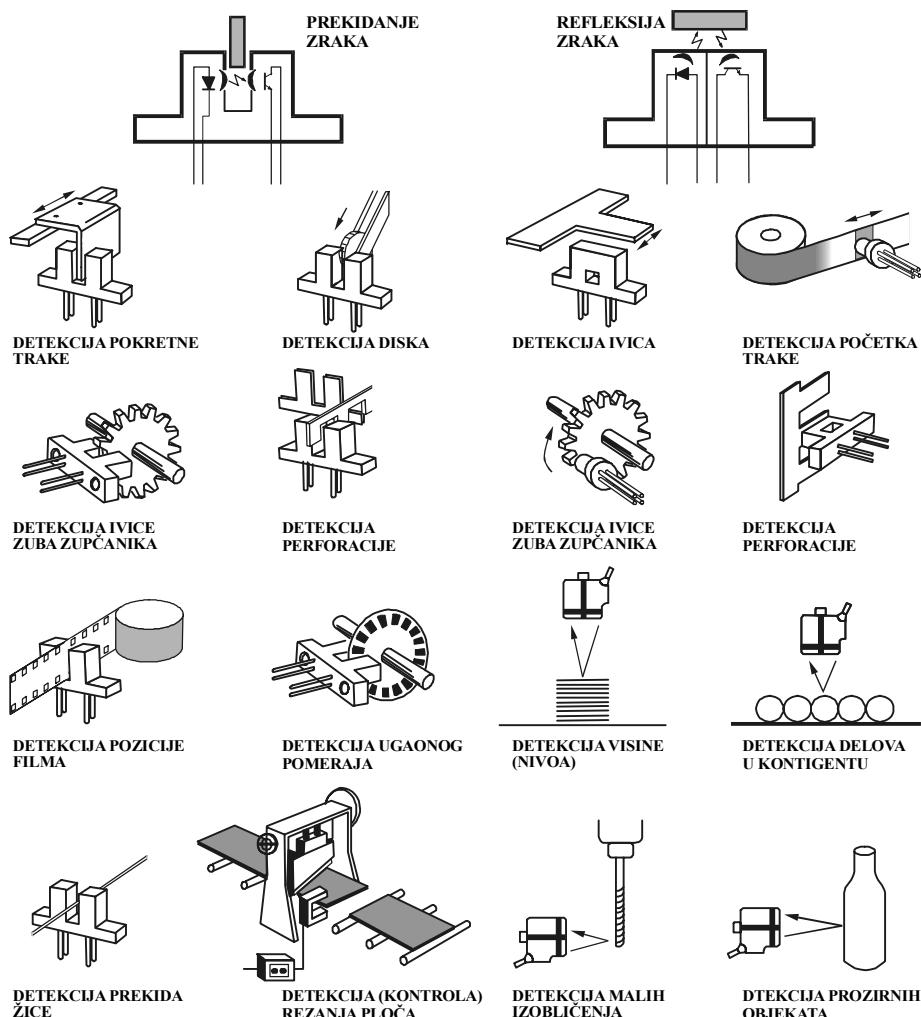


Slika 13.22. Priključivanje laserske diode: a) statička karakteristika laserske diode, b) stabilizacija radne tačke metodom kompenzacije srednje snage, c) LD čip

operacionog pojačavača je fotodioda pomoću koje se prati zračenje lasera, a nisko-propusni filter daje srednju vrednost tog zračenja. Na potenciometru je postavljena zadana vrednost srednje snage. Izlaz iz pojačavača proporcionalan je razlici zadane i aktuelne vrednosti srednje snage i deluje na generator I_0 u smislu smanjivanja te razlike. Laserska dioda isporučuje se se kao čip sa ugrađenom fotodiodom za monitoring (slika 13.22c).

13.5.4. Merne šeme sa optičkim parovima

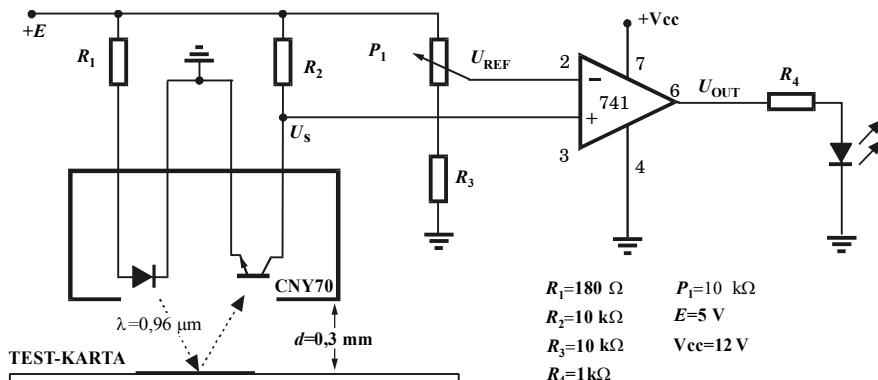
Na slici 13.23 prikazane su tipične primene optičkih senzora na bazi LED-dioda kao predajnika i fototranzistora kao optičkog prijemnika. Radni predmet



Slika 13.23. Primene optokaplera sa prekidanjem i refleksijom zraka

detektuje se prekidanjem ili refleksijom optičkog signala. Senzor radi kao prekidač jer je njegov izlaz logičko jedan ili logičko nula, zavisno od blizine objekta. Zato se ovi senzori zovu prekidački ili proksimiti senzori. Svetlost se obično ne emituje kontinualno već u impulsima velike snage, ali tako da je srednja snaga impulsa u granicama dozvoljenog opsega koji se definiše za kontinualni rad. Na taj način postiže se veći put od predajnika do prijemnika. Za LED diodu ovaj put je ograničen na nekoliko metara, a za LD diodu iznosi više desetina metara.

Na slici 13.24 prikazana je šema jednostavnog optoelektronskog proksimiti senzora sa refleksijom za detekciju crnih tačaka na beloj podlozi. Osnova je optokapler sa LED-diodom kao predajnikom i fototranzistorom kao prijemnikom smeštenim u standardno dvoredno kućište. Kada je dioda propusno polarizovana, ona emituje svetlost koja pada na bazu fototranzistora i modulira intenzitet struje između kolektora i emitera. Ako je senzor iznad crne podloge, nema refleksije svetlosti, tranzistor je zakočen i na kolektoru je napon $U_{S1} = E$. Ukoliko je senzor iznad bele podloge, sa nje se reflektuje svetlost na bazu fototranzistora, tranzistor vodi i na kolektoru je napon $U_{S2} < E$. Potenciometrom P_1 podešen je napon na invertujućem ulazu jednostrano napajanog komparatora na vrednost $U_{REF} = (U_{S1} + U_{S2})/2$. Prema tome, kada je senzor iznad crne podloge ($U_{S1} > U_{REF}$), izlaz operacionog pojačavača je u zasićenju $U_{OUT} = U_{ZAS}$ i LED-diода svetli. Kada je senzor iznad bele podloge ($U_{S2} < U_{REF}$), izlaz pojačavča je na masi LED-dioda ne svetli.



Slika 13.24. Optoelektronski proksimiti senzor na bazi refleksivnog optokaplera

13.5.5. Priključivanje optičkog vlakna

Važna etapa u primeni optičkih izvora tipa LED-dioda i LD-dioda je njihovo povezivanje sa optičkim vlaknom radi slanja optičkog signala do prijemnika. Površina sa koje LD zrači svetlost eliptične je forme, približnih razmera $0,5 \times 10 \text{ mm}$ i uglom usmerenosti oko 10° . Pri tome, svetlost izvan konusa određenog sa prostornim uglom $2\varphi_a$ ne prostire se kroz vlakno jer nisu ispunjeni uslovi totalne unutrašnje refleksije na granici jezgro-omotač. Kao mera sposobnosti vlakna da primi svetlost iz izvora uzima se $\sin \varphi_a$ i označava numeričkom aperturom (otvorenosću). Za vlakno sa stepenastim profilom indeksa prelamanja numerička apertura je:

$$NA = \sin \varphi_a = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}, \quad (13.26)$$

a za gradijentna vlakna je

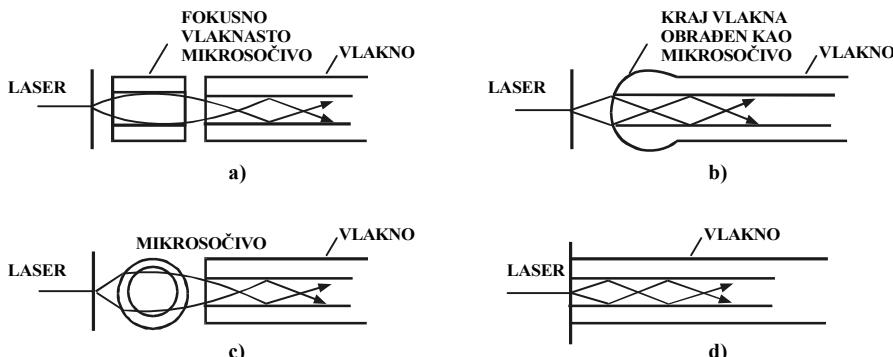
$$NA = \sin \varphi_a = n_1 [2(n_1^2 - n_2^2)/n_1]^{1/2}. \quad (13.27)$$

Numerička apertura je veoma važan parametar jer od njega zavisi snaga koju izvor može predati vlaknu:

$$P = (\pi^2 d_i^2 / 4) R_a (NA)^2 \quad \text{za} \quad d_i \leq d \quad (13.28)$$

$$P = (\pi^2 d^2 / 4) R_a (NA)^2 \quad \text{za} \quad d_i > d, \quad (13.29)$$

gde su d_i ekvivalentni prečnik izvora, d prečnik jezgra i R_a intenzitet zračenja na osi izvora.



Slika 13.25. Priklučivanje optičkog vlakna i laserskog izvora svetlosti: a) vlaknasto mikrosočivo, b) stopljeni kraj vlakna kao mikrosočivo, c) mikrosočivo od komadića vlakna, d) direktno priključivanje

Tipična vrednost numeričke aperture je 0,3–0,4 za vlakna sa stepenastim profilom indeksa prelamanja svetlosti, 0,2 za gradijentna vlakna i 0,1 za monomodna. Zbog toga je potrebno prilikom priključivanja ovih izvora na optičko vlakno obezbediti odgovarajuće fokusiranje svetlosnog zraka. Na slici 13.25 prikazani su najčešće primenjivani metodi priključivanja, koji se razlikuju po koeficijentu veze. Za optička vlakna najpogodniji su izvori svetlosti talasnih dužina 0,85–1,3 μm.

PITANJA I ZADACI

- 1) Navesti glavne osobine optoelektronskih modulatora i deflektora optičkog signala.
- 2) Objasniti specifičnost tehničkih karakteristika optičkih senzora.
- 3) Pokazati kako bi se pomoću optičkog para predajnik-prijemnik mogao napraviti senzor broja obrtaja neke osovine. (Pogledati jedno praktično rešenje na strani 293.)

- 4) Kako se primjenjuje optičko vlakno u gradnji senzora?
- 5) Objasniti stabilizaciju radne tačke laserske diode pomoću kompenzacije srednje vrednosti izlazne snage.

LITERATURA

1. D. Milatović: *Optoelektronika*, Svjetlost, Sarajevo, 1987.
2. A. Marinčić: *Osnovi optoelektronskih telekomunikacija*, Gradevinska knjiga, Beograd, 1986.
3. M. Cvijetić: *Digitalne svjetlosne telekomunikacije*, Vojnoizdavački i novinski centar, Beograd, 1988.
4. N.E. Konjuhov: *Optoelektronnye izmeritel'nye preobrazovateli*, Energija, Lenjingrad, 1977.
5. *Fiber optic electronic control*, Dolan-Jenner Industries, Catalogue LP 404C, Woburn, USA
6. *Photo microsensors*, Omron Co, Cat. No. X36-E1-3, Japan
7. *Photoelectric switches*, Omron Co. Cat. No. E10-E1-1, Cat. No. X15-E1-5, Japan
8. *Intelligent opto sensor*, data book, Texas Instruments, 1995.
9. N. Kako, J. Jamanc: *Datčiki i mikro-EVM* (prev. sa japanskog), Energoatomizdat, Lenjingrad, 1986.
10. C.P. Sandbank: *Optical fibre communication systems*, John Wiley & Sons, New York, 1980.
11. L.J. Pinson: *Robot vision: an evalution of imaging sensors*, u knjizi „*Robot sensors*“, Vol.1 -Vision (edited by A. Pugh, IFS publications Ltd), Springer-Verlag, Berlin, 1986.
12. *Optičeskaja svjaz'* (red. Kamide Masahide), prev. sa japanskog, Mir, Moskva, 1984.
13. *Principi rada optoelektronskih elemenata*: http://www.sensorsmag.com/resources/lit_show/,
<http://www.siliconsensors.com/PB.html#Introduction>
14. *Optomehanički i optoelektronski elementi*: <http://www.thorlabs.com>, <http://www.lasermathe.com>,
<http://www.etgtech.com/welcome.html>

14

DIGITALNI SENZORI

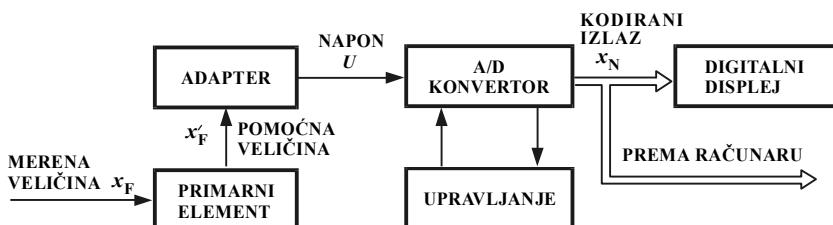
14.1. PRINCIP RADA

14.1.1. Struktura digitalnih senzora

Primena savremenih automatizovanih sistema u upravljanju proizvodnjom, komunikacijama i složenim dinamičkim objektima postavlja pred nauku o merenjima nove zadatke. Jednim delom ovi zadaci odnose se na traženje novih metoda za povećanje tačnosti, osetljivosti i brzine odziva senzora, a drugim delom na automatizaciju procesa merenja. Napor su usmereni na realizaciju takvih akvizicionih i marnih sistema za automatsko merenje reguliranih veličina, gde su rezultati merenja kodirani signali pogodni za neposredno uvođenje u digitalni sistem upravljanja. Ovi zahtevi uspešno se rešavaju pomoću digitalnih senzora. Pod digitalnim senzorom podrazumeva se merni uredaj koji konvertuje merenu analognu veličinu x_F u digitalni izlazni signal x_N . Gradi se na bazi mikrokontrolera, što omogućava visok metrološki kvalitet i značajnu obradu merne informacije i pre njenog uvođenja u sistem upravljanja.

Između digitalnih i analognih senzora postoje suštinske razlike u pogledu izrade, karakteristika i primene. Osnovni nedostaci analognih senzora su: nemogućnost prenosa analognog izlaznog signala na veće udaljenosti, osetljivost izlaznog signala na delovanje šumova, poteškoće u pogledu priključivanja na računar, nestabilnost statičkih i dinamičkih karakteristika itd. Digitalni senzori omogućavaju da se ovi nedostaci prevaziđu ili da su izraženi u manjoj meri.

Elementi strukture. U strukturi digitalnih senzora uočava se nekoliko tipičnih delova (slika 14.1). Primarni element je senzor u užem smislu. On konverte rje merenu analognu fizikalnu veličinu $x_F(t)$ u neku drugu, takođe analognu veličinu $x_{F'}$, koja je pogodnija za dalju konverziju. Naredni blok je sekundarni element ili adapter, čija je namena da pomoću veličinu $x_{F'}$ pretvoriti u naponski signal $u(t)$. Primarni element sa adapterom u suštini je analogni senzor, sa direktnom ili



Slika 14.1. Opšta strukturalna blok-šema digitalnog senzora

kompenzacionom struktrom. U adapteru se vrši osnovna obrada signala iz primarnog elementa: pojačavanje, filtriranje, impedantno prilagođavanje, kompenzacija, korekcija nelinearnosti i dr. Kod digitalnih senzora direktnog tipa ovog elementa najčešće nema.

Analogno-digitalni (A/D) konvertor je elektronski sklop koji analogni napon pretvara u digitalni oblik. Ovo pretvaranje karakterišu dva usko povezana procesa:

- uzorkovanje analognog napona $u(t)$ u diskretnim intervalima vremena (kvantizacija po vremenu)
- zaokruživanje uzorkovane vrednosti na jednu od vrednosti ranije utvrđene fiksne skale (kvantizacija po amplitudi).

Okončanjem kvantovanja po vremenu i kvantovanja po amplitudi još uvek se ne dobija brojna vrednost merene veličine. Da bi se dobio rezultat merenja, potrebno je kodirati fiksiranu vrednost dobijenu kvantovanjem po amplitudi. Operacije kvantovanja po amplitudi i kodiranja mogu se izvoditi i istovremeno. Kao rezultat kodiranja dobija se niz digitaliziranih impulsa. Kodiranje se izvodi primenom impulsno-kodne (PCM) modulacije.

Kodirani izlaz iz A/D konvertora vodi se na ulaz mikrokontrolerske upravljačke strukture ili na digitalni displej. Upravljački blok (kontroler) je samostalan, a može se tretirati i kao sastavni deo A/D pretvarača. Pomoću njega vrši se uključivanje i isključivanje senzora, određuje se brzina merenja, generiše se program za kodiranje i ostvaruju kontrolne funkcije celokupnog rada. Primarni i sekundarni blok zajedno sa A/D konvertorom određuju sve najvažnije osobine merenja i konverzije fizikalne veličine x_F u digitalno kodirani signal x_N . Displej i upravljački blok određuju eksplatacione mogućnosti senzora i ne utiču na rezultat konverzije.

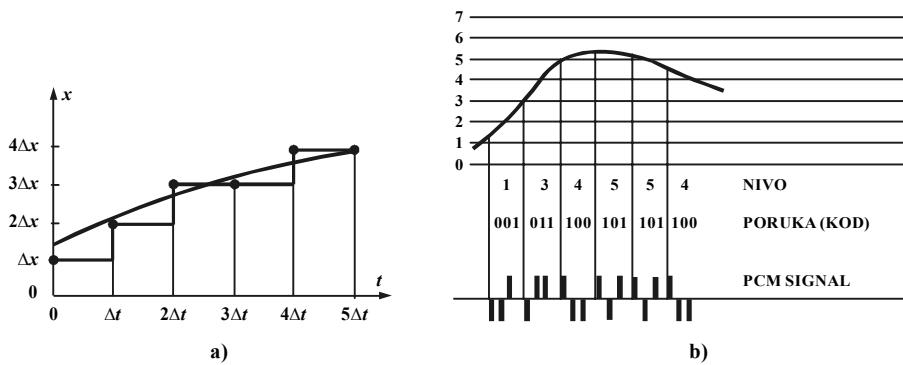
Direktni digitalni senzor. Digitalni senzori mogu biti direktni ili kompenzacioni. Direkti meri fizikalnu veličinu i tokom mernog procesa proizvodi paralelni binarni ili BCD (binarno kodirani decimalni) izlaz). Merena veličina pretvara se direktno u kôd pomoću enkodera, koji se najčešće realizuje kao kružna ili linijska kodna maska. Enkoderi, zapravo, mere pomak, ali se primenom odgovarajućih analognih senzora pomak može dovesti u vezu sa silom, pritiskom, nivoom, itd.

Direktni digitalni senzor je idealan senzor za povezivanje sa računarcem, jer je merna informacija predstavljena kao digitalni kôd koji ne zahteva dalje procesiranje. Direktni digitalni senzor koji nema kodnu masku na svom izlazu proizvodi niz impulsa. Izmerena veličina kodirana je vremenskim razmakom između njih ili odnosom signal/pauza. Ovakav niz impulsa je samo donekle kompatibilan sa računarcem. Računar broji impulse i određuje vremenske periode impulsa da bi se izdvajala vrednost merene fizikalne veličine. Prema tome, prilikom povezivanja direktnih digitalnih senzora bez kodne maske mora se predvideti odgovarajuće procesiranje signala.

Digitalni senzori kompenzacionog tipa. Ovi senzori neprekidno porede merenu i kompenzacionu vrednost sve dok se ne postigne njihovo izjednačavanje. U suštini, to su automatski komparatori, koji u direktnoj grani imaju A/D, a u povratnoj grani D/A konvertor. Moguća je i kompenzacija u otvorenom., tada se kompenzacioni signal generiše ciklički pomoću posebnog programa.

14.1.2. Digitalizacija merene analogne veličine

Principi diskretizacije. Rad digitalnih senzora zasniva se na primeni PCM-modulacije (Pulse-Code Modulation). Postupak PCM-modulacije svodi se na uzimanje uzorka i kodiranje. U diskretnim vremenskim intervalima Δt mere se diskretne vrednosti x_1, x_2, \dots, x_n analogne veličine $x(t)$ (slika 14.2a). Da bi se ovo ostvarilo, kontinualni signal $x(t)$ prolazi kroz niskopropusni filter i realni prekidač (sample-and-hold kolo). Prema tome, kao rezultat kvantovanja dobijaju se vrednosti $x(k\Delta t)$ u tačkama $k\Delta t$, ($k = 1, 2, \dots, n$). Za predviđeni opseg merenog signala ove vrednosti fiksirane su na određenim rastojanjima i označavaju se kao nivoi kvantovanja. Rastojanja između nivoa kvantovanja obično su jednaka (ravnomerna diskretizacija). Da bi se povećala tačnost sa kojom diskretne vrednosti zamjenjuju stvarne vrednosti merene veličine, primenjuje se adaptivna diskretizacija sa promenljivim korakom diskretizacije.



Slika 14.2. Princip rada digitalnog senzora: a) uzorkovanje u vremenu i diskretizacija po amplitudi, b) impulsno-kodna modulacija PCM

Vrednost uzorka u svakoj tački $k\Delta t$ zaokružuje se na najbliži nivo kvantovanja. Ovako dobijen signal je, dakle, diskretizovan i po vremenu i po nivou. Nakon toga signal ide u koder, koji kvantovane uzorke pretvara u diskretne kodne reči, na primer, binarne – po jedna reč za svaki uzorak. Rezultat je impulsno-kodno modulisani signal PCM (slika 14.2b).

Najmanja razlika između dva suksesivna nivoa kvantovanja:

$$\Delta x = (x_i - x_{i-1})_{\min}, \quad (14.1)$$

naziva se stepen (korak) kvantovanja. Što god je stepen kvantovanja Δx manji, razlika između analogne i digitalne vrednosti biće manja. Najmanja vrednost Δx , međutim, limitirana je pragom osjetljivosti senzora.

Frekvencija uzimanja uzorka, saglasno Šenonovoj teoremi, mora da je bar dvostruko veća od najveće frekvencije koja se pojavljuje u analognom signalu: $f \geq 2f_{\max}$. Odатле je izvedeno ograničenje za vremenski interval uzorkovanja Δt :

$$\Delta t \leq 1/(2f_{\max}). \quad (14.2)$$

Izbor stepena kvantovanja po amplitudi Δx i intervala uzorkovanja Δt značajna je etapa projektovanja digitalnih senzora, jer direktno utiče na statičke i dinamičke karakteristike senzora.

Digitalizacija vremensko-impulsnog tipa. Kod vremensko-impulsnih senzora mereni signal najpre se pretvara u vremenski interval kome se onda pridružuje određena kodirana vrednost. Izmerena vrednost napona U_x , obično skalirana na 0–5 V, pretvara se u interval vremena T_x koji je proporcionalan U_x . Ovaj proces odvija se tako što u trenutku t_0 iz posebnog generatora startuje pilasti napon $U=kt$, koji se poredi sa U_x . Postupak je završen kada komparator ustanovi jednakost:

$$U = kT_x = U_x . \quad (14.3)$$

Istovremeno, u trenutku t_0 poseban brojač počinje da broji impulse visoke i stabilne frekvencije $f_c = 1/T_c$, koji se generišu u klok generatoru. Brojanje impulsa zavisi od primjenjenog digitalnog kôda, a traje sve dok se ne uspostavi jednakost (14.3). Rezultat se pamti kao paralelna kodna kombinacija. Radi prenosa po kanalu veze, paralelni kôd pretvara se u serijski. Minimalno vreme potrebno za konverziju i prenos kodne kombinacije vremensko-impulsnom metodom je:

$$T_k = T_x + T_{pr} , \quad (14.4)$$

gde je T_{pr} vreme potrebno za očitanje kôda sa brojača i prenos po kanalu veze. Vreme T_x ograničeno je brzinom konverzionog procesa $U_x - T_x$, brzinom rada komparatora, te brzinom brojanja impulsa na brojaču. Vreme T_{pr} najviše je ograničeno frekventnim opsegom kanala veze, tako da je:

$$T_{pr} \geq n/(\Delta f) , \quad (14.5)$$

gde je Δf frekventni opseg kanala veze, a n broj cifarskih mesta koda.

Digitalizacija frekventno-impulsnog tipa. Kod senzora sa ovim načinom rada merena veličina x_F pretvara se u sinusni ili impulsni signal frekvencije f , koja je proporcionalna x_F , tj. $f=kx_F$. Frekvencija f određuje se brojanjem perioda takо generisanog frekventnog signala u toku fiksiranog vremenskog perioda T_0 . Tip brojača, kao i kod vremensko-impulsnih senzora, zavisi od primjenjenog kôda. Minimalno vreme potrebno za konverziju i prenos kodne kombinacije frekventno-impulsnom metodom je:

$$T_k = T_0 + T_{pr} , \quad (14.6)$$

gde je T_{pr} vreme potrebno za očitavanje kôda sa brojača i prenos po kanalu veze. Tačnost merenja opisanim frekventno-impulsnim metodom analogno-digitalne konverzije zavisi od linearnosti i stabilnosti pretvaranja ulazne veličine x_F u frekvenciju, te od greške kvantovanja, te od stabilnosti fiksног vremenskog perioda T_0 .

Digitalni senzori sa kvantovanjem prostornih parametara rade na principu pretvaranja merene veličine u proporcionalni ugaoni ili linearni pomak kodne maske. Kodna maska pomera se u odnosu na uređaj za čitanje kôda, tako da svakom položaju odgovara jedinstvena kodna kombinacija. Ovaj metod pogodan je za gradnju

digitalnih senzora onih neelektričnih veličina, koje se prvo pretvaraju u linearni ili ugaoni pomak.

Važno je napomenuti da kodna maska može biti nosilac bilo kojeg kôda. Osim toga, ovakvi senzori (apsolutni enkoderi) spremni su za rad odmah nakon uključivanja napajanja.

14.2. KARAKTERISTIKE DIGITALNIH SENZORA

14.2.1. Statičke karakteristike

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

$$x_{Ni} = i \cdot \Delta x \approx x_i; \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (14.7)$$

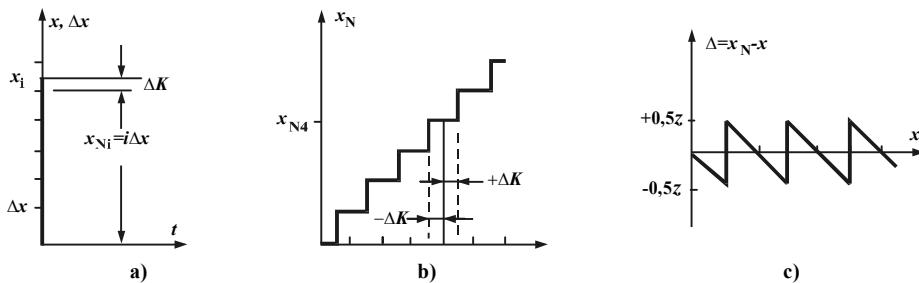
Samo u posebnom slučaju je $x_{Ni} = x_i$, jer zbog prirode procesa kvantovanja svakoj merenoj vrednosti iz intervala $[x_i - \Delta x, x_i + \Delta x]$ odgovara isti digitalni izlaz x_{Ni} . Zaokruživanje se vrši na bližu granicu intervala, tj. na bliži nivo kvantovanja (slika 14.3a). Time se čini greška:

$$\Delta K = |x_{Ni} - x_i|, \quad (14.8)$$

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

$$x_{Ni} = x_i \pm \Delta K_i; \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (14.9)$$

Statička karakteristika crta se tako da nivoi kvantovanja budu na granici ili u sredini intervala kvantovanja. Tako dobijena digitalno-analogna statička karakteristika ima izgled stepeničaste krive (slika 14.3b). U prvom slučaju greška kvantovanja je po apsolutnoj vrednosti jednaka koraku kvantovanja, a u drugom slučaju polovini koraka kvantovanja. Iz statičke karakteristike lako se dobija dijagram greške (slika 14.3c).



Slika 14.3. Statička karakteristika: a) greška kvantovanja, b) realna statička karakteristika, c) dijagrame greške

Rezolucija (sposobnost razlučivanja) digitalnih senzora je najmanja merljiva vrednost ulaznog signala koja može da izazove promenu indikacije na izlazu. Za malu promenu ulazne veličine izlazni signal nalazi se u intervalu $x_i \pm \Delta x$, što znači da je rezolucija jednaka $2\Delta x$.

Pomoću definicije rezolucije određuje se ukupni broj delova kontinualne ulazne veličine koji digitalni senzor može da razlikuje:

$$N_{\max} = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2\Delta x}. \quad (14.10)$$

Ukoliko se u obzir uzme i nulta vrednost ulaznog signala, onda prethodnom izrazu za ukupni broj delova koje senzor razlikuje treba dodati jedinicu.

Tokom konverzije analognog signala u digitalni izlazni signal broju N se pridružuje odgovarajući kôd. Na primer, za decimalni sistem je $N=10^n$, gde je n broj desetičnih mesta. Pošto je u praktičnim realizacijama najčešće $x_{\min}=0$, broj različitih decimalnih delova je:

$$N = x_{\max}/(2\Delta x). \quad (14.11)$$

Vrednost podeoka na izlazu određuje se kao:

$$z = x_{\max}/N = x_{\max}/10^n, \quad (14.12)$$

a jednaka je vrednosti najnižeg cifarskog mesta.

Tačnost statičke karakteristike. Usled delovanja okoline, načina rada, nesavršenosti i starenja sastavnih delova, statička karakteristika nije idealna. Ukupna greška je suma sistematske greške Δs i greške kvantovanja ΔK :

$$\Delta = \Delta s + \Delta K. \quad (14.13)$$

Sistematska greška dovodi do pomeranja statičke karakteristike i dijagrama greške duž ordinate. Zahtev je da ukupna greška na celom opsegu ne bude veća od vrednosti podeoka z . Međutim, zbog navedenih uticaja, slično kao i kod analognih senzora, dolazi do: skokovitih promena na pojedinim delovima statičke karakteristike, drifta nule, histerezisa, nestabilnosti pokazivanja ili promene u nagibu statičke karakteristike.

14.2.2. Dinamičke karakteristike

Dinamičke karakteristike su osobine digitalnog senzora koje se ispoljavaju prilikom pretvaranja merene veličine promenljive u vremenu.

Dinamička greška. Digitalni senzor radi tako što se u trenutku $t=t_1$ fiksira vrednost $x(t_1)$. Vremenski interval potreban da se fiksirana vrednost ulaza indicira na izlazu je vreme pretvaranja t_p . Na kraju tog vremena merena veličina ima vrednost

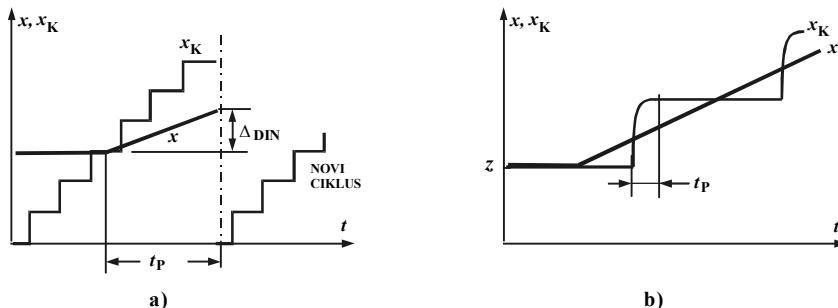
$x(t_1 + t_p)$, koja se, u opštem slučaju, razlikuje od vrednosti na početku pretvaranja $x(t_1)$. Razlika između ove dve vrednosti označava se kao dinamička greška:

$$\Delta_{\text{din}} = x(t_1 + t_p) - x(t_1). \quad (14.14)$$

Opšte je pravilo da će dinamička greška biti manja što je vreme pretvaranja t_p manje. Uz to treba imati u vidu da vreme pretvaranja mora biti manje od vremenskog intervala uzorkovanja, tj. $t_p < \Delta t$.

Dinamička greška kod kompenzacije u otvorenom. Dinamička greška zavisi od principa rada digitalnog senzora. Digitalni senzori sa kompenzacijom u otvorenom imaju veću dinamičku grešku od direktnih i kompenzacionih senzora. Pri kompenzaciji u otvorenom ciklički se generiše idealna statička karakteristika, odnosno kompenzacioni signal x_k . Mereni i kompenzacioni signal mogu se izjednačiti bilo gde unutar ciklusa, a indikacija se pojavljuje tek na kraju ciklusa. U tom vremenu merena veličina može se promeniti (slika 14.4a). Obično se zahteva da dinamička greška bude manja od vrednosti podeoka z .

Dinamička greška kompenzacionih senzora sa negativnom povratnom spregom. Zbog povratne sprege izlaz poraste svaki put kada je razlika $x - x_k > z/2$, odnosno izlaz opadne kad je ta razlika manja od $z/2$ (slika 14.4b).



Slika 14.4. Dinamička greška kompenzacionih digitalnih senzora: a) greška senzora sa kompenzacijom u otvorenom, b) greška senzora sa negativnom povratnom spregom

Vreme aperture. Efekat dinamičke greške pri konverziji obično se izražava vremenom aperture t_a . To je vreme u toku kojeg se izlazni signal promeni za vrednost jednog podeoka kada je brzina promene ulazne veličine v maksimalna:

$$v_{\max} t_a = z. \quad (14.15)$$

Proračun vremena aperture uvek se provodi za sinusni signal $x_{\max} \sin \omega t$. Maksimalna brzina menjanja amplitute za takav signal je $v_{\max} = x_{\max} \omega$, pa je vreme aperture:

$$t_a = \frac{z}{v_{\max}} = \frac{x_{\max}/N}{x_{\max} \omega} = \frac{1}{2\pi f N}. \quad (14.16)$$

Na primer, za signal frekvencije od 1 kHz i 10-bitni A/D konvertor ($N=2^{10}=1024$), pri čemu je amplituda ulaza jednaka maksimalnom ulazu na A/D konvertor, vreme aperture ima veoma malu vrednost:

$$t_a = \frac{1}{2\pi \cdot 1000 \cdot 1024} = 155 \text{ ns} . \quad (14.17)$$

14.2.3 Informacione karakteristike

Informacioni kapacitet senzora. Izlazni signal digitalnih senzora je kodirani digitalni signal, tj. brojčana vrednost izlaza je u binarnom, dekadnom, oktalnom ili heksadecimalnom sistemu. Najvažnija svojstva kodiranog signala odnose se na mogućnost njegovog prenosa i čuvanja. Ove osobine izučavaju se u teoriji informacija.

Elementarna ćelija za čuvanje cifarske informacije može da sadrži jednu od m cifara datog brojčanog sistema. Drugim rečima, elementarna ćelija ima m mogućih različitih stanja (brojeva). Količina informacije koja se može sačuvati u dve elementarne ćelije, prema svojstvu aditivnosti, dva puta je veća nego u jednoj. U opštem slučaju, u n jednakih ćelija može se sačuvati maksimalno $N_{\max} = m^n$ različitih brojeva. Mera informacionog kapaciteta digitalnog senzora je:

$$C = \log m^n = n \log m . \quad (14.18)$$

Ako se odabere logaritam sa bazom 2, tada iz jednačine (14.18) proizilazi da će informacioni kapacitet C biti jednak ekvivalentnom broju ćelija sa dva stanja. Zbog toga se za jedinicu mere informacionog kapaciteta uzima bit – ćelija sa dva stanja. Tako, na primer, ćelija sa 16 mogućih stanja ima $C=\ln 16=4$ bita, tj. kapacitet koji je ekvivalentan kapacitetu od 4 binarne ćelije. Mnogo je lakše napraviti 4 binarne ćelije nego jednu ćeliju sa 16 stanja.

Savremeni digitalni senzori imaju najčešće 8 ili 12-bitne A/D konvertore (ređe 16 ili 18-bitne). Senzor sa 8-bitnim A/D konvertorom ima informacioni kapacitet od $C=8$ bita sa 256 mogućih stanja.

Količina informacije. Neka senzor ima mogućnost da detektuje n vrednosti merene veličine. Razumno je prepostaviti da će izlazni signal, tj. saopštenje o tome da merena veličina ima npr. i -tu vrednost, sadržavati veću količinu informacije što su apriorne informacije o vrednosti merene veličine do trenutka merenja manje. Količina informacije u takvom rezultatu merenja odreduje se pomoću sledećeg izraza:

$$I_i = \log (1/p_i) = -\log p_i , \quad (14.19)$$

gde je p_i apriorna verovatnoća i -te vrednosti merene veličine. S obzirom da je $0 \leq p \leq 1$, količina informacije I uvek je pozitivna.

Radi ilustracije, neka je reč o detekciji stanja dvopolozajnog senzora, koji je retko uključen, $p_i \rightarrow 0$. U trenutku uključivanja senzora informacija o tom događaju je

velika, $I_i \rightarrow \infty$. U isto vreme, signal o tome da je senzor isključen ne nosi nikakvu informaciju, pa je $I = -\log(1-p_i) \rightarrow 0$.

Entropija. Umesto količine informacije koja proističe iz jednog saopštenja (14.19), za praktične potrebe interesantnija je entropija – srednja količina informacije iz tog saopštenja:

$$H = -\sum_{i=1}^m p_i \log p_i . \quad (14.20)$$

Ako u prenosnom kanalu od senzora do prijemnika nema smetnji i gubitaka informacija, tada je na strani prijemnika $H=I$.

Kapacitet prenosnog kanala bez prisustva šuma predstavlja granične mogućnosti prenosa merne informacije od senzora do prijemnika. Kapacitet kanala računa se pomoću formule:

$$C = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\log q}{T} , \quad (14.21)$$

gde je q broj elementarnih informacija koje senzor predaje u vremenskom intervalu T . U razmatranju periodičkih procesa T je vreme jednog perioda.

Brzina S kojom se šalje signal kroz prenosni kanal izražava se u impulsima u sekundi. U toku perioda T može se predati $n = T/\tau = ST$ impulsa, pri čemu su τ vreme predaje jednog impulsa i $S=1/\tau$ brzina jednog impulsa. U opštem slučaju, ima $q = m^n = m^{-ST}$ različitih poruka. Pomoću (14.21) može se izračunati kapacitet takvog kanala:

$$C = (\log m^{ST})/T = S \log m . \quad (14.22)$$

Za kanal koji propušta samo binarne signale ($m=2$) kapacitet kanala je veći što je dužina trajanja impulsa manja ($C=S=1/\tau$).

Kapacitet prenosnog kanala sa delovanjem šuma. Zbog delovanja šuma u prenosnom kanalu merna informacija koja stiže do prijemnika može biti izmenjena, što se izražava kao promena količine informacije:

$$\Delta I_i = \log(1/p_i) - \log(1/p_j(i)) , \quad (14.23)$$

gde su p_i apriorna verovatnoća prenosa i -te informacije, a $p_j(i)$ uslovna verovatnoća da je poslata i -ta informacija, a primljena j -ta informacija. Iz jednačine (14.23) vidi se da pri velikom šumu ($p_j(i)=p_i$) primljeni signal ne sadrži informaciju ($\Delta I_i \rightarrow 0$). S druge strane, za slabo izraženi šum ($p_j(i)=1$ za $i=j$ i $p_j(i)=0$ za $i \neq j$) količina informacije ostaje neizmenjena i jednačina (14.23) svodi se na raniji slučaj (14.19).

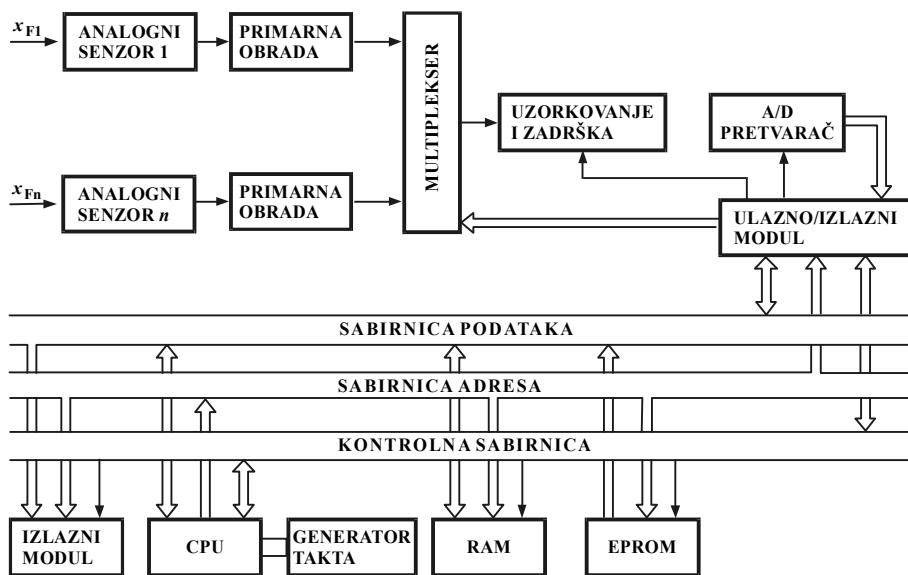
Zbog delovanja šuma propusnost kanala, tj. njegov kapacitet smanjuje se. U teoriji informacija dokazano je da za kanal koji ima $H < C$ uvek postoji takav kôd koji će omogućiti predaju signala sa proizvoljno malom greškom.

14.3. NAČIN GRADNJE DIGITALNIH SENZORA

14.3.1. Organizacija

Definicija digitalnog senzora kao mernog sredstva koje vrši konverziju merene analogne veličine u digitalni signal ne određuje u potpunosti njegova funkcionalna svojstva. Potpunija definicija uzima u obzir da je to sredstvo koje, zahvaljujući tesnoj integraciji sa mikrokontrolerom, osim merenja obraduje mernu informaciju. Zbog toga se u literaturi za digitalne senzore sve češće upotrebljava naziv „inteligentni senzori“. Na taj način ističe se njihova suštinska razlika od analognih senzora, koji samo mere fizikalnu veličinu. Digitalni senzor kao inteligentni merni uređaj sastoji se od više blokova (slika 14.5).

U analognim senzorima merena fizikalna veličina konverte se u električni signal: struju, napon ili u promenu RLC-parametara. U bloku primarne obrade informacioni signal transformiše se radi postizanja normiranih vrednosti električnih parametara, kao što su: nivo, impedantna razdvojenost, prigušenje šumova itd.



Slika 14.5. Opšta struktura digitalnog (inteligentnog) senzora

Mikrokontroler u jednom trenutku može primiti samo jedan informacioni signal. Zbog toga se signali pre ulaska u mikrokontroler propuštaju sukcesivno (jedan po jedan) – zahvaljujući multipleksersu kao komutirajućem sredstvu. Radom multipleksera upravlja poseban program u mikrokontroleru. Trenutni kanal identificuje se pomoću adrese, koja je predstavljena digitalnim signalom na adresnoj sabirnici. Adresni signal se dešifruje zatvaranjem odgovarajućeg prekidača u multipleksersu. Na taj način uključuje se željeni merni kanal.

Mikrokontroler ne može da obraduje analogne signale. Zato je potreban A/D konvertor, koji će ih pretvarati u digitalne signale. Na slici 14.5 prikazana je situacija sa centralizovanim A/D konvertorom. Analogni signali suksesivno dolaze na blok gde se vrši uzorkovanje i pamćenje (fiksiranje) nivoa signala zatečenih u trenutku uzorkovanja. Promene fizikalne veličine nakon toga ne utiču na vrednost koja se čuva u bloku za uzorkovanje i pamćenje. Potom se uključuje A/D konvertor, koji uzorkovanu vrednost prevodi u digitalni ekvivalent i rezultat konverzije prosledjuje u memoriju mikrokontrolera. Posle ovoga se multipleksir, kolo za uzorkovanje i pamćenje, te A/D konvertor postavljaju u početno stanje i, na kraju, spremni su za prijem sledeće komande za očitavanje analognog signala sa drugog ulaza.

Ukoliko su promene signala brže, preključivanje multipleksera sa jednog na drugi kanal mora biti češće. Frekvencija uključivanja nekog kanala treba da je bar dvostruko veća od najviše frekvencije menjanja signala u tom kanalu. Za brzo promenljive signale povoljnije je A/D konvertore postaviti u svaki kanal pojedinačno – odmah uz blok primarne obrade. Na izlazu iz A/D konvertora formira se paralelni digitalni signal. Takav signal je, zbog povećanog broja žica, nepraktičan za veća rastojanja. U tom slučaju iza A/D konvertora dodaje se blok za pretvaranje paralelnog kôda u serijski, kao i poseban pojačavač, koji obezbeđuje potrebnu snagu za prenos. S obzirom da su oni tada sastavni deo digitalnog senzora, njegovu strukturu (slika 14.1) potrebno je proširiti tim blokovima.

Ulazno-izlazni modul služi za povezivanje (interfejs) razmatranih ulaza sa mikrokontrolerom. Ovaj blok je priključen na konvencionalnu ulazno-izlaznu magistralu koja se sastoji od:

- dvosmerne sabirnice podataka – skup linija za prenos podataka prema mikrokontroleru, odnosno za prenos podataka od mikrokontrolera prema senzorima;
- sabirnice adresa – skup linija za signale koji definišu odredišta izlaznih podataka ili izvore ulaznih podataka;
- sabirnice komandi – linije za prekid (interapt) i linije za kontrolu ulaza i izlaza.

Na slici 14.5 ispod sabirница, prikazan je skup blokova:

- mikroprocesor – centralna procesorska jedinica; služi za realizaciju digitalnog senzora, najčešće 8 ili 16-bitnog; za obradu signala, komandi i podataka;
- generator takta – generator impulsa stabilne i visoke frekvencije;
- RAM (*Random Access Memory*) – memorija sa direktnim dostupom, koja služi za smeštanje programa i obavljanje računskih operacija;
- EPROM (*Erasable Programmable Read-Only Memory*) – memorija iz koje se sadržaj može samo čitati; upisivanje moguće samo specijalnim programskim sredstvima; služi za čuvanje informacija koje imaju trajni karakter, kao što su programske instrukcije i konstantni podaci.

14.3.2. Primarna obrada signala i povezivanje senzora sa mikrokontrolerom

Primarna obrada odnosi se na jednostavnije transformacije izlaznog signala iz senzora. U primarnoj obradi prilagođavaju se signali za prenos do mikroprocesora. Tehnike primarne obrade sistematizovane su u tabeli 14.1. Sredstva za primarnu obradu realizuju se na bazi kvalitetnih operacionih pojačavača. Na primer, za pojačanje malih istosmernih napona primenjuju se operacioni pojačavači u invertujućem, neinvertujućem ili diferencijalnom spoju; za linearizaciju se primenjuju operacioni pojačavači sa nelinearnom povratnom spregom itd. Neke primarne obrade koje su vršene na opisani način, tj. pre uvođenja u mikrokontroler, sada se često obavlaju u samom mikrokontroleru. Tako se postižu bolji efekti. Recimo, nelinearnost signala iz termoelementa, koja je reda 5%, na klasičan način smanjuje se najviše do 0,5%. Softverskim rešenjima u mikrokontroleru nelinearnost se smanjuje i do 0,1%, a ovaj način je i višestruko jeftiniji.

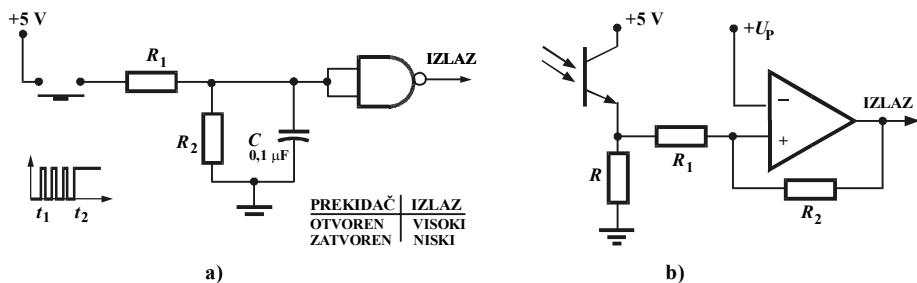
ELEKTRIČNI IZLAZNI SIGNAL	PRIMARNA OBRADA	FUNKCIJA I NAMENA
NAPON	POJAČAVAČ	Pojačanje malih istosmernih napona, konvertovanje bipolarnog u unipolarni signal
	LOGARITAMSKI POJAČAVAČ	Smanjivanje (skaliranje) dinamičkog opsega izlaznog napona
	FILTER - niskofrekventni - pojasnii	Prigušivanje šumova
	REGULATOR POJAČANJA	Promena pojačanja radi povećanja osetljivosti
	LINEARIZATOR	Korekcija izlaznog signala informacionog sredstva koji ima nelinearnu statičku karakteristiku
	I/U PRETVARAČ	Pretvaranje izlaznog istosmernog strujnog signala u kvalitetan naponski signal (mali izlazni otpor)
STRUJA	I _~ / I= PRETVARAČ	Pretvaranje naizmeničnog strujnog signala u standardni jednosmerni
OTPOR	IMPEDANTNI RASTAVLJAČ	Pretvaranje velikog izlaznog otpora analognog senzora u mali otpor

Tabela 14.1. Tehnike primarne obrade informacionog signala

Povezivanje senzora relejnog tipa. U sistemima tehničke zaštite objekata, prostora, opreme, procesa i ljudi od posebnog su interesa senzori čiji se izlazni signal menja samo kada merena fizikalna veličina prelazi preko ili ispod odredene vrednosti. Ova granica označava prag delovanja. Tu su posebno zastupljeni senzori: bimetalni, fotoprekidački, graničnici položaja i dr. Izlazni signal ovakvih senzora ima samo dva stanja – uključeno i isključeno, pa se zato nazivaju relejni senzori.

Senzori relejnog tipa često imaju mehaničke kontakte. Specifičan problem prilikom povezivanja takvih senzora sa mikrokontrolerom nastaje zbog treperenja – višestrukog preključivanja oko definisanog praga delovanja pre nego što se uspostavi potpuno zatvoren (NC) ili potpuno otvoren kontakt (NO). Vreme od prvog

(nestabilnog), pa do poslednjeg (trajnog) zatvaranja $t_2 - t_1$ je nekoliko milisekundi. Iako je to relativno kratko vreme, logička kola na koja se dovodi signal sa takvog senzora višestruko bi menjala svoje stanje. Uticaj treperenja na dalju obradu signala otklanja se hardverskim ili softverskim sredstvima. Jednostavan način je priključivanje RC filtera između kontakata i ulaznih kola mikrokontrolera (slika 14.6a). Kada dode do prvog kratkotrajnog kontakta, kondenzator C se puni preko otpora R_1 i R_2 , ali nedovoljno da bi promenio stanje izlaza. Tek kod trajnog kontakta kondenzator će dostići napon potreban za okidanje logičkog ulaznog kola i, na kraju, napuniti se na vrednost određenu deliteljem R_1 i R_2 . Taj napon je nešto manji od +5 V, ali logička kola rade pouzdano i pri napajajušem manjem od punog. Suprotna pojava dešava se prilikom otvaranja kontakata.



Slika 14.6. Povezivanje relejnih senzora sa mikrokontrolerom: a) otklanjanje treperenja kontakata, b) beskontaktni relezni senzor

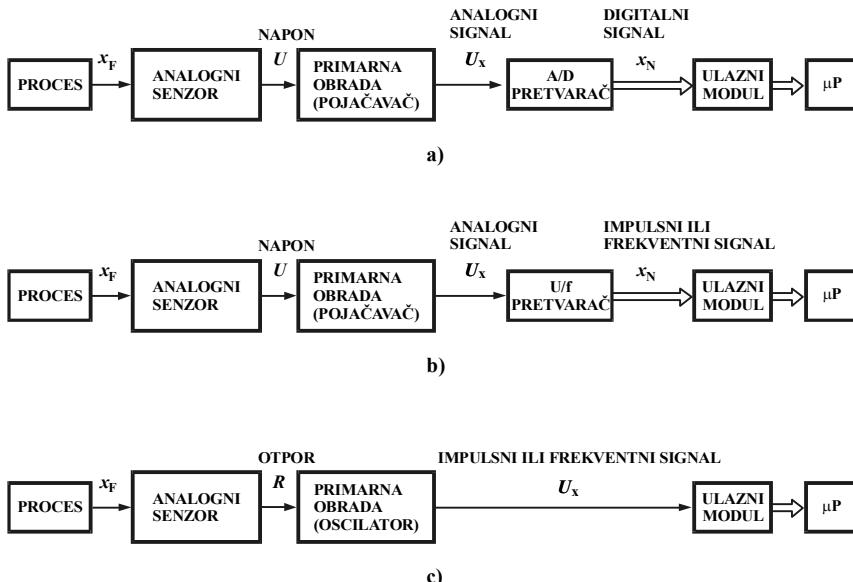
Fotosenzori u uređajima za automatsku kontrolu, u kolima za zaštitu, brojačima, dozimetrima, graničnicima položaja itd. relezni su tipa, ali bez kontakata. Kada se fotosenzor osvetli, njegov prelazni otpor se smanjuje i kroz tranzistor poteče izvesna fotostruja. Pošto je snaga izlaznog signala mala, prilikom povezivanja ovakvih senzora sa mikrokontrolerom u seriju se dodaje komparator (slika 14.6.b). Komparator poređi signal iz fotosenzora sa definisanim pragom U_p i na osnovu toga generiše izlazni signal, koji odgovara stanjima senzora – uključen ili isključen. Zbog delovanja šumova i ovde je moguća pojava višekratnog preključivanja, pa se primenjuje komparator sa zonom neosetljivosti (histerezisom), čija se širina reguliše odnosom otpornika R_2 i R_1 .

Povezivanje analognog senzora sa mikrokontrolerom vrši se na tri načina. Prvi način odnosi se na povezivanje senzora i mikrokontrolera koji su blizu tako da čine, praktično, jedinstvenu strukturu. Analogni naponski signal iz primarnog senzora obrađuje se u bloku primarne obrade i, zatim, u A/D konvertoru prevodi u digitalni oblik (slika 14.7a).

Drugi način odnosi se na povezivanje senzora i mikrokontrolera koji su međusobno udaljeni (slika 14.7b). Analogni naponski signal iz senzora prvo se pojavi, a onda pomoću naponsko-frekventnog (U/f) pretvarača konvertuje u naponski signal čija je frekvencija proporcionalna intenzitetu signala iz senzora. Frekventno promenljivi signal je manje osetljiv na delovanje šumova, pa je moguć prenos informacija na veće udaljenosti.

Treći način odnosi se na otporničke, induktivne i kapacitivne senzore, tj. na senzore sa promenljivom izlaznom impedansom kao informacionim signalom. U tom

slučaju senzor je deo ulaznog kruga oscilatora, koji, u skladu sa promenom izlazne impedanse senzora, generiše frekventno promjenljivi signal (slika 14.7c). Dobijeni frekventni signal uvodi se u mikrokontroler putem ulaznog modula (brojača impulsa, merača vremenskih perioda) ili direktno – ako je signal frekventno kodiran.



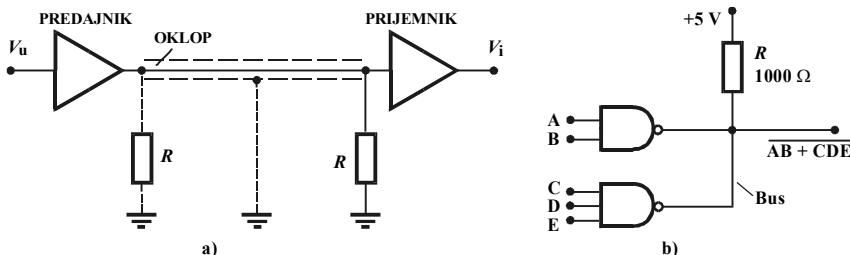
Slika 14. 7. Povezivanje senzora sa mikroprocesorom: a) povezivanje preko A/D konvertora, b) povezivanje preko U/f pretvarača, c) povezivanje preko oscilatora

Prenos digitalnog signala. Digitalni signal je dvonivoski signal, tj. sastoji se od logičkih nula i logičkih jedinica. Serijski digitalni signal generiše se u jednom binarnom kolu kao vremenska sekvenca binarnih impulsa, koji se šalju do prijemnika po jednom prenosnom kanalu. Parallelni digitalni signal generiše se simultano u više binarnih kola, pri čemu svakom kolu odgovara odvojen prenosni kanal do prijemnika. Prenos paralelnog digitalnog signala je brži, ali je zbog većeg broja kablova skuplji nego prenos serijskog digitalnog signala. Zbog toga se serijski prenos primjenjuje kada je razdaljina između senzora i prijemnika velika, a parallelni prenos kada je ta razdaljina mala i kada je potrebna velika brzina prenošenja.

Digitalni signali u načelu su manje osetljivi na šumove i distorziju nego analogni signali zato što su nivoi digitalnih signala iznad nivoa šumova koji se javljaju u prenosnom vodu. Neosetljivost digitalnog signala na drift i greške prisutna je sve dok logičke nule i logičke jedinice ne budu prigušene toliko da ih prijemnik ne raspoznaće. TTL drajveri omogućavaju prenos signala najviše do 70 cm.

Greške u prenosu digitalnog signala najčešće se javljaju zbog dužine prenosnog voda i refleksije od prijemnika ka senzoru. Refleksija je uvek prisutna, ali problemi nastaju kada reflektovani signal stigne do senzora, a generisanje signala još nije završeno. Generisanje signala određeno je vremenskom konstantom izlaznog digitalnog kola. Tehnika rešavanja problema refleksije zavisi od dužine prenosnog voda. Za male razdaljine (od desetak centimetara do nekoliko metara) između izlaznog kola senzora i ulaznog kola prijemnika obično je samo jedan žičani vod ili koaksijalni

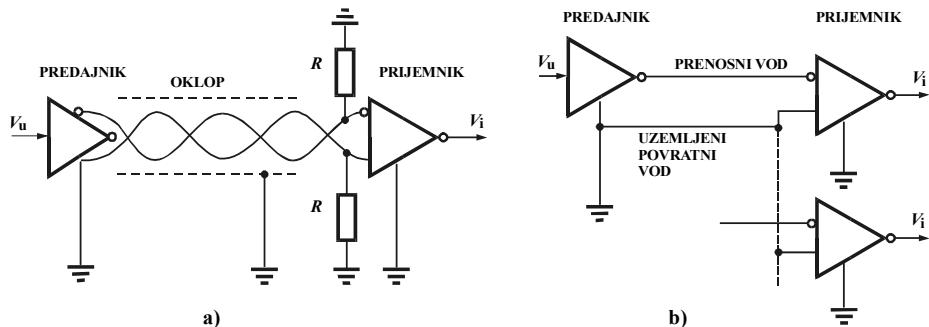
kabl, pa se ovakav prenos označava kao nesimetričan, nebalansiran ili *single-ended*. Najpoznatiji standardni interfejs ovoga tipa je RS-232C. Za smanjivanje refleksije potrebno je otpor prenosnog kabla ograničiti na vrednost karakteristične impedanse: $R = Z_0 = \sqrt{L'/C'}$ [Ω], gde su L' i C' induktivnost i kapacitet kabla po jedinici dužine. Ograničavajući otpornik R priključen je između kraja voda i mase. Umesto prostog voda češće se koristi oklopljeni, koaksijalni vod, koji smanjuje uticaj elektromagnetskih smetnji na merni signal. Oklop mora biti uzemljen u jednoj tački sa referentnim potencijalom nula, na početku ili na kraju voda. Oklop smanjuje uticaj parazitnog kapaciteta u prenosnom kablu. Na slici 14.8a V_u predstavlja ulazni, a V_i izlazni TTL podatak. Na kraju voda dodaje se još i jedan kondenzator od 330 pF da bi se dobila odgovarajuća brzina promene sa niskog na visoki.



Slika 14.8. Prenos digitalnog signala: a) sa jednim vodom (RS-232C),
b) primer kola sa otvorenim kolektorom i OR ožičenjem na izlazu

Kada je izlaz senzora logičko kolo, primenjuje se logika otvorenog kolektora. Inače, otvoreni kolektor je termin koji se odnosi na izlazni tranzistor čiji kolektor (izlaz) nije spojen na pozitivni kraj napona napajanja. Izlazni tranzistor radi kao prekidač i mora biti spojen na pozitivni napon da bi kolo bilo zatvoreno. Spajanje se ostvaruje preko opterećnog otpornika R (*pull-up resistor*). Otpornik R istovremeno služi kao opterećeni otpor i ograničavajući otpor prenosnog voda (slika 14.8b). Na taj način struja teče od $+V_{cc}$ preko opterećenja u logičko kolo. Zbog toga više kola sa otvorenim kolektorom mogu da se spoje na jednu žicu. Kao primer, na slici 14.8b prikazana su tri NAND kola sa otvorenim kolektorom koji dele jednu izlaznu liniju preko zajedničkog otpornika R . Kada izlaz jednog NAND kola postane aktivran (logičko 0), svi izlazi će biti uzemljeni. To je efekat OR logičkog delovanja.

Kada se digitalni senzor nalazi na udaljenosti većoj od nekoliko metara od prijemnika, primenjuje se upredeni i oklopljeni provodnik (slika 14.9a). Izlazno kolo senzora i ulazno kolo prijemnika su diferencijalnog tipa. Na taj način postiže se ujednačavanje (balansiranje) prenosnih linija i veće potiskivanje istosmerne komponente na ulazu u prijemnik, tj. bolji faktor CMRR (*Common Mode Rejection Ratio*). Najpoznatiji standradni interfejs ovoga tipa je RS-422. Ulagana impedansa prijemnika je obično velika, pa je za prilagodavanje prenosnog voda i prijemnika potrebno neko vanjsko kolo, što poskupljuje i usložnjava prenos. Osim toga, izlazno kolo senzora mora imati dovoljno snage da obezbedi prenos na veću daljinu. Dobra strana balansiranog prenosa je manja osjetljivost na indukovani šum jer se zbog upredenosti žica indukovani naponi praktično sasvim poništavaju. Ukoliko je primenjena i korekcija refleksije, dvostruki vodovi omogućavaju veliku brzinu prenosa od 10 Mbit/s na rastojanju do 1000 m.



Slika 14.9. Diferencijalni prenos: a) balansirani (RS-422), b) nebalansirani (RS-423)

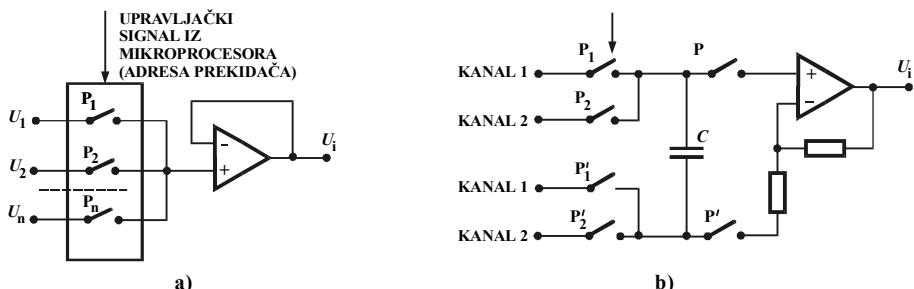
Prenos signala može biti i nebalansirani diferencijalni, kao kod standardnog interfejsa RS-423. Ulaz prijemnika je diferencijalni, ali je jednim povratnim vodom spojen na masu prijemnika (slika 14.8b).

14.3.3. Multiplekser

Multiplekser sa zajedničkim izlazom. Na mikrokontroler može biti povezano više analognih senzora. Za svaki je potrebno obaviti A/D konverziju. To se može rešiti tako da svaki kanal ima svoj A/D konvertor ili pomoću zajedničkog konvertora. Prvo rešenje omogućava veću brzinu konverzije, ali je skuplje. Za drugo rešenje potreban je dodatni uređaj, koji će u jednakim vremenskim intervalima povezivati jedan po jedan analogni signal sa zajedničkim A/D konvertorom. Ovaj uređaj naziva se multiplekser i predstavlja složeno prekidačko kolo. Prekidači su napravljeni od unipolarnih tranzistora (FET ili MOSFET), a njihovim radom upravlja mikrokontroler. Greška prenosa ulaznog napona u izlazni je $(U_o - U_i)/U_o$ i daje se u procentima.

Prekidačka kola aranžiraju se u multiplekser na različite načine. Cilj je da se postignu što veća tačnost i brzina preključivanja. Najčešće su svi prekidači spojeni na zajednički izlaz, na koji je vezano naponsko sledilo radi smanjenja greške prenosa (slika 14.10a). Ovakvi multiplekseri upotrebljavaju se za ulazne napone najviše do ± 20 V. Kada se umesto naponskog sledila stavi operacioni pojačavač, može se realizovati pojačavač sa programabilnim pojačanjem PGA.

Multiplekser sa lebdećim kondenzatorom namenjen je za dvožične senzore i naponske nivoe do ± 20 V (slika 14.10b). Mikrokontroler uključuje par prekidača

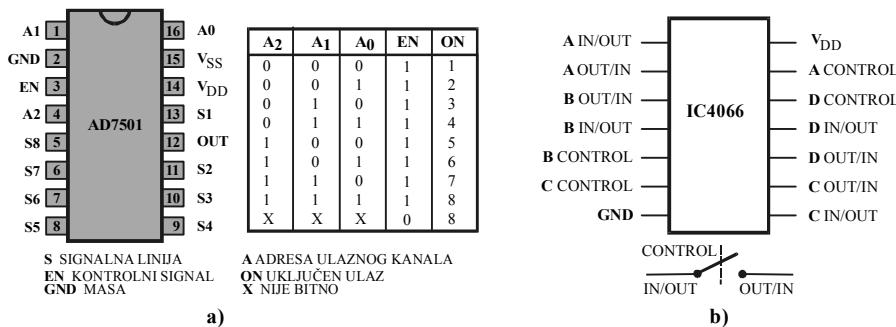


Slika 14.10. Multiplekser: a) multiplekser sa zajedničkom sabirnicom, b) multiplekser sa lebdećim kondenzatorom

$P_i - P'_i$ i istovremeno isključuje i par prekidača $P - P'$. Kada se kondenzator napuni, prekidači $P_i - P'_i$ se isključuju i odvajaju senzor od multipleksera. Tada se uključuju prekidači $P - P'$, pa se napon sa kondenzatora preko pojačavača prenosi na izlaz. Lebdeći (plivajući) kondenzator, dakle, omogućava odvajanje ulaznog kruga, tako da se nikakav zajednički (*common mode*) napon ne prenosi do izlaza. Zbog toga izlaz pojačavača može biti sa jednom žicom, tj. nebalansiran. Da bi se pojačanje prilagodilo različitim zahtevima pojedinih kanala, umesto prikazanog pojačavača primenjuje se programabilni pojačavač.

Digitalni multiplekser je logičko kolo koje ima 2^n digitalnih ulaza i jedan digitalni izlaz. Selekcija ulaza obavlja se pomoću odgovarajuće n -bitne digitalne reči – adrese. Tipičan primer su (8×1) multiplekseri AD7501 i 74HC171. To su monolitni 16-pinski čipovi koji selektuju jedan od osam ulaza pomoću trobitne adresne reči (8×1) . Svi ulazi su TTL i CMOS kompatibilni. Na slici 14.11a prikazan je čip AD7501 i njegova tablica istinitosti.

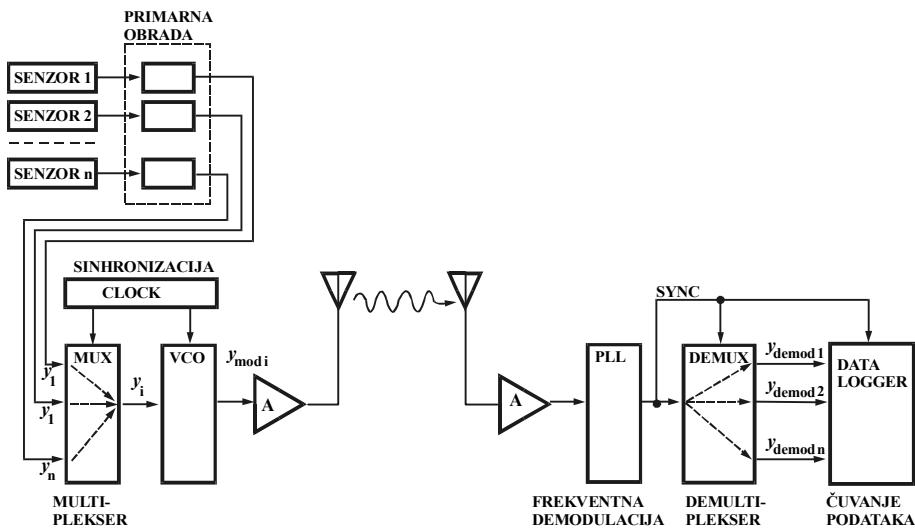
Postoje i digitalni multiplekseri koji mogu da propuštaju i analogne signale. Jedan od najpoznatijih multipleksera tog tipa je kolo 4066 sa četiri bilateralna prekidača. Njima se upravlja nezavisno (slika 14.11b).



Slika 14.11. Multiplekser: a) kolo 7501 i tablica istinitosti, b) četvorostruki dvosmerni prekidač 4066

Demultiplexer je sastavni deo svakog mernog sistema u kome postoji multiplexiranje. Demultiplexer je selektor izlaza: jedan signal prosleđuje na tačno određeni izlazni kanal. Multiplekser i demultiplexer moraju da rade sinhrono. Sinhronizacija se ostvaruje posebnim parom žica koje su aktivne između predaje i prijema mernog signala, ili se sinhronizirajući signal šalje istom linijom kao i merni signal. Na slici 14.12 prikazan je sakupljač podataka (*data logger*) sa radio-prenosom mernog signala. Sinhronizirajući signal SYNC je niz impulsa utisnut na nosećoj frekvenciji kao jedno dodatno merenje.

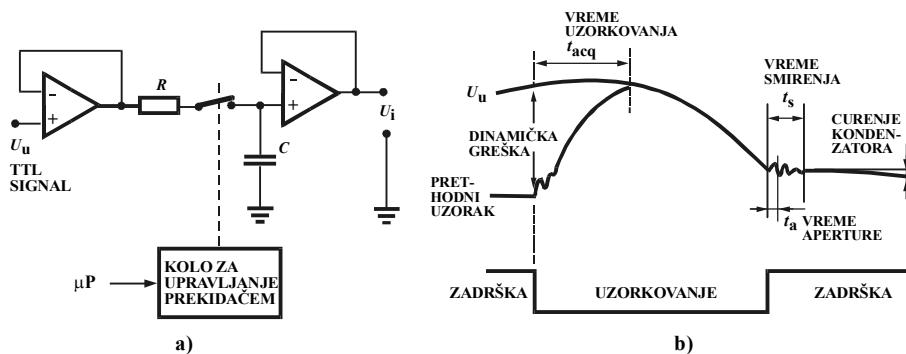
U telemetrijskim sistemima za prenos signala na kraćim rastojanjima koriste se infracrveni talasi (IC), a za veća rastojanja radio-talasi (RF). Merni signal sa senzora najpre se selektuje u multipleksersu, a zatim se merni napon pretvara u frekvenciju u naponski kontrolisanom oscilatoru (VCO). Frekventno modulisani signal se pojačava i usmerava pomoću antene prema prijemniku. Primljeni signal se fazno demoduliše u kolu sa fazno vezanom petljom (*phase-locked loop - PLL*), kao što je IC565, a zatim se informacija prosleđuje na odgovarajući ulaz datalogera.



Slika 14.12. Dataloger sa RF komunikacijom između senzora i logera

14.3.4. Kola za uzorkovanje i zadršku

Kolo za uzorkovanje i zadršku S/H (*sample-and-hold*) je elektronsko prekidačko kolo čiji je izlazni signal jednak ulaznom samo u trenutku uzorkovanja, pri čemu tu vrednost zadržava do sledećeg uzorkovanja (slika 14.13a). Radom ovog kola upravlja mikrokontroler. Dok je prekidač uključen, traje faza praćenja, tj. izlazni signal prati promene ulaznog signala. Ulagani signal puni kondenzator C preko otpornika R . Vremenska konstanta $\tau = RC$ treba da je manja od vremena $1/f_{max}$, gde je f_{max} najviša frekvencija menjanja analognog ulaznog signala. Kada se prekidač na komandu mikrokontrolera isključi, izlaz zadržava vrednost napona na kondenzatoru neko vreme, koje zavisi od kvaliteta kondenzatora, odnosno zadržava tu vrednost sve do sledećeg trenutka uzorkovanja. Na taj način umesto brzo promenljivog signala dobija se konstantan signal, koji je jednostavniji za dalju obradu u A/D konvertoru. Naponsko sledilo na ulazu odvaja kolo za zadršku od multipleksera, a naponsko sledilo na izlazu smanjuje gubitke usled nesavršenosti kondenzatora.

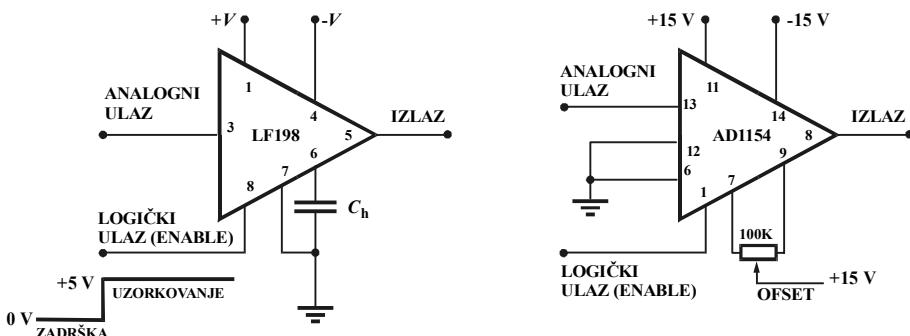


Slika 14.13. Kolo za uzorkovanje i zadršku: a) osnovna šema, b) vremenski dijagram

Kolo za uzorkovanje i zadršku održava konstantnim ulazni signal u A/D pretvaraču tokom pretvaranja, te na taj način omogućava multiplekseru da nade i pripremi sledeći kanal. Tačnost kola za uzorkovanje i zadršku zavisi od:

- Vremena uzorkovanja t_{acq} , koje traje od trenutka kada se da komanda za uzorkovanje pa do trenutka kada napon na kondenzatoru dostigne vrednost ulaznog signala pri skokovitoj promeni od 10 V;
- Vremena aperture t_a , koje traje od trenutka kada se da komanda za zadršku do trenutka kada se pekidač potpuno otvori. Kao što je ranije pokazano, ovo vreme mora da bude veoma malo jer bi se u međuvremenu ulazni signal mogao promeniti više od najmanjeg cifarskog mesta A/D;
- Brzine opadanja napona u fazi zadrške usled neidealnosti kondenzatora.

Standardna komercijalna kola imaju tipičnu tačnost 0,1% i vreme uzorkovanja 10–20 μs , kola opšte namene imaju tačnost 0,1% i vreme uzorkovanja 25 μs , a veoma brza kola za uzorkovanje i zadršku imaju tačnost 0,01% i vreme uzorkovanja 0,25 ns. Na slici 14.14 prikazana su tipična kola za uzorkovanje i zadršku. Kolo LF198 ima 8 pinova, eksterni kondenzator i tačnost 0,002%, napon napajanja od ± 5 V do ± 18 V, ulazni napon do iznosa napona napajanja, vreme uzorkovanja 10 μs , vreme aperture 50–350 ns, opadanje napona u fazi zadrške 5 mV/min za $C_h = 1 \mu\text{F}$. Kolo AD1154 namenjeno je za širok dinamički opseg, ima 14 pinova, interni kondenzator, tačnost 0,00076% (16 bita), ulazni opseg ± 10 V, vreme akvizicije 3,5 μs , vreme aperture 150 ps, opadanje napona u fazi zadrške 0,02 $\mu\text{V}/\mu\text{s}$ (što omogućava primenu i za spore signale bez njihove degradacije).



Slika 14.14. Tipična S/H kola

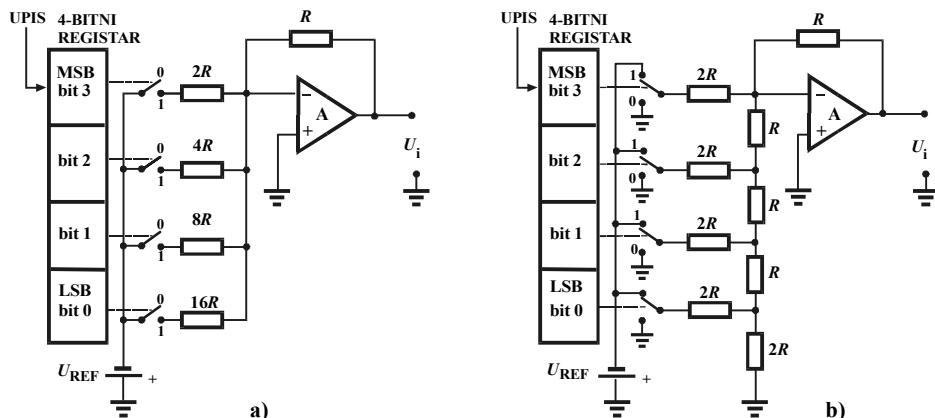
14.3.5. Digitalno-analogni pretvarači

Digitalno-analogni pretvarači (D/A ili DAC) su elektronska kola koja konvertuju digitalni serijski ili paralelni signal u analogni naponski ili strujni električni signal. Budući da je ulazni signal n -bitna reč $b_{n-1}b_{n-2}\dots b_1b_0$, osnova svake D/A tehnike je da se njegove cifre pretvore u odgovarajuće iznose struje ili napona koje treba sumirati. Najčešći način je sumiranje struja (slika 14.15a). Ulazni registar

uzorkuje binarno kodirani digitalni signal i predaje ga D/A pretvaraču u paralelnom obliku. Ulagani registar ima različite forme – to je brojač za impulsni signal, pomični (šift) registar za serijski signal, odnosno to je leč-registar za paralelni ulazni signal. Kada je prekidač P_i zatvoren, u sumirajuću tačku na invertirajućem ulazu operacionog pojačavača teče struja $I_i = U_{\text{ref}}/R_i$, koja odgovara i -tom binarnom mestu digitalnog signala. Ukupna struja ekvivalentna je binarno kodiranom signalu što dolazi iz registra, a izlazni napon proporcionalan je ovoj struci:

$$U_i = -U_{\text{REF}} \cdot \left(\frac{b_{n-1}}{2} + \frac{b_{n-2}}{2^2} + \dots + \frac{b_0}{2^n} \right), \quad (4.24)$$

gde koeficijenti b_i imaju vrednosti 0 ili 1 zavisno od položaja prekidača. Maksimalna vrednost izlaza dobija se kada su svi koeficijenti jedinice: $U_{i\max} = U_{\text{REF}} \cdot (2^n - 1)/2^n$. Konvertor može da služi kao digitalno-analogni množač jer je izlaz proizvod analognog ulaznog napona (koji tada nije konstantan) i digitalnog signala.



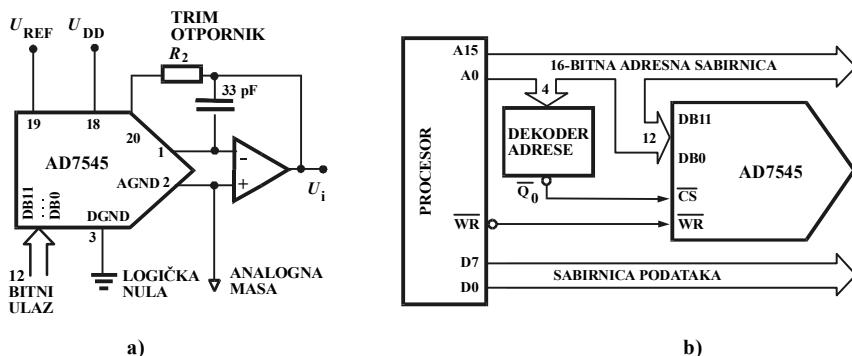
Slika 14.15. D/A konvertor: a) sa težinskom otporničkom mrežom, b) sa lestvičastom mrežom

Odnos otpora i struje u dve susedne grane je 2:1. Za 10-bitni D/A pretvarač to znači da će odnos otpora u granama koje odgovaraju najvišem i najnižem cifarskom mestu biti 1024:1. Ovo je velik odnos i zato su razvijene posebne otporničke šeme. Odlični rezultati postižu se pomoću lestvičaste otporničke mreže $R-2R$ (slika 14.15b). Referentni napon mora biti veoma stabilan, a može biti pozitivan ili negativan. Na primer, eksterni izvor AD581 ima vrednost $10,000 \text{ V} \pm 5 \text{ mV}$.

Za D/A pretvarač bitni su sledeći parametri:

- broj bita ulaznog signala i rezolucija (za n -bitni konvertor rezolucija je $U_{\text{REF}}/2^n$);
- tačnost (u procentima punog opsega, oko 0,05%) i nelinearnost (najčešće je $\pm 1/2 \text{ LSB}$, a može da bude do $\pm 2 \text{ LSB}$), brzina konverzije (do $10 \mu\text{s}$);
- tip digitalnog kôda, opseg izlaznog signala;
- vrsta referentnog izvora (interna, eksterna, promenljiva, fiksna).

Izlaz konvertora može da bude unipolarni ili bipolarni, odnosno jednokvadrantni ili dvokvadrantni. Proizvođači daju tačna uputstva o načinima spajanja. Na slici 14.16a prikazano je priključivanje D/A konvertora AD7545 u spoj sa unipolarnim izlazom. Napon $U_{DD} = 5$ V služi za rad digitalnih kola konvertora. Priključivanje ovog konvertora na mikrokontroler koji ima 16-bitnu sabrnicu adresa ostvaruje se direktno (slika 14.16b). 12 nižih adresnih linija snabdevaju konvertor podacima i za ovo je potrebno obezbediti blok sa 4 kilobajta adresnih lokacija. Adresno polje u instrukciji ima 12 bita za podatke i naredna 4 bita za adresu bloka određenog za konvertor. Kontrolni signal \overline{CS} (Chip Select) omogućava (1) ili zabranjuje (0) pristup do konvertora, a kontrolni signal \overline{W} indicira da mikrokontroler čita podatke (1) ili ih piše (0).



Slika 14.16. D/A konvertor AD7545: a) spoj sa unipolarnim izlazom, b) priključivanje na procesor sa 16-bitnom adresnom sabirnicom

Komercijalni 10-bitni D/A pretvarači imaju vreme pretvaranja od 3 μ s, brzi imaju 1,5 μ s, a veoma brzi do 0,025 μ s. Ovo vreme je nešto manje za D/A pretvarače sa manje bita, odnosno nešto je veće za pretvarače sa više bita. Uporedni pregled karakteristika osnovnih tipova D/A konvertora dat je na tabeli 14.2.

TIP	BROJ BITA	VREME KONV. [μ s]	REF. NAPON	IZLAZ	TIP	BROJ BITA	VREME KONV. [μ s]	REF. NAPON	IZLAZ
AD DAC80V	12	3	6,3 V, interni	<i>U</i>	DAC0800	8	0,1	eksterni	<i>I</i>
AD1139	18	40	6 V, interni	<i>U</i>	DAC0830	8	1	eksterni	<i>I</i>
AD7545	12	2	eksterni	<i>I</i>	DAC1000	10	0,5	eksterni	<i>I</i>
AD563	12	1,5	2,5 V, interni	<i>I</i>	AD7225	8	5	eksterni	<i>U</i>
ICL7134	14	3	eksterni	<i>I</i>	AD7547	12	1,5	eksterni	<i>I</i>

AD - Analog Devices, ICL - Intersil, DAC - National Semiconductor

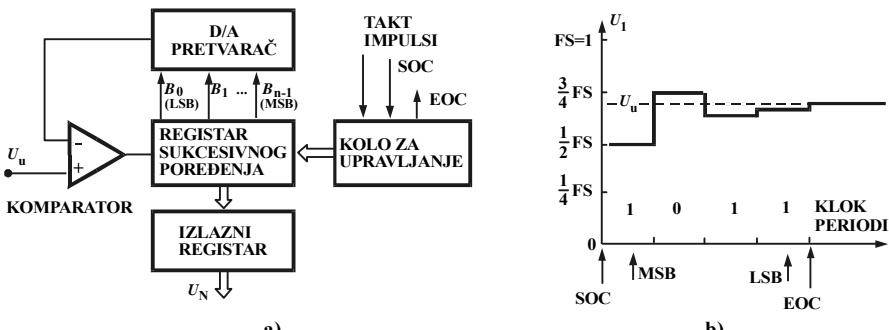
Tabela 14.2. Pregled osnovnih tipova D/A konvertora

14.3.6. Analogno-digitalni pretvarači

Karakteristike. Analogno-digitalni pretvarač je elektronsko kolo koje ima funkciju diskretizacije. Pomoću njega određuje se broj diskretnih jedinica, koji je ekvivalentan merenoj analognoj veličini. Postoji veći broj različitih metoda A/D pretvaranja. U zavisnosti od konkretnih uslova primene, svaka ima određene prednosti. Za izbor A/D pretvarača bitni su:

- opseg i rezolucija merenog analognog signala;
- ta-nost i stabilnost statičke karakteristike pretvarača (spoljni uticaji, posebno delovanje temperature, karakter ulaznih umova (brzi, sporo promenljivi, filtrirani);
- vreme pretvaranja;
- tip referentnog napona (fiksni, promenljivi, podeđiv);
- uticaj karakteristika A/D pretvarača na ulazni kanal: mulfiplexer – uzorkovanje i zadržka – A/D.

A/D pretvarač sa sukcesivnom aproksimacijom odlikuje se velikom brzinom pretvaranja: $1 - 2 \mu\text{s}$ za 8-bitne, $30 \mu\text{s}$ za 16-bitne i najčešće se koristi u akvizicionim sistemima na bazi računara. Pretvaranje ne zavisi od amplitude ulaznog signala niti od rezultata prethodnih pretvaranja. Sutinu sukcesivnih tehnika A/D pretvaranja je u tome da se nepoznati analogni signal poredi sa internim generisanim kompenzacionim signalom (slika 14.17a). Poređenje je postupno i polazi od najvišeg cifarskog mesta MSB (*Master Significant Bit*) do najnižeg LSB (*Least Significant Bit*). Na svakoj etapi poređenja uspostavlja se vrednost jednog cifarskog mesta.

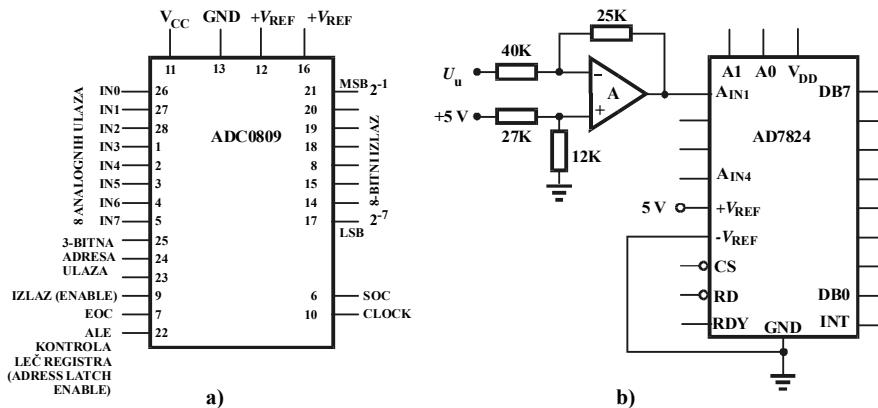


Slika 14.17. A/D pretvarač sukcesivnog tipa: a) principijelna šema, b) dijagram konverzije

Nakon prijema signala za početak pretvaranja SOC (*Start Of Conversion*), MSB bit u izlazom registru postavlja se na jedinicu i preko D/A konvertora u povratnoj sprezi dovodi na ulazni pojačavač kao kompenzacioni signal jednak polovini opsega $U_{FS}/2 = U_{REF}/2$. Ako je ulazni signal veći od kompenzacionog, $U_u > U_{FS}/2$, logička jedinica na mestu MSB ostaje sa uvana. U suprotnom, kada je mereni analogni napon manji od kompenzacionog, uspostavlja se logička nula. U narednom ciklusu na mestu susednog nižeg bita upisuje se logička jedinica i ulazni signal poredi sa vrednošću $U_{FS}/2 + U_{FS}/4$ ako je prethodni bit bio jedan, odnosno sa vrednošću $U_{FS}/2 - U_{FS}/4$ ako je prethodni bit bio nula. Logička kontrola obezbeđuje da se opisanim postupkom odrede vrednosti svih bita, od MSB do LSB. Kraj konverzije označava signal EOC (*End Of Conversion*). Na slici 14.17b prikazana je konverzija napona $U_u = 11 \text{ V}$ u dvotorbitnu reč 1011. Rezolucija A/D konvertora sa sukcesivnom aproksimacijom je $U_{REF}/(2^n - 1)$. Na primer, za 8-bitni konvertor i $U_{REF} = 5 \text{ V}$ rezolucije je $5 \text{ V}/255 = 19,6 \text{ mV}$. Bolju rezoluciju ima konvertor sa više bita i manjim referentnim naponom. Više bitova produžava vreme konverzije, a niže referentni

naponu smanjuje maksimalnu vrednost ulaza. A/D pretvara~ ovoga tipa sadr`i D/A pretvara~, komparator, registre i logi~ka kola upravljanja i zato je to znatno slo~enije i skuplje kolo nego D/A pretvara~. Na linearnost, ta~nost i brzinu najvi{e uti~e sporost D/A pretvaranja.

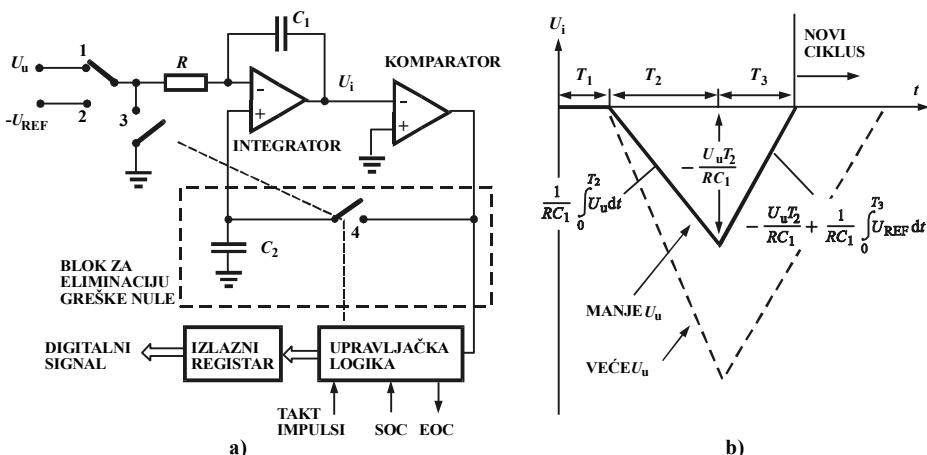
Ispred A/D pretvara-a ~esto se dodaje kolo za uzorkovanje i zadr{ku da bi se fiksirala vrednost brzo promenljivog signala u trenutku kada startuje pretvaranje. U tom slu~aju signal EOC mo~e se upotrebiti za preklju~ivanje kola za uzorkovanje i zadr{ku iz faze zadr{ke u fazu uzorkovanja. Pojedini tipovi A/D pretvara-a imaju vi{e ulaznih kanala, a koji je aktivan zavisi od multipleksera. Na slici 14.18a je prikazan raspored no~ica 28-pinskog sukcesivnog pretvara-a ADC0808/9 sa 8 ulaznih analognih kanala i 8-bitnim izlazom. Svi A/D pretvara-i predvi|eni su za rad sa unipolarnim ulaznim signalom 0 – 5 V. Signali sa senzora ~esto imaju druga-ije nivoe napona i zato je potrebno izvr{iti prilago|avanje. Na primer, na slici 14.18b prikazano je kolo sa operacionim poja~ava-em koje omogu}ava da unipolarni pretvara- AD7824 prihvata ulazni napon od –4 V do +4 V. Me|utim, treba imati u vidu da se bipolarni na-in rada realizuje na {etu rezolucije koja, u ovom primeru, sa vrednosti 19,6 mV raste na $8V/255 = 31,3 \text{ mV}$



Slika 14.18. A/D konvertor: a) 8-kanalni ADC0809, b) kolo za prijem bipolarnog ulaza

A/D pretvara-i integracionog tipa su najta-niji. Njihov rad zasniva se na analognoj kompenzaciji u otvorenom. Umesto D/A pretvara-a nalazi se integrator, odnosno generator pilastog napona. Primenjuju se razli~ite varijante integratora – sa jednim, sa dva ili sa vi{e nagiba integracije. Naj{iru upotrebu ima integrator sa dva nagiba integracije (slika 14.19a). Radni ciklus odvija se u tri etape. U prvoj etapi (ulaz kratko spojen, prekida-i 3 i 4 zatvoreni) na kondenzatoru C_2 uspostavlja se napon jednak gre{ci nule. U drugoj etapi (prekida- 1 zatvoren, a 3 i 4 otvoreni), ulazni analogni signal se integriра. Na kraju perioda $T_2=const$, koji je unapred definisan odre|enim brojem konstantnih impulsa sata, na izlazu integratora je napon proporcionalan ulaznom: $U_i = -U_u \cdot (T_2/RC_1)$. U tom trenutku po-inje tre}a etapa (prekida- 2 zatvoren) – na ulaz integratora dolazi referentni napon suprotnog predznaka, te izlaz raste, (slika 14.19b). Porast izlaznog napona u periodu T_3 traje sve dok komparator ne registruje nulu: $-U_u \cdot (T_2/RC_1) + U_{ref} \cdot (T_3/RC_1) = 0$. Digitalni ekvivalent ulaznog napona odre|uje se iz jedna-ine:

$$U_u = (T_3/T_2)U_{ref}. \quad (14.25)$$



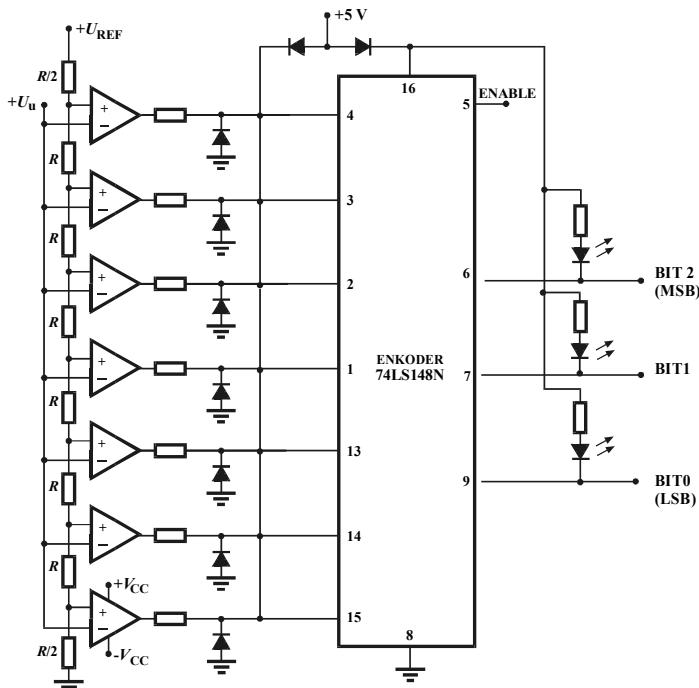
Slika 14.19. A/D pretvarač sa dvojnim nagibom: a) principijelna šema, b) vremenski dijagram konverzije

Prednost A/D pretvarača na bazi integracije je velika tačnost i mali uticaj šumova, a nedostatak im je relativno mala brzina pretvaranja. Primenjuju se u gradnji digitalnih senzora temperature, protoka, nivoa i uopšte sporo promenljivih signala u uslovima jakog delovanja okoline.

Paralelni A/D pretvarač (*flash converter*) je najbrži i najskuplji. Komercijalni 8-bitni, 10-bitni i 12-bitni A/D pretvarači imaju brzinu pretvaranja $20 \mu\text{s}$, $30 \mu\text{s}$ i $40 \mu\text{s}$ respektivno. Za veoma brze A/D pretvarače tipične brzine pretvaranja su $0,8 \mu\text{s}$, $1 \mu\text{s}$ i $2 \mu\text{s}$, ali su im i cene veće. Paralelni pretvarač sastoji se od $2^n - 1$ komparatora i jednog enkodera, gde je n broj bita izlaznog signala. Za 12-bitni pretvarač potrebno je čak 4095 komparatora.

Na slici 14.20 prikazan je 3-bitni paralelni A/D pretvarač sa 7 komparatora. Na invertujuće ulaze svih 7 komparatora istovremeno se dovodi ulazni analogni napon U_{ul} , a na neinvertujuće ulaze referentni naponi U_{REFi} ($i = 1, 2, \dots, 7$) dobijeni pomoću delitelja napona. Referentni naponi rastu od najniže vrednosti $U_{REF1} = U_{REF}/14$ do najviše $U_{REF7} = 13U_{REF}/14$, sa korakom $\Delta U_{REF} = U_{REF}/7$. Kada je $U_u = 0$, na ulazima svih komparatora je $u_+ - u_- > 0$. Na njihovim izlazima je pozitivni napon zasićenja (stanja 0), a ispravljajuće diode 1N4148 spojene prema masi su zakoćene. Kada mereni ulazni napon poraste tako da je $U_u > U_{REFi}$, dioda vodi, napon na priključnom pinu enkodera jednak je padu napona na diodi (stanje 1). Očigledno je da dioda ima zaštitnu funkciju jer onemogućava delovanje visokog negativnog potencijala na ulaz enkodera. Sa porastom ulaznog napona redom se menjaju stanja na izlazima komparatora. Stanja na izlazima komparatora predstavljena su neteženskim binarnim kodom koji se pomoću enkodera 74LS148N pretvara u prirođni binarni kôd.

A/D pretvarač na principu pretvaranja napona u frekvenciju je najviše upotrebljavani A/D pretvarač u tehniči senzora. Odlikuje se jednostavnosću; relativno je jeftin; pogodan je za konverziju brzo promenljivih analognih signala, te za prenos podataka na veće daljine. Mana mu je relativno mala tačnost. Najpoznatiji pretvarači ovoga tipa su AD654, AD650 (Analog Devices), LM331, LM2917 (National Semiconductor), VFC110, VFC121 (Burr Brown). Tipični ulazni napon je $0 - 10 \text{ V}$, a frekventni opseg od 20 kHz (14 bita) do 500 kHz (16 bita).



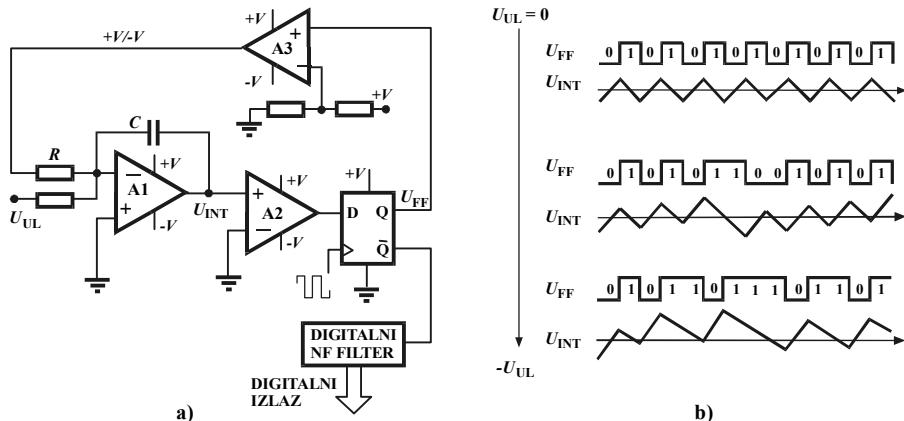
Slika 14.20. Paralelni A/D konvertor sa enkoderom

Delta-sigma A/D pretvarač razlikuje se od drugih A/D pretvarača. Sastoje se od delta-sigma modulatora koji generiše 1-bitni serijski signal (*bitstream*) i digitalnog niskopropusnog filtera koji konvertuje 1-bitni signal u n -bitni. Analogni ulazni signal U_{UL} dovodi se na sumirajući integrator A1. Integrator je priključen na komparator A2, koji deluje kao 1-bitni A/D pretvarač jer njegov izlaz ima samo jedan bit – visoki ili niski, zavisno od toga da li je izlaz iz integratora pozitivan ili negativan. Za svaki klok impuls D flip-flop na Q izlazu daje unipolarni logički signal (0 V ili 5 V). Taj signal istovremeno ide na komparator A3 gde se konvertuje u napon $+V$ ili $-V$ i zatim povratnom spregom dovodi na integrator (slika 14.21a).

Kada je izlaz integratora pozitivan, komparator A2 šalje visoki signal na ulaz D flip-flopa. Pri narednom impulsu kloka, ovaj visoki signal sa izlaza Q vodi se na komparator A3 i kako je U_{FF} veći od postavljenog praga $+V/2$, izlaz A3 postaje $+V$. Napon $+V$ je povratnom spregom doveden na integrator, i njegov izlaz dobija negativni nagib. Ako izlazni napon integratora postane negativan, povratna sprega daje novi korektivni signal ($-V$) koji preko povratne sprege menja izlaz integratora u pozitivnom smeru. Ovaj način rada označava se delta-sigma ($\Delta\Sigma$): komparator A2 detektuje razliku (Δ) između izlaza integratora i nule, a integrator sabira (Σ) izlaz A3 i analogni napon U_{UL} .

Rezultat delta-sigma modulacije je serijski niz bitova 0 i 1, tj. niz impulsa u čijem je faktoru ispune (odnos širine impulsa i perioda) sadržana digitalna informacija proporcionalna analognom ulaznom naponu. Ako je ulazni napon nula, integrator daje pozitivnu ili negativnu rampu, jer je na ulazu samo signal povratne sprege ($-V$ ili

$+V$). Izlaz flip-flopa U_{FF} osciluje između 0 i 1, nastojeći da održi izlaz integratora na nuli (slika 14.21b). Ako se na ulaz dovede mala vrednost napona U_{UL} , izlaz integratora ima tendenciju da raste u pozitivnom smeru, povratna sprega ovom porastu dodaje fiksani napon tokom određenog vremena, pa će izlazni niz impulsa imati duplo 1. Ako bi ulazni napon bio još više negativan, izlaz integratora bio još pozitivniji i niz impulsa imao bi više logičkih jedinica. Sa daljim porastom amplitude raste i broj jedinica u izlaznom signalu.



Slika 14.21. Delta-sigma pretvarač: a) elektronska šema, b) vremenski dijagrami izlaznog niza i izlaza integratora za negativni porast analognog ulaza

Paralelni binarni izlaz dobija se pomoću digitalnog NF filtera. U najprostijoj varijanti to je brojač koji daje broj jedinica u izlaznom signalu za određeni broj klok impulsa. Postoje mnogobrojne varijacije $\Delta\Sigma$ konvertora, sa više komparatora i/ili integratora. Zajedničko svim $\Delta\Sigma$ konvertorima je višestruko uzimanje uzorka 1-bitnog niza, a zatim traženja srednje vrednosti broja jedinica. Na taj način povećava se bitnost, odnosno rezolucija očitanja izlaza, ali se gubi na brzini konverzije. Na primer, greška konverzije za 24-bitni pretvarač LTC2400 je svega 4ppm za puni opseg, ali je vreme konverzije 136 ms.

U tabeli 14.3 dat je uporedni pregled karakterističnih A/D pretvarača.

TIP	BROJ BITA	BRZINA	KARAKTERISTIKA	TIP	BROJ BITA	BRZINA	KARAKTERISTIKA
ADC0802	8	110 µs	diferencijalni ulaz	ICL715	14	50 µs	paralelni
ADC0809	8	100 µs	8 multiplexiranih ulaza	ICL7136	3,5 digita	333 ms	za volimetarske displeje
AD7828	8	2,5 µs	poluparalelni, 8 ulaza	AD7576	8	10 µs	niska cena
LTC2400	24	136 ms	sigma-delta, serijski izlaz	ADC80	12	30 µs	industrijski standard
MCM14433	8	32 µs	paralelni, 11 ulaza	ADI378	16	17 µs	paralelni
	4x4	40 ms	sa dvojnim nagibom	MAX171	12	5,8 µs	izlaz sa optokaplerom

AD - Analog Devices, LTC - Linear Technology, MC - Motorola, ICL - Intersil, MAX - Maxim

Tabela 14.3. Pregled osnovnih tipova A/D pretvarača

14.4. IZBOR KODA I NOSIOCA KODA

Kôd. Pretvaranje informacije u kombinaciju diskretnih signala naziva se kodiranje. Kôd je skup pravila u skladu sa kojima se provodi dato pretvaranje. Svaka

kombinacija zapisuje se kao sekvenca uslovnih simbola – elemenata kodne kombinacije. U tehnici senzora elementi kôda su impulsi jednosmerne ili naizmenične struje, odnosno vremenske pauze između impulsa. Elementi se razlikuju po polaritetu, iznosu, intervalu vremena, fazi ili frekvenciji.

Pretvaranje merne informacije u kodnu kombinaciju ima nekoliko važnih prednosti: merna informacija predstavlja se u obliku pogodnom za računar, usaglašavaju se parametri prenosnog kanala sa informacijom, povećavaju se zaštita od šumova i pouzdanost prenosa, a smanjuju se troškovi prenosa, obrade i čuvanja merne informacije.

Izbor kôda zavisi od količine informacija koje se prenose, potrebnog vremena prenosa, parametara prenosnog kanala, namene i mogućnosti realizacije. Najznačajniji su cifarski kodovi, gde kodne kombinacije obrazuju niz cifara rastućih po mesnoj vrednosti, koja zavisi od brojnog sistema. Cifarski kôd zapisuje se u obliku:

$$N = \sum_{i=0}^{n-1} c_i b^i, \quad (14.26)$$

gde su: N kodirani broj, c_i cifre datog brojnog sistema, b baza brojnog sistema, n broj cifarskih mesta u kodnoj kombinaciji. Na primer, za dekadni brojni sistem je $b=10$, a c_i ima vrednosti 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 i 9.

Binarni kodovi imaju najveću primenu s obzirom na relativno jednostavna hardverska sredstva za aritmetičke i logičke operacije, te prenos i čuvanje informacija. Za binarni kôd opšta jednačina (14.26) ima oblik:

$$N = \sum_{i=0}^{n-1} c_i 2^i, \quad (14.27)$$

gde cifre c_i imaju vrednost 0 ili 1.

Binarni kôd n -tog reda omogućava da se dobije m^n različitih brojeva, pri čemu je najveći broj:

$$N_{\max} = m^n - 1. \quad (14.28)$$

Binarni kodovi dele se u dve velike grupe. U prvu grupu spadaju kodovi kod kojih su upotrebljene sve kombinacije. U drugu grupu spadaju kodovi gde je upotrebljen samo deo mogućih kombinacija, pa se zato nazivaju redundantni kodovi. Preostale kombinacije služe za detekciju grešaka u prenosu informacije. Redundansa se računa kao relativni odnos:

$$R = \frac{n - n_0}{n_0}, \quad (14.29)$$

gde su: n broj mesta datog redundantnog kôda i n_0 broj cifarskih mesta neredundantnog cifarskog kôda sa istom bazom i istim brojem N .

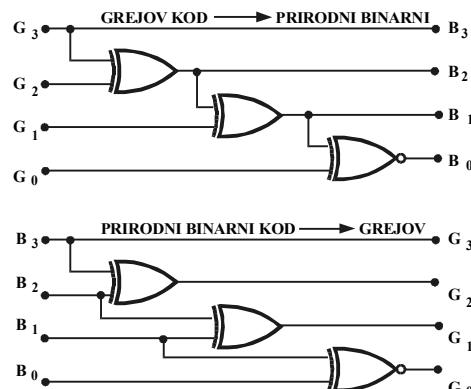
Binarno kodirani decimalni kôd ili BCD-kôd često se primenjuje u tehnici senzora. Svaka dekadna cifra 0–9 u ovom kôdu predstavljena je blokom od četiri

binarne cifre. Međutim, takav blok omogućava 16 kombinacija, što znači da je 6 kombinacija suvišno. Redundantne kombinacije mogu biti bilo kojih šest kombinacija, što znači da postoji više BCD-kodova.

Redundansa BCD-kôda zavisi od broja cifarskih mesta. Na primer, za četvorocifreni dekadni broj 9999 potrebno je $n_0=14$ cifarskih mesta neredundantnog, prirodnog binarnog kôda, odnosno potrebno je 16 cifarskih mesta u datom BCD-kôdu (4 bloka sa po 4 cifarska mesta), pa se primenom jednačine (14.29) dobija da je u ovom slučaju redundansa: $R=(16 - 14)/14 = 0,1426$.

Refleksivni kôd. Prelazak sa jedne na drugu susednu kodnu kombinaciju može biti praćen promenom više cifarskih mesta, što povećava verovatnoću nastanka grešaka očitanja takvog prelaza. Na primer, prelazu sa 3 na 4 u binarnom kôdu odgovara prelaz sa 0011 na 0100, tj. promenile su se tri cifre. Refleksivni kôd je specijalni binarni kôd kod kojeg se dve susedne kombinacije razlikuju samo po vrednosti cifre na jednom cifarskom mestu. Najpopularniji je refleksivni Grejov kôd (Frank Gray, 1953). Radi jednostavnije obrade refleksivnog kôda se prvo konverteuje u prirodni. Na slici 14.22 data je šema za konverziju Grejovog kôda u binarni pomoću ekskluzivnog ILI kola.

DECIMALNI BROJ	PRIRODNI BINARNI KOD	GREJOV KOD	BCD KOD
0	0000	0000	0000 0000
1	0001	0001	0000 0001
2	0010	0011	0000 0010
3	0011	0010	0000 0011
4	0100	0110	0000 0100
5	0101	0111	0000 0101
6	0110	0101	0000 0110
7	0111	0100	0000 0111
8	1000	1100	0000 1000
9	1001	1101	0000 1001
10	1010	1111	0001 0000
11	1011	1110	0001 0001
12	1100	1010	0001 0010
13	1101	1011	0001 0011
14	1110	1001	0001 0100
15	1111	1000	0001 0101

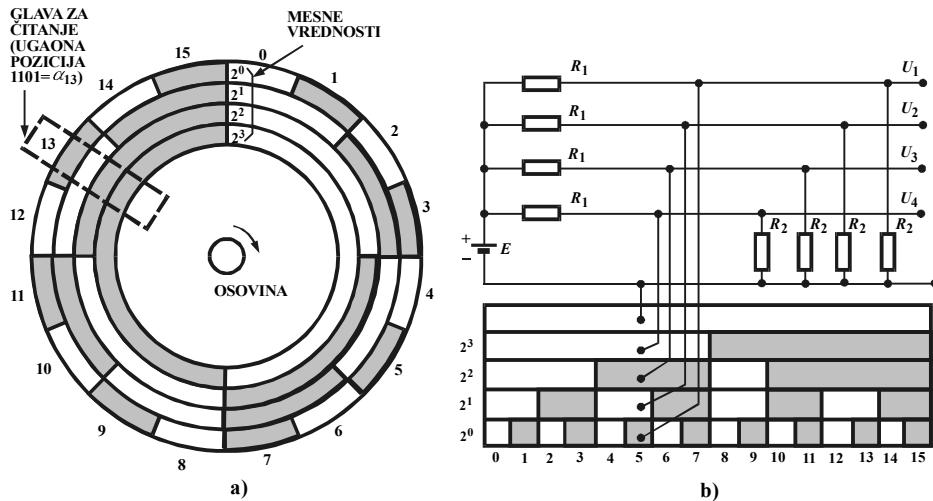


Slika 14.22. Prikaz cifarskih kodova i pretvaranje Grejovog koda u binarni

Kodna maska je nosilac binarnog kôda za direktnе digitalne senzore. Izraduje se kao kružna ili uzdužna ploča. U osnovi, ovde se radi o merenju ugaonog ili linearog pomaka, a uz pomoć analognih mehaničkih prenosnika može se meriti i sila, pritisak, nivo, temperatura i dr. Maska je nosilac binarnog kôda. To je ostvareno njenim deljenjem na koncentrične linije koje predstavljaju binarna mesta (slika 14.23). Duž svake linije izmenjuju se binarne vrednosti u vidu provodnih i neprovodnih, providnih i nepovidnih ili namagnetisanih i nenamagnetisanih delova. U skladu s tim razlikuju se kontaktne, optičke i magnetne nosioci kôda. Na slici je prikazan kodni disk sa četiri binarna mesta. Tamni delovi odgovaraju logičkim jedinicama, a svetli logičkim nulama. Ugaoni položaj osovine tako ima pridruženu kombinaciju nula i jedinica. Početni položaj je $\alpha_0=0000$ (vrednost 0), a trenutni položaj glave za čitanje odgovara poziciji $\alpha_{15}=1101$ (vrednost 13).

Što je maska izdeljena na više linija, osetljivost je veća. Uobičajeno je da na maski ima šest linija, čemu se mogu pridružiti $2^6=64$ ugaone pozicije. Praktični

razlozi onemogućavaju izradu maski sa više od desetak linija. Dalje povećanje osetljivosti postiže se postavljanjem više diskova na jednu osovinu.



Slika 14.23. Kodna maska apsolutnog enkodera: a) kružna, b) linerarna

14.5. PROŠIRIVANJE FUNKCIONALNIH MOGUĆNOSTI SENZORA

Povezivanje senzora sa mikrokontrolerom predstavlja bazu za proširivanje njihovih funkcionalnih mogućnosti s ciljem potpunije obrade signala. Softverskim rešenjima u mikrokontroleru omogućavaju se složene računske operacije nad informacionim signalima radi smanjivanja greške merenja, promene opsega, proračuna posredno merenih veličina itd.

Promena izlaznog opsega senzora je linearna operacija kojom se opseg promene informacionog signala prevodi u normirani oblik.

Ako je izlazni opseg senzora:

$$O = x_2 - x_1 , \quad (14.30)$$

rezultat transformacije treba da omogući promenu informacionog signala od y_1 do y_2 . Ovu zadaću realizuje linearna transformacija:

$$y = y_0 + kx . \quad (14.31)$$

Za date uslove transformacije dobija se sistem jednačina:

$$\begin{aligned} y_1 &= y_0 + kx_1 \\ y_2 &= y_0 + kx_2 , \end{aligned} \quad (14.32)$$

čijim rešavanjem se dobija:

$$y_0 = \frac{y_1 x_2 - y_2 x_1}{x_2 - x_1} \quad \text{i} \quad k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}. \quad (14.33)$$

Uvrštavanjem $y_1 = 0$ u jednačinu (14.33), dobija se transformisani signal sa pravom nulom, pogodan za provođenje računskih operacija, što je, inače, jedan od osnovnih razloga za promenu izlaznog opsega mernog pretvarača.

Automatska kalibracija statičke karakteristike senzora vrši se radi otklanjanja greške merenja. Na ulaz senzora dovodi se referentni signal koji je iste prirode kao i merena fizikalna veličina x_F . Izlazna vrednost upoređuje se sa nominalnom, a registrovana razlika pamti se i služi za automatsku korekciju statičke karakteristike senzora, tj. za otklanjanje greške merenja.

Postupak automatske kalibracije može se ilustrovati na primeru termoelementa. Nominalna ili deklarisana statička karakteristika termoelementa je:

$$U_n = \sum_{i=1}^n a_{ni} t^i, \quad (14.34)$$

gde je: t merena temperatura [$^{\circ}\text{C}$], U_n nominalna vrednost izlaznog termonapona [mV], a_{ni} koeficijenti statičke karakteristike [$\text{mV}/(^{\circ}\text{C})^i$].

Stvarna statička karakteristika je:

$$U_s = \sum_{i=1}^n a_{si} t^i, \quad (14.35)$$

i ona se razlikuje od nominalne za iznos greške $G(t)$, odnosno:

$$U_s(t) = U_n(t) + G(t). \quad (14.36)$$

Iz ovog proizilazi da je:

$$G(t) = U_s(t) - U_n(t) = \sum_{i=1}^n a_{si} t^i - \sum_{i=1}^n a_{ni} t^i = \sum_{i=1}^n b_i t^i, \quad (14.37)$$

gde važi relacija:

$$b_i = a_{si} - a_{ni}. \quad (14.38)$$

U određenim vremenskim intervalima na termoclement se dovode referentne temperature t_{rk} , gde je $k=1, 2, \dots, m$ broj tačaka kalibracije. Merene vrednosti termonapona $U_{sk} = U_{sk}(t_{rk})$ upoređuju se sa računski određenim nominalnim vrednostima $U_{nk} = U_{nk}(t_{rk})$. Rezultat poređenja daje vrednosti greške u kalibracionim tačkama:

$$G_k(t_{rk}) = U_{sk}(t_{rk}) - U_{nk}(t_{rk}), \quad k = 1, 2, \dots, m. \quad (14.39)$$

Koeficijenti b_i polinoma greške određuju se rešavanjem sistema jednačina:

$$\sum_{i=1}^n b_i t_{ri}^i = U_{s1} - U_{n1}$$

$$\sum_{i=1}^n b_i t_{r2}^i = U_{s2} - U_{n2} \quad (14.40)$$

.....

$$\sum_{i=1}^n b_i t_{rm}^i = U_{sm} - U_{nm} .$$

Odavde se dobijaju nepoznati koeficijenti polinoma greške:

$$b_i = D_i / D, \quad (14.41)$$

gde su: D determinanta homogenog dela sistema jednačina (14.39), a D_i determinanta koja se dobija zamenom i -tog stupca u determinanti sistema sa nehomogenim delom posmatranog sistema jednačina.

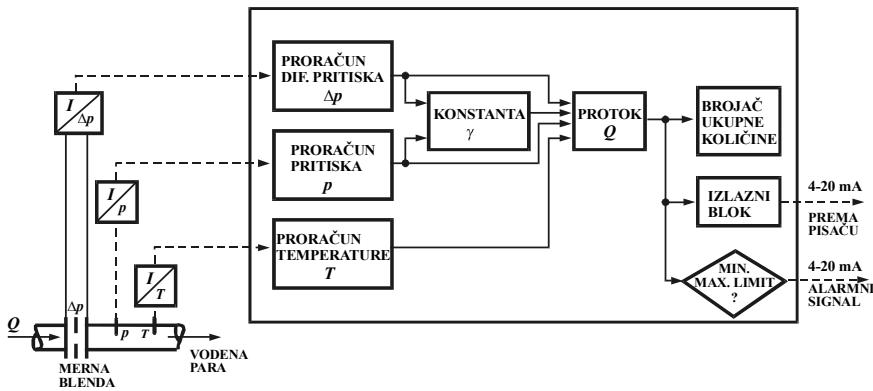
Polinom greške $G(t)$ sada je poznat, pa se svaka tekuća vrednost izlaznog signala može korigovati za iznos greške i tako, konačno, dobiti izlazni signal za dalju obradu kao $U_s(t) - G(t)$.

Proračun zavisnih veličina vrši se prilikom posrednih merenja. Fizikalna veličina x ne meri se direktno, već posredno, preko veličine y , sa kojom stoji u funkcionalnoj vezi: $y = y(x)$. Uglavnom, to su jednostavnije funkcije: nivo tečnosti H u rezervoaru meri se pomoću pritiska p na dnu rezervoara: $H = p/\rho g$, protok Q meri se pomoću pada pritiska Δp na suženju cevi (mernoj blendi): $Q = k\sqrt{\Delta p}$ i slično.

Kao primer posrednog merenja može se razmotriti merenje protoka vodene pare (slika 14.24). Protok Q računa se na sledeći način:

$$Q = CY\sqrt{\Delta p \cdot p/T}, \quad (14.42)$$

gde je: Δp pad pritiska na mernoj blendi, p apsolutni pritisak vodene pare, T temperatura, Y faktor ekspanzije i C konstanta. Informacija o Δp , p i T dovodi se u



Slika 14.24. Blok-dijagram digitalnog merača protoka vodene pare

mikrokontroler pomoću standardnih signala 4 – 20 mA. Ovakav merač protoka vodene pare, uz minimalne korekcije, primenljiv je i za druge gasove.

Razdvojeno merenje ili računanje zavisnih veličina poseban je slučaj posrednog merenja, koje se vrši pri određivanju procentnog udela sastavnih komponenata zraka, pri čemu se komponente ne mere direktno pomoću odgovarajućih senzora. Ako su veličine koje reprezentuju pojedine komponente označene sa x_i , tada je, očigledno, $\sum x_i = 1$. Pomoću senzora mere se veličine y_i , koje su, u opštem slučaju, sa x_i povezane linearnim ili nelinearnim vezama:

$$y_i = y_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (14.43)$$

Za konkretni slučaj mere se integralni pokazatelji y_1 i y_2 posmatrane zračne smese. U mikrokontroleru pamte se zavisnosti:

$$\begin{aligned} y_1 &= a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 \\ y_2 &= b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 \\ 1 &= x_1 + x_2 + x_3 \end{aligned} \quad (14.44)$$

sa poznatim koficijentima a_i i b_i . Na osnovu programa mikrokontroler sada rešava sistem jednačina (14.44) i izračunava nepoznate vrednosti komponenata analiziranog zraka:

$$x_i = D_i/D \quad i = 1, 2, 3. \quad (14.45)$$

Na kraju treba istaći da su za proširivanje funkcionalnih mogućnosti senzora, kao što su: promena opsega, automatska kalibracija, proračun zavisnih veličina i drugo, potrebni: odredena brzina analogno-digitalne konverzije, fiksna programabilna memorija dovoljnog kapaciteta, razvijena sredstva za povezivanje senzora sa mikrokontrolerom, kao i pogodan programski jezik, kako bi se omogućilo provođenje mernih i upravljačkih funkcija u realnom vremenu.

PITANJA I ZADACI

- 1) Zašto se digitalni senzori često nazivaju „inteligentnim“?
- 2) Objasniti strukturu direktnih i kompenzacionih senzora.
- 3) Nacrtati statičku karakteristiku digitalnog senzora koja ima histerezis, kao i odgovarajući dijagram greške.
- 4) Šta izražava aperturno vreme? Uporediti vremena aperture za 8-bitni i 12-bitni A/D pretvarač ako se na njihovom ulazu u najnepovoljnijem slučaju očekuje signal sa komponentom koja ima maksimalno moguću frekvenciju 1 kHz. Maksimalna amplituda takvog signala u oba slučaja jednaka je ulaznom opsegu A/D pretvarača.
- 5) Zašto se za digitalne senzore direktnog tipa (sa kvantovanjem prostornih parametara) preferira refleksivni kod Greja?

- 6) Analogni senzor ima izlazni signal 4–20 mA. Napraviti algoritam po kojem će mikrokontroler vršiti automatsku transformaciju ovog signala tako da se transformisani signal menja od 0 do 20 mA.
- 7) Koliki je opseg 4-bitnog A/D pretvarača ako je njegova rezolucija 1 V, a koliki kada je njegova rezolucija 0,25 V? Koji je put za povećanje rezolucije A/D pretvarača, a da se ne smanjuje njegov ulazni opseg, odnosno koji je put za povećanje opsega, a da se ne smanji rezolucija?

LITERATURA

1. M.F. Hordeski: *Microprocessor sensor & Control systems*, Reston Publishing Company, A Prentice-Hall Company, Virginia, 1985.
2. J.R. Leigh: *Applied digital control - Theory, design and implementation*, Prentice-Hall International, 1985.
3. G.C. Barney: *Intelligent instrumentation - Microprocessor applications in measurement and control*, Prentice-Hall International, 1985.
4. H.V. Malmstadt, C.G. Enke, G. Horlick: *Electronic measurements for scientists*, W.A. Benjamin, Inc., 1974.
5. V.A. Il'in: *Teleupravljenje i teleizmerenije*, Energoatomizdat, Moskva, 1982.
6. V.J. Končalovskij: *Cifrovye izmeritel'nye ustroystva*, Energoatomizdat, Moskva, 1985.
7. K.I. Kulikovskij, V.J. Kuper: *Metody i sredstva izmerenij*, Energoatomizdat, Moskva, 1986.
8. A.A. Abdulaev, I.A. Nabiev, M.Š. Gusejnov, D.G. Isajev: *Diskretnye sredstva probrazovanija i sbora izmeritel'noj informacii*, Mašinostroenie, Moskva, 1982.
9. N. Kako, J. Jamane: *Datčiki i mikro-EVM*, prev. sa japanskog, Energoatomizdat, Lenjingrad, 1986.
10. Dž. Vul'vit: *Datčiki v cifrovych sistemah*, Energoatomizdat, Moskva, 1981.
11. M. Popović: *Tehničke karakteristike cifarskih mernih pretvarača*, ETF, Sarajevo, 1985.
12. M. Popović: *Cifarski merni pretvarači ugaonog pomaka*, ETF, Sarajevo, 1985.
13. J.E. Cunningham, D.T. Horn: *Remote control & Automation techniques*, Tab Books Inc., 1984.
14. A.J.Diefenderfer, B.E.Holton: *Principles of electronic instrumentation*, 3rd edition, Saunders College Publishing, Philadelphia, 1994.
15. T.J.Maloney: *Modern industrial electronics*, 4th edition, Prentice Hall, New Jersey, 2001.
16. Z.M.Bučevac: *Praktikum za laboratorijske vežbe iz Diskretnih sistema automatskog upravljanja*, Beograd, 2000.
17. V.Drndarević: *Akvizicija mernih podataka pomoću personalnog računara*, Institut za nuklearne nauke Vinča, Beograd, 1999.
18. U.Beiš: *An introduction to delta-sigma converters*, www.beis.de/Elektronik/DeltaSigma.html
19. *Principi rada A/D i D/A konvertora (The educational encyclopedia)*, www.users.telenet.be/educypedia
20. *Interfacing sensors to the IBM PC* (editors: W.J.Tompkins, J.G.Webster), Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1988.
21. T.Podeszwa: *Theory of logic circuits - Implementing logic functions using MSI multiplexers and demultiplexers*, www.bszxiinf.polsl.gliwice.pl/TLC/tlc_files/ex11.doc
22. *Otvoreni kolektor*: www.acroname.com/robotics/info/concepts/opn_clet.html, www.zone.ni.com/devzone
23. *LF198/LF298/LF398, LF198A/LF398A Monolithic sample-and-hold circuits*, National Semiconductor, www.national.com, 2000.
24. *Low cost, 16-bit accurate sample-and-hold aplifier AD1154*, Analog Devices, www.
25. *Dokumentacija proizvodača*: www.ti.com, www.motorola.com, www.analog.com, www.national.com, www.maxim-ic.com, www.intersil.com

IV

SENZORI I METODE MERENJA NEELEKTRIČNIH VELIČINA

15

SENZORI LINEARNOG I UGAONOG POMERAJA

15.1. DUŽINA, POZICIJA, POMERAJ

Dužina spada u red osnovnih fizikalnih veličina i njeno merenje ima fundamentalni značaj u tehnici i ljudskoj delatnosti uopšte. Od 1983. godine jedinica za dužinu jedan metar definiše se kao dužina koju prede svetlost u vakuumu za $1/299\,792\,458$ s. Iskustvom je ustanovljeno da je dužina osnovno svojstvo pravca, krive linije i razmaka, te da se površina može predstaviti sa dve veličine dužine, a prostor sa tri veličine dužine.

Dužina se meri u opsegu od preko četrdeset dekada – od 10^{-15} m do 10^{27} m. Donja granica opsega 10^{-15} m odgovara razmerama mikročestica, a gornji deo opsega 10^{27} m odgovara galaktičkim razmerama od sto milijardi svetlosnih godina. Tehnička merenja dužine najviše se provode u mašinstvu, robotici, komadnoj proizvodnji itd.

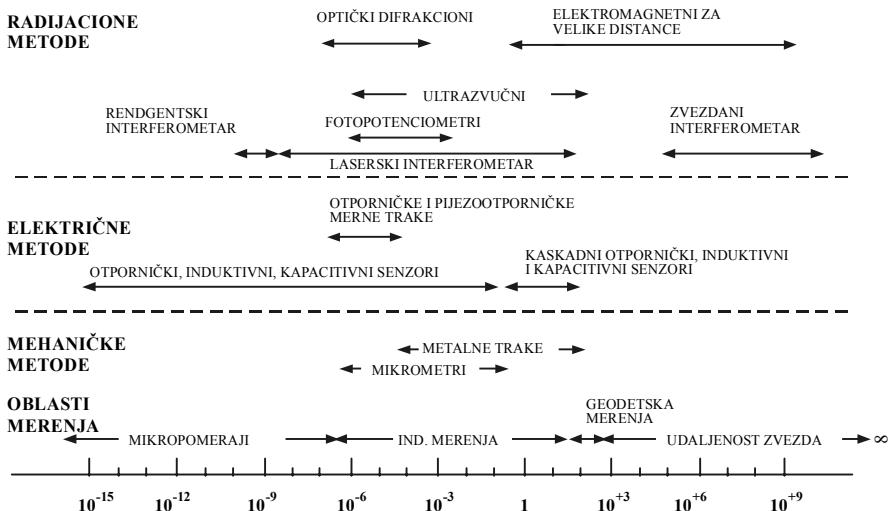
Linearni pomeraj je promena dužine između dve tačke koje leže na pravoj liniji. Primarna funkcija senzora pomeraja je merenje translatornog kretanja tela. Oni se mnogo primenjuju i kao sekundarni pretvarači u mernim uređajima u kojima se merena fizikalna veličina (mehaničko naprezanje, sila, pritisak, nivo, temperatura i dr.) pomoću primarnog senzora prvo pretvoriti u linearni pomeraj. Osim toga, merenje pomeraja sastavni je deo merenja veličina kao što su: relativni pomeraj (m/m), površina (m^2), zapremina (m^3), brzina (m/s), ubrzanje (m/s^2) i dr.

Apsolutno i relativno merenje dužine. Merenje ukupne dužine nekog tela je apsolutno merenje čiji se rezultat izražava u metrima. U tehnici često nije potrebno meriti ukupnu dužinu, već samo promenu dužine posmatranog tela (relativno merenje). Razlika između ova dva metoda ima suštinski značaj – za merenje apsolutne dužine potrebni su senzori velikog opsega, a merenje relativnog pomeranja provodi se pomoću senzora sa manjim opsegom.

Ugaoni pomeraj je promena ugaonog položaja tela koje rotira oko neke ose. U tehničkoj praksi ugaoni pomeraj meri se u opsegu od $0,0001^\circ$ do 360° . Mehaničkim vezama linearni (translatorni) pomeraj često se pretvara u ugaoni i obrnuto – ugaoni pomeraj pretvara se u linearni.

Metode merenja linearnog i ugaonog pomeraja su mehaničke, električne i radijacione. Mehaničke metode primenjuju se za merenje linearног pomeraja od

10^{-6} m do 10^2 m. Merni uređaji namenjeni za donji deo opsega su mikrometri, a za gornji deo opsega metalna traka ili žica. Tačnost mehaničkih mernih uređaja zavisi od kvaliteta izrade. Njihova tačnost danas se povećava dodavanjem elektronskih optičkih pretvarača sa digitalnim displejem (slika 15.1).



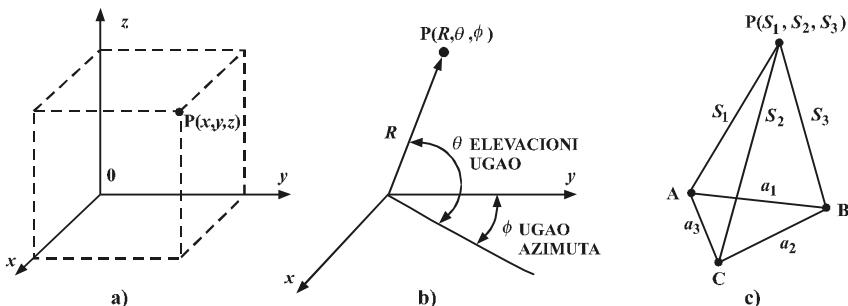
Slika 15.1. Metode i opsezi merenja dužine

Električne metode merenja pomeraja baziraju se na neposrednoj konverziji pomeraja u neki električni parametar. U lancu konverzija pomeraj može prvo da se pretvori u neku drugu fizikalnu veličinu, koja onda deluje na promenu električnih parametara. Kao senzorski elementi upotrebljavaju se kontakti, potenciometarski, tenzootpornički, induktivni, kapacitivni, pijezoelektrični, optoelektronski i drugi pretvarači kod kojih je ulazna veličina osetljiva na pomeraj. Primena kodnih pločica i kodnih maski s ciljem dobijanja digitalnog izlaznog signala povećava tačnost ovih metoda.

Radijacione (spektrometarske, talasne) metode merenja pomeraja zasnivaju se na promeni elektromagnetskog i akustičnog zračenja koje se javlja na granici između prenosnog medija i merenog tela. Promena zračenja na ovoj granici nastaje zbog različitih fizikalnih osobina prenosnog medija i materijala od kojih je napravljen telo. Prema talasnoj dužini zračenja industrijski senzori dele se na akustične (zvučne i ultrazvučne), optičke (laserske) i nuklearne (rendgenske i radioaktivne). Radijacione metode merenja pomeraja često se nazivaju prema fizikalnoj pojavi vezanoj za zračenje: lokacione, interferomatske, refraktometarske, holografске, doplerske i dr.

Izbor koordinatnog sistema. Merenje linearne i ugaoane pomeraja usko je povezano sa određivanjem koordinata nekog tela ili granice između dva tela. U pravouglom koordinatnom sistemu mere se tri koordinate (slika 15.2a). Ukupna greška određivanja pozicije zavisi od tačnosti pravih uglova između osa, od tačnosti merenja koordinata duž osa, te od tačnosti projekcija pozicije na ose. Pravougli koordinatni sistem pogodan je za opsege do 10m. Polarni koordinatni sistem pogodan

je za veće opsege. U odnosu na referentnu ravan određuju se: ugao azimuta ϕ , ugao elevacije θ i modul R (slika 15.2b). Senzori sa polarnim koordinatnim sistemom imaju rezoluciju do $1''$. Trougaoni koordinatni sistem ima trougao za bazu (slika 15.2c) . Dužine S_1, S_2 i S_3 mere se pomoću uglova koje zaklapaju sa fiksnom bazom. Merenje pozicije u ovom koordinatnom sistemu zavisi samo od tačnosti kojom je definisana trougaona baza u prostoru. Iako je ovo najtačniji metod, malo je senzora u kojima se primenjuje zbog problema praćenja promene pozicije $P(S_1, S_2, S_3)$.



Slika 15.2. Koordinatni sistemi za merenje pozicije: a) pravougaoni, b) polarni, c) trougaoni

15.2. SENZORI LINEARNOG POMERAJA

Otpornički potenciometarski senzor linearnog pomeraja zbog jednostavnosti i dobrih karakteristika mnogo se primenjuje u tehničkoj praksi. Fizikalni osnov, tipične izvedbe i šeme povezivanja razmotreni su u okviru poglavlja o otporničkim senzorima, pa će se sada istaknuti samo specifičnosti vezane za detekciju pomeraja. Otpornički potenciometarski senzor sastoji se od otpornika i pokretnog kontakta. Njegov rad zasniva se na linearnoj zavisnosti:

$$\frac{l}{L} = \frac{r}{R} = \frac{U_i}{U}, \quad (15.1)$$

gde su: L i R dužina i otpor potenciometra, l i r dužina i otpor od mesta kontakta klizača do referentnog kraja potenciometra, U napon na krajevima potenciometra, U_i izlazni napon između tačke kontakta klizača i referentnog kraja potenciometra.

Potenciometri se prave od izolatora na koji se namota žica ili nanosi otpornički sloj ugljika ili polimera. Minimalno kretanje klizača kod žičanog potenciometra koje će izazvati promenu izlaznog napona ostvaruje se prelaženjem sa navoja na navoj (sa žice na žicu). Zbog toga se izlazni napon menja skokovito. Veličina ovog skoka, prema jednačini (15.1) jeste

$$\Delta U_i = \frac{U}{n}, \quad (15.2)$$

što predstavlja rezoluciju potenciometra. Uobičajeno je da se rezolucija označava u relativnom obliku u odnosu na napajanje:

$$\frac{\Delta U_i}{U} = \frac{1}{n}. \quad (15.3)$$

Rezolucija merenja zavisi od broja navoja n po jedinici dužine. Tipična gustina namotaja je $200 - 400$ navoja/cm, čemu odgovara rezolucija $0,0025 - 0,005$ cm. Poželjno je da ukupni otpor potenciometra bude što manji kako bi opterećenje na merni instrument bilo što manje. Veća rezolucija i osetljivost ostvaruju se kad je veći napon napajanja, ali je njegova maksimalna vrednost ograničena na iznos:

$$U_{\max} = \sqrt{P_{\max} R}, \quad (15.4)$$

gde su P_{\max} maksimalna dozvoljena snaga potenciometra i R njegov otpor.

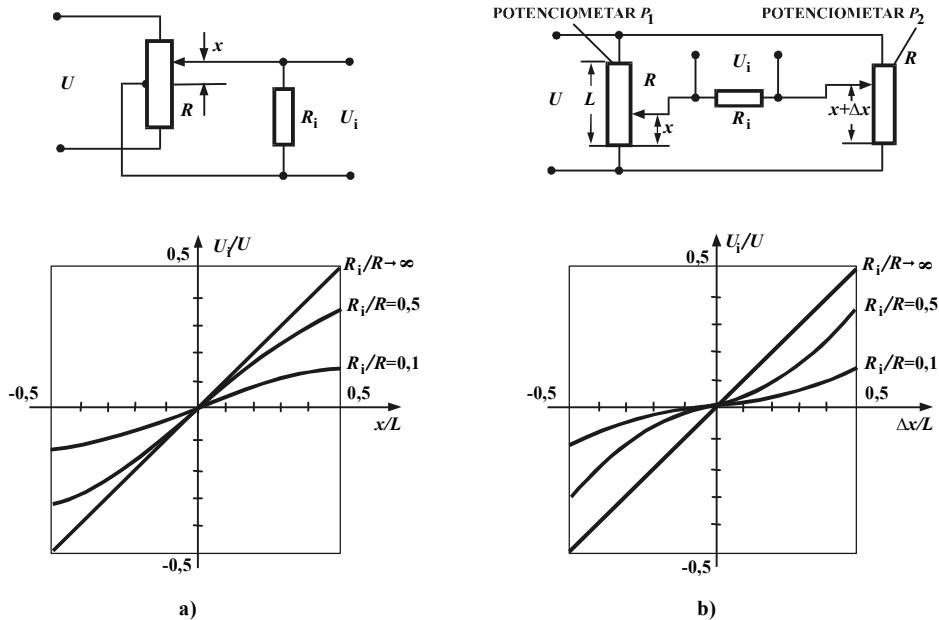
Materijal za žicu treba da ima što manji temperaturni koeficijent otpora (obično je $\alpha = (2 - 10) \cdot 10^{-5} \text{ } 1/\text{ } ^\circ\text{C}$). Dužina potenciometra je $0,004 - 2$ m. Za pomicanje klizača potrebna je izvesna sila, koja treba da je što manja kako senzor ne bi opterećivao sistem čije se pomeranje prati. Nečistoće se skupljaju na mestu kontakta klizača sa potenciometrom, što utiče na povećanje prelaznog otpora kontakta, odnosno na veće odstupanje izlaznog napona u odnosu na idealnu vrednost. Brzina pomicanja klizača ograničena je zbog trenja i habanja otpornika. Vek potenciometarskog senzora procenjuje se prema broju prelaza klizača sa jednog na drugi kraj potenciometra. Žičani potenciometri imaju 1 milion ovakvih prelaza, potenciometri sa slojem ugljika imaju 5 miliona, a potenciometri sa poluprovodničkim slojem 30 miliona. Tipična tačnost žičanog potenciometra je oko $\pm 1\%$, (za specijalne izvedbe $\pm 0,5\%$); opseg je $10 - 1500$ mm za $R = 10 - 50000 \Omega$; obnovljivost $\pm 0,4\%$, temperaturna osetljivost $\pm 0,8\%$, histerezis $0,5 - 1\%$, maksimalna dozvoljena brzina klizača $0,25$ m/s. Poluprovodnički potenciometri imaju otpor $100 - 500 \Omega$, a tačnost do $\pm 0,01\%$ opsega.

U pozicionim sistemima automatske regulacije regulirani položaj menja znak u odnosu na referentnu vrednost. Zato se umesto proste potenciometarske šeme (slika 9.4) primenjuju složenije. Na slici 15.3a prikazan je potenciometarski senzor položaja, gde se izlazni napon dobija između klizača i srednje tačke na potenciometru. Prolaz klizača kroz tu tačku odgovara promeni znaka izlaznog napona kada je napajanje istosmerno, odnosno promeni faze od 180° kada je napajanje naizmenično. Izlazni napon u funkciji relativnog položaja klizača dat je izrazom:

$$U_i = \frac{\frac{x}{L} \frac{R_i}{R}}{\frac{x}{L} - 0,5 \left(\frac{x}{L} \right)^2 + 2 \frac{R_i}{R}} U. \quad (15.5)$$

Statička karakteristika (15.5) linearna je samo kada je senzor neopterećen, tj. kada $R_i/R \rightarrow \infty$. Nehomogenost otporničkog materijala i neravnomernost namotaja onemogućavaju linearnost bolju od $0,01\%$. Što god je opterećenje veće, karakteristika je nelinearnija. Zato osetljivost nije konstantna i zavisi od opterećenja. Međutim, u okolini koordinatnog početka, gde su promene x/L male, osetljivost je konstantna i iznosi:

$$S = \left(\frac{dU_i}{dx/L} \right)_{x/L=0} = \frac{U}{2}. \quad (15.6)$$



Slika 15.3. Potenciometarski senzor: a) spoj sa srednjim izvodom, b) potenciometarski most

Ova vrednost se smanjuje kako se klizač primiče krajevima potenciometra. Smanjivanje je veće kada je odnos R_i/R manji.

U sistemima automatske regulacije sa funkcijom praćenja (servosistemima) primenjuju se dva senzora spojena u potenciometarski most (slika 15.3b). Klizač senzora P_1 prati promene zadane veličine, odnosno prati pomeranje ulazne osovine. Klizač potenciometra P_2 detektuje pomeranje izvršnog mehanizma, odnosno položaj izlazne osovine. Napon na opteretnom otporu R_i proporcionalan je razlici ova dva položaja:

$$U_i = U \frac{\frac{\Delta x}{L} R_i}{\frac{2x}{L} \left(1 - \frac{x}{L}\right) + \frac{\Delta x}{L} \left(1 - 2\frac{x}{L} - \frac{\Delta x}{L}\right) + \frac{R_i}{R}}. \quad (15.7)$$

Dobijena statička karakteristika potenciometarskog mosta zavisi od tri parametara: opterećenja R_i/R , položaja klizača x/L senzora P_1 , te razlike $\Delta x/L$ u položajima klizača senzora P_1 i P_2 . Na slici 15.3b prikazana je familija ovih karakteristika za srednji položaj klizača senzora P_1 ($x/L = 0,5$) i opterećenje kao parametar, gde je $-0,5 < \Delta x/L < 0,5$. Karakteristike su nelinearne, zbog čega je osetljivost promenljiva. U okolini koordinatnog početka, tj. za mala odstupanja $\Delta x/L$, osetljivost:

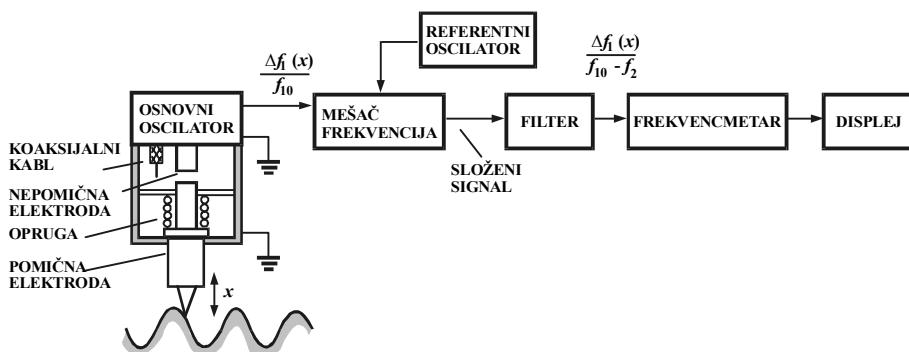
$$S = \left(\frac{dU_i}{d(\Delta x/L)} \right)_{\Delta x/L=0} = \frac{U \frac{R_i}{R}}{2 \frac{x}{L} \left(1 - \frac{x}{L}\right) + \frac{R_i}{R}}, \quad (15.8)$$

zavisi od opterećenja R_i/R i položaja x/L . Najmanja osetljivost je kad je $x/L = 0,5$, tj. kada je klizač potenciometra P_1 u srednjem položaju, a povećava se prema krajevima potenciometra, i to brže što je odnos R_i/R veći.

Kad je opterećenje čisto omsko, dinamika senzora odgovara dinamici bezinerционог bloka. Za impedantno opterećenje, koje se sastoji od aktivnog i induktivnog otpora, dinamika senzora odgovara dinamici bloka sa faznim prednjačenjem (lead-leg filteru). Osnovne mane potenciometarskih senzora su mala osetljivost, prisutnost termičkih šumova i promenljivi prelazni otpor između kontakta klizača i navoja. Međutim, zbog jednostavnosti konstrukcije, malih gabarita i cene, te mogućnosti napajanja iz istosmernog ili naizmeničnog izvora veoma mnogo se upotrebljavaju u detekciji i automatskoj regulaciji pomeraja.

Kapacitivni senzori omogućavaju merenje linearног pomeraja sa tačnošćу $\pm 0,01\%$ i rezolucijom do $1\text{ }\mu\text{m}$. Specijalne izvedbe namenjene su za merenje malih pomaka (do $0,1\text{ nm}$), odnosno velikih pomaka (reda metra). Konstruktivne izvedbe kapacitivnih senzora, kao i odgovarajuće merne šeme detaljno su razmotrene u trećem delu knjige. Dobre osobine kapacitivnih senzora pomeraja su dugovečnost, odsustvo pokretnih kontakata i trenja, te mala osetljivost na temperaturu, radijaciju i koroziju. Osnovni problem u primeni je visoka izlazna impedansa ovog senzora, odnosno podložnost smetnjama. Problem se rešava pažljivim izborom dužine i položaja priključnih kablova. Redukovanje parazitnih naboja postiže se oklapanjem. Za prikupljanje i odvodenje parazitnog naboja služe uzemljene elektrode, postavljene oko aktivnih elektroda. Merna šema ili instrument za merenje kapaciteta senzora treba da imaju visoko impedantni ulaz.

Radi povećanja linearnosti statičke karakteristike kapacitivni senzor često se stavlja u povratnu granu operacionog pojačavača. Za povećanje osetljivosti merenja primenjuju se šeme sa pretvaranjem kapaciteta u frekvenciju. U tom pogledu dobre osobine pokazuju šeme na bazi mešača frekvencija (heterodina). Na slici 15.4 prikazan je kapacitivni senzor koji meri hrapavost u opsegu $0,1 - 1\text{ mm}$, sa rezolucijom od $0,01\text{ }\mu\text{m}$. Pokretna elektroda u obliku igle prati neravnine materijala. Kratkim koaksijalnim kablom senzor je priključen na osnovni oscilator RC ili LC . Na izlazu osnovnog oscilatora dobija se signal $u_1 = U_1 \sin(\omega_1 t)$, gde je $\omega_1(x)$, tj. $f_1(x)$. Pomoćni oscilator generiše signal konstantne frekvencije ($f_2 = \text{const.}$). Kao rezultat



Slika 15.4. Kapacitivni detektor hrapavosti

mešanja na izlazu heterodina dobija se složeni periodični signal – suma koju čine harmonici sa frekvencijama $f_1, f_2, f_1 - f_2$ i $f_1 + f_2$, te viši harmonici sa navedenim frekvencijama. Filter izdvaja harmonijsku komponentu sa frekvencijom koja je jednaka razlici:

$$f_1(x) - f_2 = [f_{10} + \Delta f_1(x)] - f_2 . \quad (15.9)$$

Relativna promena frekvencije na izlazu iz filtera u odnosu na početno stanje $f_{10} - f_2$ iznosi:

$$\frac{\Delta f_1(x)}{f_{10} - f_2} , \quad (15.10)$$

pa je osetljivost za $f_{10}/(f_{10} - f_2)$ puta veća nego na izlazu iz osnovnog oscilatora. Promena frekvencije (15.9) ili (15.10) meri se frekvencometrom. Mikroprocesorski frekvencometar mogao bi da obavi niz korisnih operacija: linearizaciju, podešavanje nule i opsega i drugo.

Kapacitivni senzori pomeraja proizvode se kao sastavni deo originalne opreme, a redi kao senzorske jedinice koje se mogu naknadno ugraditi u opremu. To je logično s obzirom da se delovi opreme čije se kretanje detektuje mogu upotrebiti kao elektrode senzora. Zbog lakoće implementacije kapacitivni senzori pogodni su u naučno istraživačkim projektima, u fazi gradnje prototipa nekog uređaja.

Elektromagnetični senzori pomeraja prave se u formi pasivnih induktivnih i međuinduktivnih (transformatorskih) senzora ili u formi aktivnih indukcionih.

Elektromagnetični induktivni senzori sastoje se od kalema čija se induktivnost menja sa promenom rastojanja između jezgra i kotve. Objekti od feromagnetnog materijala najčešće imaju ulogu kotve. Posebne izvedbe omogućavaju praćenje debljine trakastih materijala. Kada je kalem deo mosnog ili oscilatornog kola, promena induktiviteta služi za detekciju prisustva objekta na tačno određenoj udaljenosti. Ovakvi induktivni senzori nazivaju se blizinski ili proksimi senzori. Tipičan merni opseg induktivnih senzora je $0 - 10\text{ mm}$, osetljivost 80 mV po 1 V napona napajanja, a tačnost $\pm 0,5\%$ opsega. Mogu se pratiti pomeraji sa frekvencijom do 1 kHz , ali treba voditi računa o pojavi mehaničke rezonanse.

Međuinduktivni senzori pomeraja grade se kao diferencijalni transformatori. Mnogobrojne su izvedbe ovih senzora. U tehničkoj praksi posebno mesto zauzima linearni varijabilni diferencijalni transformator *LVDT*. Primjenjuje se za detekciju malih pomeraja, reda nanometra, a maksimalni opseg je do $\pm 250\text{ mm}$. To su robustni i pouzdani senzori, sa tačnošću i do $\pm 0,5\%$ opsega. Na slici 15.5a prikazan je *LVDT*-senzor sa jednim primarnim i dva jednakata sekundarna namotaja. Objekat čije se pomeranje detektuje povezan je sa pomičnim feromagnetskim jezgrom.

Naizmenični napon napajanja priključen na primaru:

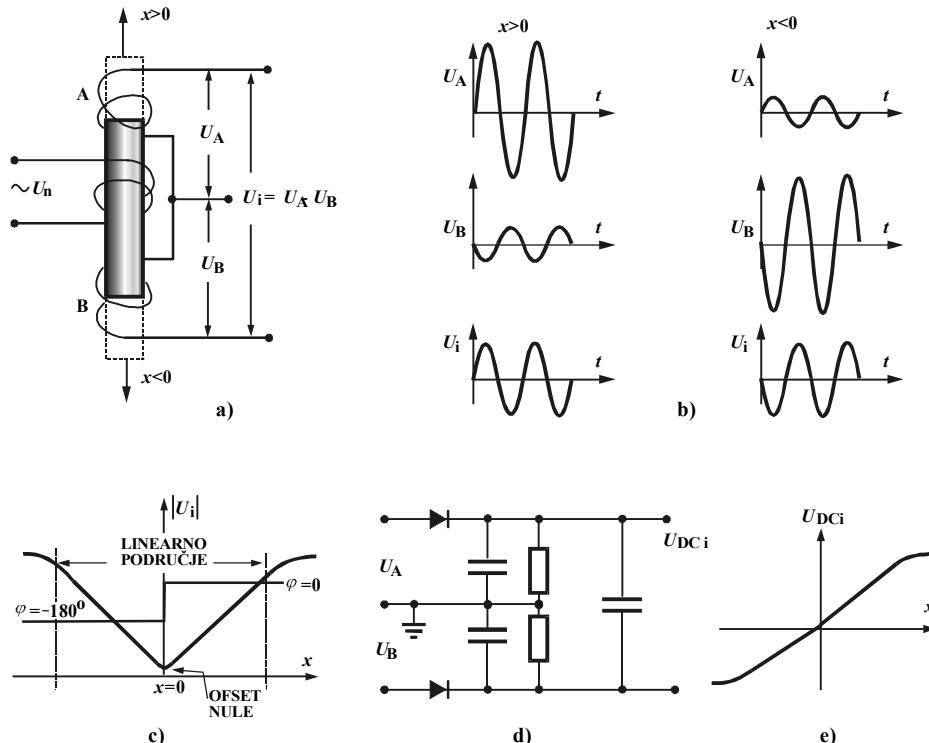
$$u = U_n \sin(\omega t) , \quad (15.11)$$

formiraće naizmenično magnetno polje, pa će se na sekundarnim navojima indukovati naponi:

$$u_A = K_A \sin(\omega t - \varphi) \quad i \quad u_B = K_B \sin(\omega t - \varphi), \quad (15.12)$$

gde vrednosti parametara K_A i K_B zavise od međuinduktivne veze primara i sekundara, odnosno od položaja jezgra. Budući da su sekundarni navozi jednaki ($K_A = K_B = K$), za centralni položaj jezgra $x=0$ biće:

$$u_A = u_B = K \sin(\omega t - \varphi). \quad (15.13)$$



Slika 15.5. Linearni varijabilni diferencijalni transformator: a) princip rada, b) takošni oblici naponi na sekundarima i izlazu za $x < 0$ i $x > 0$, c) staticka karakteristika, d) kondicioner izlaznog signala, e) staticka karakteristika sa jednosmernim izlaznim signalom

Sekundarni navozi suprotno su motani, odnosno spojeni su u opoziciju, pa izlazni napon za $x=0$ iznosi:

$$u_i = u_A - u_B = 0. \quad (15.14)$$

Pomakne li se jezgro iz centralnog (nultog) položaja $x=0$ naviše za rastojanje x , vrednosti parametara su $K_A = K_1$ i $K_B = K_2$, a izlazni napon:

$$u_i = (K_1 - K_2) \sin(\omega t - \varphi). \quad (15.15)$$

Ako se kretanje vrši naniže za rastojanje x , tada su $K_A = K_2$ i $K_B = K_1$, pa je izlazni napon

$$u_i = (K_2 - K_1) \sin(\omega t - \varphi) = (K_1 - K_2) \sin[\omega t + (\pi - \varphi)] . \quad (15.16)$$

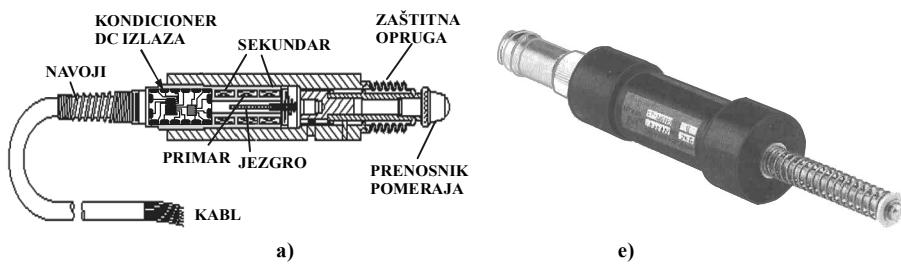
Ovo razmatranje pokazuje da pomak jezgra za $+x$ i $-x$ iz nultog položaja indukuje izlazne napone iste amplitude i faza koje se razlikuju za 180° (slika 15.5b). Prema tome, kod LVDT-senzora amplituda izlaznog napona proporcionalna je poziciji, a njegova faza smeru kretanja (slika 15.5c). Proporcionalnost je linearna

$$u_i = Cx , \quad (15.17)$$

gde je C koeficijent proporcionalnosti, koji zavisi od konstruktivnih svojstava senzora.

Da se dobije jednosmerni izlazni signal U_{DC} neophodna je amplitudna demodulacija i detekcija faze izlaza U_i . Za ovu namenu može da se upotrebi jednostavno kolo prikazano na slici 15.5d. Diode poluvalno ispravljaju naizmenične napone U_A i U_B , a kondenzator i otpornik deluju kao niskopropusni filter. Izlazni kondenzator veće kapacitivnosti stavlja se za eliminaciju napona bruhanja (*ripple*).

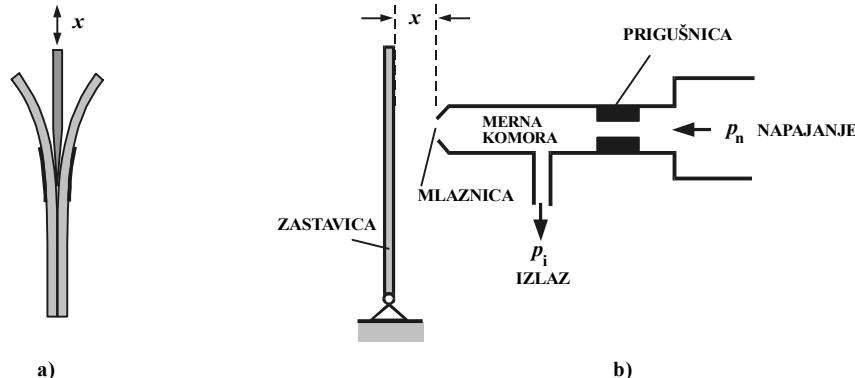
LVDT-senzor pokazuje dobre osobine u tehničkoj praksi. Robustan je i pouzdan, neosetljiv na mehaničke udare i vibracije (slika 15.6). Tipična tačnost je $\pm 0,5\%$, opseg od $\pm 100\mu\text{m}$ do $\pm 250\text{mm}$, relativni pomeraj $\Delta x/x = 1,5$, osetljivost $10-20\text{ mV/mm}$ po jednom voltu napona napajanja, frekvencija napona napajanja od 50 Hz do nekoliko kiloherca, maksimalna radna temperatura do 500°C . Dinamički pomeraju mogu se pratiti najviše do frekvencije 1 kHz . Može se upotrebljavati i u agresivnoj sredini pod uslovom da se navoji oblože zaštitnim epoksi-smolama. Zbog prisustva viših harmonika u naponu napajanja i u nemogućnosti da se naprave potpuno jednaki sekundarni navoji, izlazni signal za nultu poziciju nije jednak nuli. Njegova vrednost iznosi do 1% izlaznog opsega. RVDT ima slične metrološke pokazatelje na tipičnom mernom opsegu $\pm 40^\circ$.



Slika 15.6. LVDT: a) konstrukcija, b) tipični izgled

Senzori pomeraja na bazi tenzoelemenata zasnivaju svoj rad na promeni otpora zbog deformacije. Primenjuju se za merenje malih pomeraja ($0-50\mu\text{m}$) koji nastaju kao rezultat primarnog pretvaranja u instrumentima za merenje nivoa, pritiska, sile, momenta itd. Tačnost je do $\pm 0,15\%$ opsega. Životni vek ovih senzora ograničen je obično na 30 miliona reverzibilnih ciklusa iz mehanički nenapregnutog u napregnuto stanje.

Veći opseg pomeranja prvo se mora smanjiti na manji da bi se prilagodio mogućnostima tenzoclementa. Na slici 15.7a prikazan je jednostavan način merenja pomeraja do 50 mm.



Slika 15.7. Senzor pomeraja: a) senzor sa tenzoelementom za praćenje većih pomeraja, b) senzor na bazi pneumatskog pojačavača

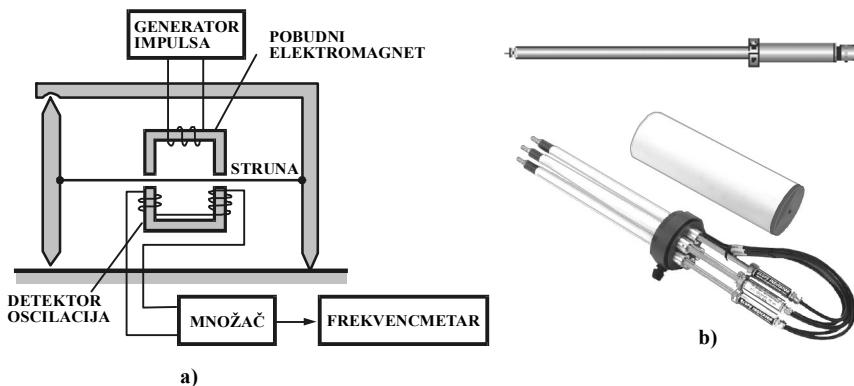
Pneumatski pojačavač sa prigušnicom i zastavicom predstavlja senzor koji pretvara mehanički pomeraj u pneumatski signal (slika 15.7b). Pomično telo spojeno je sa zastavicom, koja se pomera u intervalu $0 < x \leq d/4$. Tipičan merni opseg je $\pm 0,05$ mm, a rezolucija $0,01 \mu\text{m}$. Fluid napognjog pritiska $p_n = (0,1 - 0,25)$ MPa teče kroz fiksnu prigušnicu i ističe kroz mlaznicu prečnika d u zavisnosti od položaja zastavice. Informacioni signal je pritisak p_i u mernoj komori. Statička karakteristika $p_i = f(x)$ je nelinearna i inverzna, ali je na radnom delu linearna. Senzor se ponaša kao aperiodski blok prvog reda sa vremenskom konstantom $T = 0,01 - 0,1$ s.

15.3. SENZORI ZA DINAMIČKE POMERAJE

Struna-senzor sastoji se od zategnute žice kao mehaničkog vibrirajućeg elementa čija se prirodna frekvencija oscilovanja menja u zavisnosti od deformacije žice Δl (slika 15.8a). Deformacija nastaje zbog pomeranja tela. Iz generatora se doveđe impuls na elektromagnet, koji privuče strunu i onda je prepusti vlastitim oscilacijama frekvencije

$$f_n = \frac{1}{2l} \left(\frac{\sigma}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \left[1 + \frac{d}{2l} \left(\frac{E}{\sigma} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{\pi^2}{16} \left(\frac{d}{l} \right)^2 \frac{E}{\sigma_0} \right] \approx \frac{1}{2l} \left(\frac{\sigma}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \approx \frac{1}{2l} \left(\frac{E \Delta l}{\rho l} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (15.18)$$

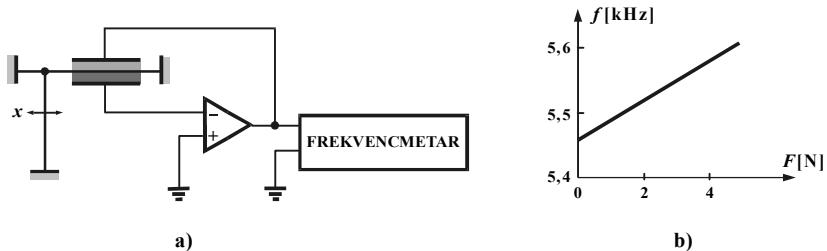
Promena frekvencije prati se pomoću indukcionog senzora u kojem se zbog kretanja strune između navoja i stalnog magneta menja magnetni otpor, te se indukuje odgovarajući naizmenični napon. Priključivanjem na pretvarač frekvencija – struja dobija se signal pogodan za slanje na veće udaljenosti. Blok sa funkcijom kvadriranja (množač) neophodan je da bi se u skladu sa jednačinom (15.18) izdvojila informacija o Δl .



Slika 15.8. Senzor sa vibrirajućom žicom: a) konstrukcija, b) sonda sa jednim i više senzora

Osnovna namena struna-senzora je distancionalno merenje pomeraja, sile, momenta, ugla, pritiska i temperature u složenim uslovima. Zbog visoke pouzdanosti i zanemarljivog drifta primjenjuje se za merenje geomehaničkih i strukturnih deformacija. Na primer, za praćenje deformacija u svodu tunela koristi se ekstenzometar sa više struna (slika 15.8b). Senzori kod kojih se struna pobuduje povremeno služe za statička merenja, a oni sa stalnim pobudivanjem strune namenjeni su za dinamička merenja. Prirodna frekvencija strune je $700 - 1000\text{ Hz}$, a na krajevima deluje sila, $40 - 100\text{ N}$. Tačnost senzora je $\pm 0,025\%$ na opsegu $60 - 100\text{ mm}$.

Pijezoelektrični senzori, zbog načina rada, isključivo mogu da mere dinamičke promene. Na oblogama pijezoelektričnog senzora javlja se naboj proporcionalan mehaničkoj deformaciji, nastaloj kao rezultat delovanja neke promenljive sile. Pijezoelektrični senzori pomeraja slični su struna-senzoru, s tim što su struna i elektromagneti zamjenjeni bimorfni pijezoelektričnim elementom.



Slika 15.9. Pijezoelektrični senzor za merenje vibracija: a) osnovna šema, b) statička karakteristika

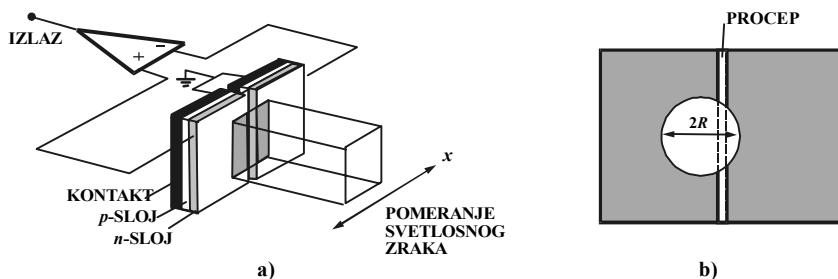
Na slici 15.9 prikazan je senzor sa bimorfnim pijezoelektričnim elementom. Delovanje sile prenosi se na središnju elektrodu koja je učvršćena na svojim krajevima. Parametri pijezoelementa u povratnoj grani operacionog pojačavača, mehaničkih veza i samog pojačavača projektuju se tako da se senzor nalazi u režimu vlastitih oscilacija. U zavisnosti od promene sile, tj. deformacije, menja se koeficijent krutosti elastičnog sistema, a time i frekvencija oscilacija. Prirodna frekvencija može se odrediti i analitički iz prenosne funkcije senzora. Zbog složenosti proračuna zavisnost frekvencije od sile često se određuje eksperimentalno. Statička karakteristika je linearna do granične vrednosti sile, da bi potom postala nelinearna.

Optoelektronski senzori upotrebljavaju se za detekciju pomeraja u širokom opsegu od 1 nm do 10^9 m. U tehničkoj praksi intenzivno se primenjuju realizacije sa klasičnim optoelektronskim elementima kao što su fotodiode, laserske diode, fotoćelije, fotopotenciometri i fototranzistori. Optičko vlakno, laserski interferometri i moarove linije primenjuju se za izgradnju specijalnih senzora pomeraja.

Klasični optoelektronski elementi pogodni su za detekciju pomeraja okomito na kretanje zraka svetlosti. Izvor koherentne svetlosti, na primer laserska dioda, smešten je na objektu čije se kretanje prati. Fotopotenciometar kao optički prijemnik pogodan je za merenje pomeraja sa frekvencijom manjom od 100 Hz, jer proces sa unutrašnjim fotoefektom ima vremensku konstantu veću od 10 ms. Znatno je brži odziv fotoelementa, jer je njegova vremenska konstanta reda μ s.

Senzori pozicije laserskog zraka. PSD (Position Sensitive Detector) su senzori pomeraja laserskog zraka. Primjenjuju se u CD/DVD uređajima za fokusiranje i praćenje zapisa po stazama, u robotici za pozicioniranje radnog alata, u raketama za navodenje prema toplom cilju, u optičkim daljinarama, te u mnogim laserskim uređajima za precizno poravnanje objekta i cilja. Razlikuju se višesegmentni PSD i PSD sa lateralnim efektom.

Višesegmentni PSD senzori su zapravo fotodiode osetljive na zračenje $\lambda = 0,8 - 1,7 \mu\text{m}$, sa velikom prijemnom površinom $77 - 100 \text{ mm}^2$ podeljenom na dva ili četiri segmenta sa procepom širine $10 - 30 \mu\text{m}$. Na slici 15.10a prikazan je jednodimenzionalni senzor sa dve identične fotodiode u diferencijalnom spoju. U nultom položaju zrak podjednako obasjava obe diode, pa je izlazni napon nula nula. Sa pomeranjem zraka na jednu stranu, diferencijalni izlaz proporcionalno raste sve dok zrak celom svojom širinom ne obasja jednu fotodiodu. Smer kretanja prati se pomoću polariteta izlaznog napona. Kada zrak sasvim pređe na jednu fotodiodu, izlazni napon zadržava maksimalnu vrednost. Osetljivost u ovakvoj šemi zavisi od intenziteti svetlosnog zraka, tj. od udaljenosti lasera. Ovaj problem rešava se jednostavnim kolima pomoću kojih se na osnovu izlaznih signala segmenata A i B formira signal $(A-B)/(A+B)$, koji je dat u odnosu na snagu zračenja lasera $A+B$. Radno područje ograničeno je na dvostruku širinu svetlosnog zraka (slika 15.10b). Senzor ima izvanrednu rezoluciju: na primer, pomeranje zraka prečnika $20 \mu\text{m}$ može da se detektuje rezolucijom boljom od $0,1 \mu\text{m}$. Podatak o dimenziji poprečnog preseka zraka obično nije poznat unapred i zato se na licu mesta jednostavnim postupkom prvo izvrši kalibracija. Senzor se montira na nosač i onda se napravi



Slika 15.10. PSD-senzori: a) jednoosni senzor; b) dimenzije zraka i opseg

određeni pomeraj, na primer $100 \mu\text{m}$. Neka je za taj pomeraj izlazni signal 10% u odnosu na maksimalni X_{MAX} , tada je:

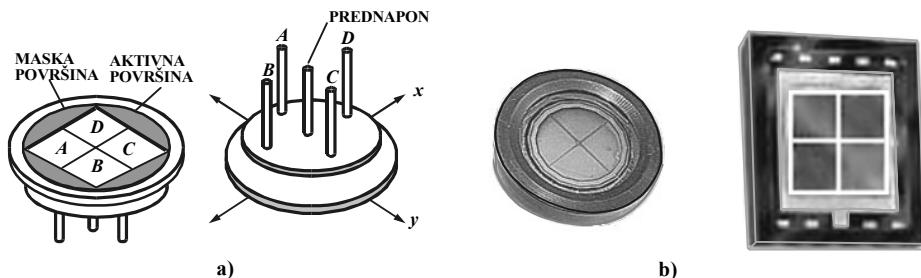
$$100 \mu\text{m} \dots 10\% \quad i \quad X_{\text{MAX}} \dots \dots \dots 100\%, \quad (15.19)$$

odakle se dobija da je puni opseg $X_{\text{MAX}} = 100 \mu\text{m} \cdot 100\% / 10\% = 1000 \mu\text{m}$.

Kvadrantni senzor sa četiri segmenta, tj. četiri nezavisne fotodiode, meri pomeraj laserskog zraka duž ose x i y . Ima četiri katode (A, B, C, D) i zajedničku anodu (slika 15.11a). Informacija o poziciji laserskog zraka računa se u odnosu na ukupnu snagu zračenja lasera $A+B+C+D$:

$$X = \frac{(B+D)-(A+C)}{A+B+C+D} \quad Y = \frac{(A+B)-(C+D)}{A+B+C+D}, \quad (15.20)$$

tako da promena snage zračenja usled približavanja ili udaljavanja lasera ne deluje na osjetljivost. Tipične izvedbe kvadrantnih senzora prikazane su na slici 15.11b.

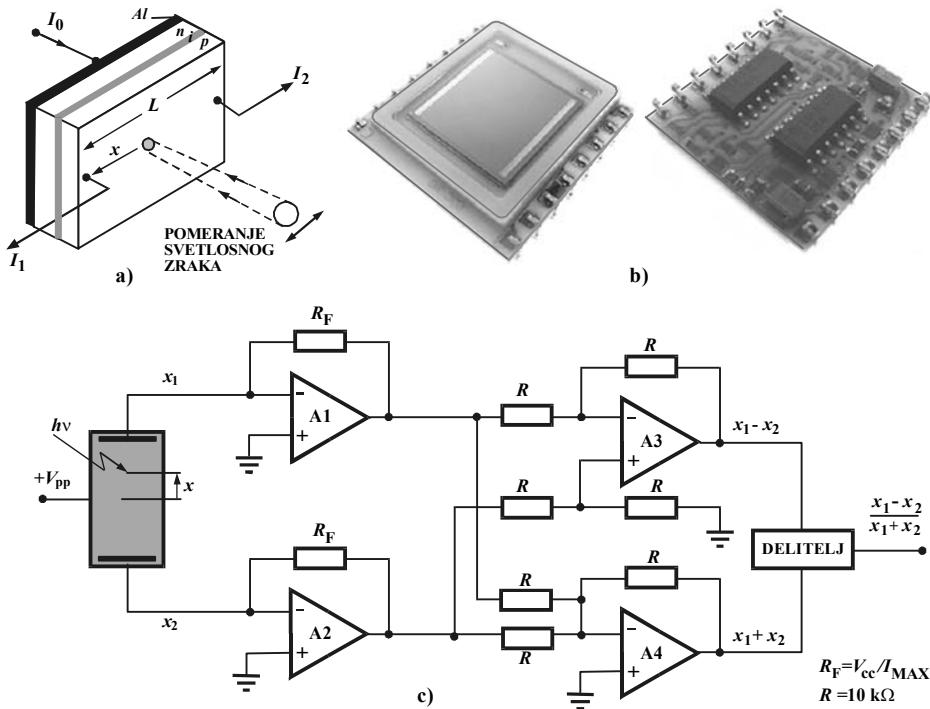


Slika 15.11. Kvadrantni senzor: a) konstrukcija, b) tipične izvedbe

PSD senzori sa lateralnim efektom su planarne PIN fotodiode sa dva tačkasta omska kontakta na krajevima aktivne površine, koju čini p -sloj. Treći kontakt je na alumijumskom metalnom sloju na poledini n -sloja (slika 15.12a). Kada na fotodiodu padne laserski zrak, javlja se struja I_0 . Otpor između kontakata na aktivnoj površini ponaša se kao strujni delitelj, pa se struja I_0 deli na I_1 i I_2 . Odnos ovih struja zavisi od mesta x gde je zrak pao: $I_2 = I_0(L/2+x)/L$ i $I_1 = I_0(L/2-x)/L$. Odavde se može izračunati pozicija laserskog zraka x :

$$x = \frac{I_2 - I_1}{I_1 + I_2} \cdot \frac{L}{2}. \quad (15.21)$$

Na slici 15.12b prikazana je tipična izvedba PSD senzora sa lateralnim efektom, a na slici 15.12c elektronska šema za formiranje izlaznog signala u skladu sa jednačinom (15.21). Pojačavač A1 i A2 služe za pretvaranje struje u napon, a vrednost otpornika R_F zavisi od intenziteta upadane svetlosti. $R_F = V_{CC}/I_{MAX}$. Pojačavač A3 formira razliku, pojačavač A4 sumu, a delitelj daje informaciju o poziciji nezavisno od fluktuacija u intenzitetu laserskog zraka. Slična šema koristi se i za višesegmentne PSD senzore.



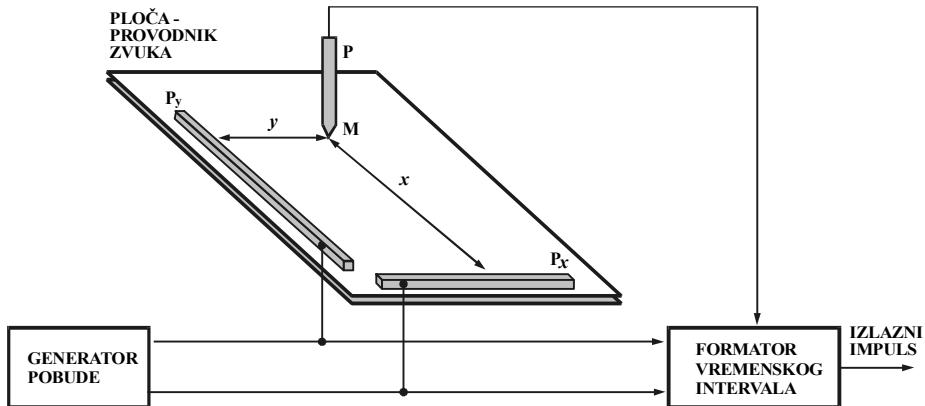
Slika 15.12. PSD sa lateralnim efektom: a) jednodimenzionalni senzor, b) senzorski čip (izgled gornje i donje strane), c) elektronska šema za formiranje izlaznog signala o poziciji x

15.4. SPECIJALNI SENZORI LINEARNOG POMERAJA

Koordinatni senzori (koordinatometri) određuju položaj objekta u izabranom koordinatnom sistemu, odnosno prate kretanje objekta po koordinatama tog sistema. Simultano praćenje kretanja po koordinatama najčešće se ostvaruje vremensko-koordinatnom metodom, tako što se u određenim vremenskim intervalima mere koordinate predenog puta i izračunava odgovarajući pomeraj. Metoda je primenljiva za bilo koji koordinatni sistem, a fizikalni principi njegove realizacije mogu biti različiti. Na primer, optoelektronski detektori XY pozicije prave se na bazi PSD senzora sa četiri segmenta, odnosno sa dva para elektroda na prijemnoj površini.

Pijezoelektrični koordinatomeri za male pomeraje (reda milimetra) mogu se praviti na bazi senzora prikazanog na slici 15.8. Interesantno je da veliku perspektivu imaju pijezoelektrični koordinatomeri za merenje većih pomeraja, do nekoliko stotina milimetara (slika 15.13). Na ploči koja je dobar provodnik zvuka nalaze se šipke P_x i P_y postavljene medusobno okomitno. One su napravljene od tankoslojne pijezokeramike. Rade na principu obratnog pijezofekta i imaju ulogu generatora ultrazvuka. Ultrazvučni talasi pobuduju se kontrolisanim impulsima. Front talasa kreće se, na primer, po osi x i dolazi u tačku skeniranja M , u kojoj se trenutno nalazi pokretni objekat. Na objektu je pričvršćen pijezoelektrični senzor P – prijemnik

ultrazvučnih talasa. Zahvaljujući akustičnom kontaktu između ploče i prijemnika P , energija talasa predaje se pijezoprijemniku. Signal sa njegovog izlaza ide na blok za formiranje vremenskog intervala. Trajanje intervala jednako je vremenu prelaska talasa od predajnika P_x , odnosno P_y do prijemnika P . Budući da je brzina rasprostiranja ultrazvučnih talasa kroz ploču konstantna, navedeni vremenski interval biće proporcionalan rastojanju od predmeta do tačke M , tj. koordinati te tačke.



Slika 15.13. Pijezelektrični koordinatomer

Pobudni signali slede po nekoj frekvenciji. Već nakon prve poluperiode oscilacija pijezoprijemnika formira se izlazni impuls. Amplituda raste sve dok se ne uspostave stacionarne oscilacije i tada iznosi:

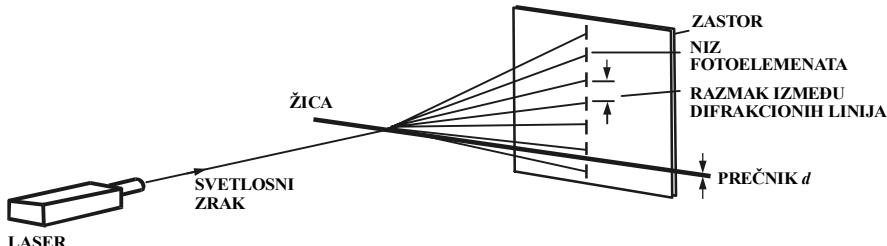
$$U = \frac{an}{m_p f_{np}}, \quad (15.22)$$

gde su: m_p masa pijezoprijemnika, f_{np} prirodna frekvencija pijezoprijemnika, n broj impulsa u prelaznom procesu od prvog izlaznog impulsa do uspostavljanja stacionarnih oscilacija i a koeficijent porasta napona izlaznih impulsa u toku prelaznog procesa.

Istraživanja su pokazala da tačnost i rad opisanog koordinatomera jako zavise od impedantne prilagođenosti pijezopredajnika i ploče kao prenosioca ultrazvuka. Eksperimentalno je utvrđeno da se maksimalan izlazni signal dobija kada je frekvencija pobuđenog signala jednak vlastitoj frekvenciji ploče i kada je pijezoprijemnik u rezonansi sa akustičnim oscilacijama. Dobre osobine vremensko-koordinatnog senzora su relativno jednostavna konstrukcija, tačnost do 0,5% i visoka pouzdanost. Glavni nedostatak je nagnutost pijezoprijemnika, usled čega se menja akustični otpor na kontaktu sa pločom. Ovaj nedostatak može se otkloniti složenijom konstrukcijom. Obično se u merni kanal postavlja kontaktni prekidač, koji je zatvoren samo kada je prijemnik u strogo vertikalnom položaju.

Optoelektroniski senzori sa difrakcijom su specijalni senzori, pogodni za detekciju promene prečnika tankih žica (slika 15.14). Laser je ovde tačkasti izvor koherentne svetlosti, koja pada na neprozirnu nit – metalnu žicu promenljivog prečnika d . Na određenoj udaljenosti x od žice postavljen je zastor, na kome se javljaju složene linije difrakcije. Širina linija difrakcije, kao i rastojanje između njih,

zavise od rastojanja između zastora i žice, talasne dužine svetlosti iz lasera, te od prečnika žice d . Interferencijska slika menja se sa promenom prečnika d , a detektuje se sekvenčnjim skaniranjem niza fotoclemenata.



Slika 15.14. Optoelektronski senzor sa difrakcijom

Senzori sa moar-tehnikom. Moar je pojava tamnih i svetlih pruga (moar-pruga) koje nastaju kada svetlost prolazi kroz dve paralelne difrakcione rešetke, zakrenute za mali ugao α (slika 15.15.a). Kako se ugao α smanjuje, pruge postaju šire, a svetli razmak između njih veći. Prilikom pomicanja jedne rešetke u odnosu na drugu, pomeraju se i moar-pruge, ali tako da je njihov pomak desetine pa i stotine puta veći nego što je pomak rešetke. Razmak između linija rešetke je konstanta rešetke i obično je $w_1 = w_2 = w$. Kada se rešetke pomere za w , moar-pruge pomere se za korak:

$$W = kw, \quad (15.23)$$

gde je k koeficijent uvećanja pomeraja pruga. Za linearne difrakcione rešetke koeficijent uvećanja pomeraja je:

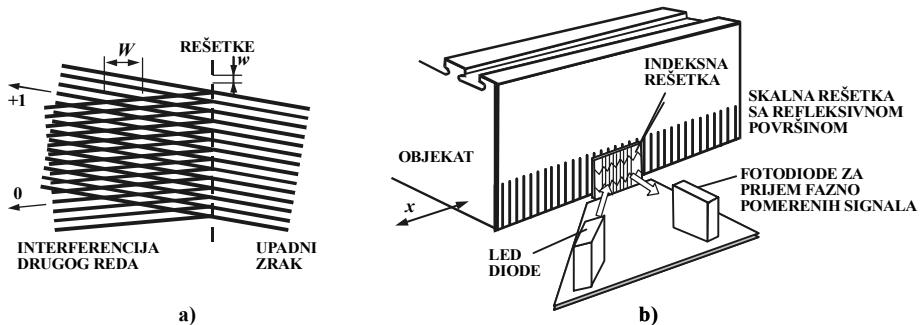
$$k = \frac{1}{2 \sin(\alpha/2)}, \quad (15.24)$$

i za dovoljno mali ugao α iznosi:

$$k = 1/\alpha. \quad (15.25)$$

Opisani način merenja pomeraja svodi se na brojanje jednoliko rasporedenih pruga pomoću reverzibilnog brojača. Moar-efekat poznat je odavno, a ime je dobio po naročitoj tkanini protkanoj sjajnim valovitim šarama. Njegova praktična primena u tehniči merenja malih pomeraja počela je sa razvojem fotolitografskih postupaka za proizvodnju difrakcionih rešetaka sa 500–2500 proreza po milimetru, što omogućava merenje pomeraja 0,4–2 μm. Najveće greške uzrokuju translacije rešetaka u vertikalnom smeru i neželjena translacija duž merne (horizontalne) ose. Greška uzrokovana rotacionim kretanjem rešetaka oko ortogonalnih osa nije značajna. Difrakcione linije mogu biti rasporedene radikalno i tada su moar-linije koncentrične.

Senzori sa moar-tehnikom imaju dve rešetke, od kojih se jedna kreće. Skalna rešetka učvršćena je na objektu čije se kretanje prati i mora biti dovoljno dugačka da pokrije celo merno područje. Indeksna rešetka, svetlosni izvor i fotodiode čine uredaj za čitanje. Indeksna rešetka može biti sasvim kratka. Detekcija moar-linija ostvaruje se optoelektronskim sredstvima, bilo amplitudnim ili faznim metodom čitanja.



Slika 15.15. Senzor na principu tehnike moara: a) nastanak moar-pruga, b) senzor na alatnoj mašini

Amplitudni metod čitanja položaja moar-pruga provodi se osvetljavanjem fotodiode, tako što uski zrak svetlosti prolazi kroz skalnu i indeksnu rešetku, u čijem fokusu je postavljena fotodioda. Praktičnije je da skalna rešetka ima refleksivnu površinu, jer je tada svetlosni izvor i prijemnik moguće montirati sa iste strane uređaja (slika 15.15.b). Položaj pruge fiksiran je diskretnim iznosom Δ , te je za amplitudni način čitanja potreban broj fotodioda:

$$n = W/\Delta . \quad (15.26)$$

Fazni metod omogućava da se prati i smer kretanja moar-pruga. Na indeksnoj rešetki smeštene su 4 fotodiode unutar koraka W . Ako skalna rešetka napravi pomak za jednu konstantu w , moar-pruga napravi pomak za jedan korak W i prede preko svih fotodioda. Pri tome svaka dioda generiše signal koji predstavlja superpoziciju harmonijske i stalne istosmerne komponente. Signali fotodioda su pomereni po fazi za $\pi/2$. Elektronska šema za obradu fotostružnika realizuje se na različite načine. Bitno je da se ostvare razlike između signala fazno pomaknutih za $\pi/2$. Fazno zaostajanje ili prednjačenje odgovara pomeranju skalne rešetke u jednom ili drugom pravcu. Prema tome, brojač za brojanje moar-pruga i ovde treba da je reverzibilni.

Najveće greške uzrokuju translacije rešetaka u vertikalnom smeru i neželjena translacija duž merne (horizontalne) ose. Greška uzrokovana rotacionim kretanjem rešetaka oko ortogonalnih osa nije značajna.

Linearni induktosin je inkrementalni enkoder visoke rezolucije, napravljen kao specijalni tip transformatorskog elektromagnetskog senzora. Ime senzora je zaštićena marka firme Farrand. Primarni navoj (skala) napravljen je od tanke žice, savijene u obliku povorke pravouglih impulsa (slika 15.16a). Tipična dužina jednog ciklusa (koraka) je $s = 2 \text{ mm}$, a skala može biti dugačka i nekoliko metara. Duž skale, na rastojanju od $0,125 \text{ mm}$, kreće se pokretni deo senzora (klizač), koji je pričvršćen za objekt čije se kretanje prati. Klizač je širok oko 50 mm i nosi dva odvojena navoja, pomerena medusobno za četvrtinu ciklusa, što odgovara faznom pomaku od 90° . Ovi navozi su istog oblika kao i primarni. Skalni navoj napaja se naizmeničnim naponom:

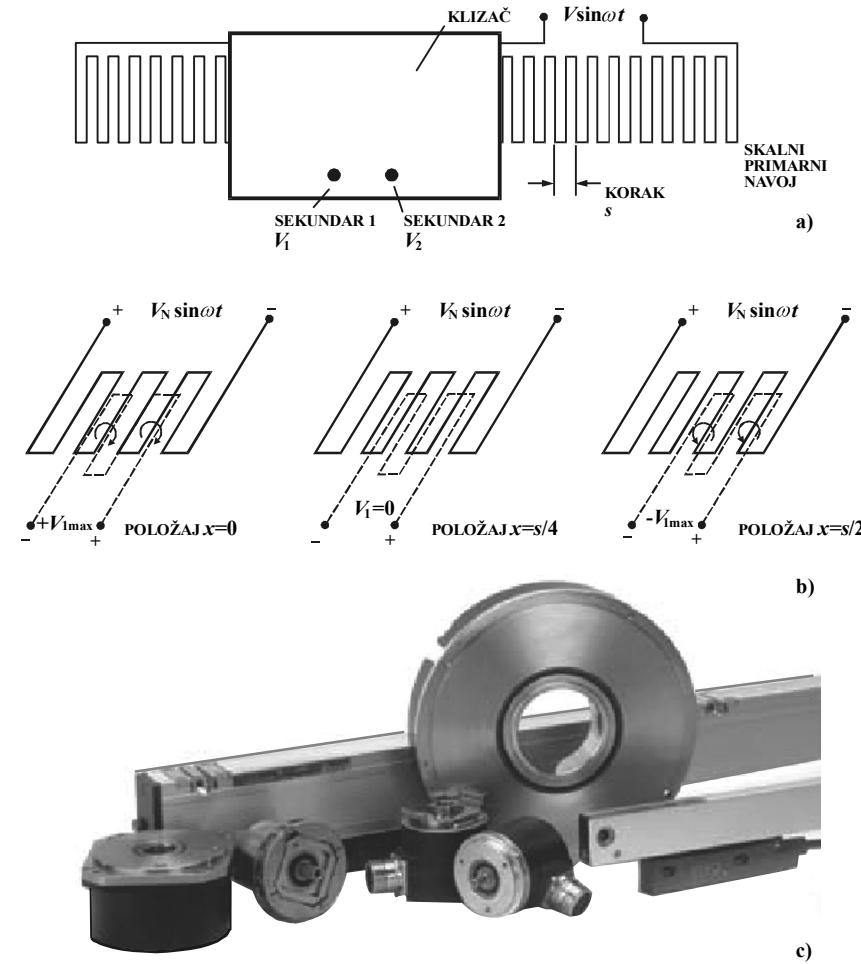
$$Vs = V \sin(\omega t). \quad (15.27)$$

U navojima klizača indukuju se naponi u zavisnosti od položaja u odnosu na skalu (slika 15.16b). Kada se navoje sekundara poklapaju sa navojima primara u njima se zbog maksimalne elektromagnetske sprege indukuje pozitivni maksimum, a kada se sekundar pomeri za $s/2$ u njemu se indukuje negativni maksimum. Zatim se za s ponovo javlja pozitivni maksimum. Za položaj klizača u početnom položaju $x=0$ u sekundarima su:

$$V_1 = V \sin(\omega t), \quad V_2 = 0. \quad (15.28)$$

Za neki drugi položaj klizača x unutar istog ciklusa indukuju se naponi:

$$V_1 = V \sin(\omega t) \cos(2\pi x/s), \quad V_2 = V \sin(\omega t) \sin(2\pi x/s). \quad (15.29)$$



Slika 15.16. Induktosin: a) konstrukcija, b) indukcija napona u funkciji pomeranja sekundara, c) tipične realizacije linearnih i rotacionih induktosina

Ukupni pomeraj klizača određuje se iz broja predenih ciklusa i pozicije unutar zatečenog ciklusa. Indukovani naponi (15.29) daju samo informaciju o poziciji unutar ciklusa. Posebnim mehaničkim, električnim ili optičkim sredstvima pravi se reverzibilni brojač predenih ciklusa. Tipična rezolucija senzora na bazi linearног induktosina je $2,5 \mu\text{m}$. Zbog slabe magnetne veze između navoja skale i klizača, amplituda indukovanih napona je relativno mala. Radi poboljšanja rezolucije upotrebljava se pobudni napon sa velikom frekvencijom (od 5 kHz do 10 kHz). Fazno prednjačenje ili kašnjenje napona V_1 u odnosu na V_2 služi za određivanje smera kretanja klizača. Na slici 15.16c prikazane su tipične realizacije induktosina.

Lokacioni senzori rastojanja rade na principu merenja vremena koje je potrebno radio, optičkom, radioaktivnom, zvučnom ili ultrazvučnom talasu da pređe to rastojanje. Pri tome je brzina talasa poznata i konstantna u toku merenja. Lokacioni senzori su jedna podgrupa radijacionih senzora. Obično su predajnik i prijemnik talasa na istom kraju merenog rastojanja, dok je na drugom kraju reflektor talasa. Kao reflektor često služi površina objekta čije se rastojanje od referentnog položaja meri.

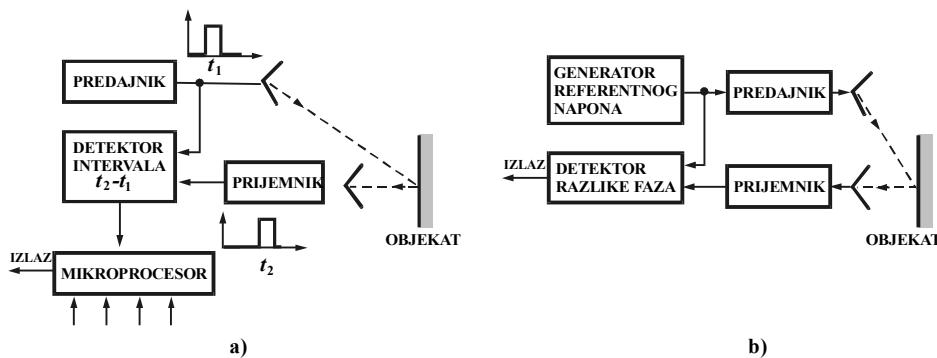
Radio-lokacioni i optički lokacioni senzori upotrebljavaju se za merenje velikih rastojanja ($10 - 10^{12} \text{ m}$). Za manja rastojanja ovi senzori su nepovoljni jer je vreme preleta od predajnika do prijemnika oko 1 ns, i teško je merljivo.

Za tehničku praksu su interesantniji akustični lokacioni senzori, kojima se mere rastojanja u opsegu $10^{-3} - 10^6 \text{ m}$. Brzina zvučnih i ultrazvučnih talasa u vazduhu zavisi od temperature, pritiska, vlažnosti, sadržaja CO_2 i drugih parametara vazduha, a za normalne vrednosti ovih parametara brzina zvuka je $331,45 \text{ m/s}$. U metalima je brzina akustičnih talasa veća ($3000 - 10000 \text{ m/s}$), što je $10^4 - 10^6$ puta manje od brzine elektromagnetnih talasa.

Lokacioni senzori impulsnog tipa imaju predajnik koji emituje kratke impulse veće snage, pa je domet veći. Odbijeni talasi od objekta dolaze do prijemnika. Nakon što se izmeri vreme od emitovanja do prijema impulsa, mikroprocesor izračunava nepoznato rastojanje objekta (slika 15.17a). Za poznatu brzinu v emitovanog signala kroz merni medij, rastojanje objekta određuje se jednačine

$$x = \frac{tv}{2}. \quad (15.30)$$

Laser je povoljan kao predajnik kada površina objekta dobro reflektuje svetlost. Fotodioda tada služi kao prijemnik. Prilikom izračunavanja udaljenosti na osnovu (15.30) treba uzeti u obzir da je brzina optičkog signala u vazduhu $v = c/n$, gde su c brzina svetlosti u vakuumu, a n koeficijent loma svetlosti vazduha, koji zavisi od temperature, vlažnosti i pritiska sredine. Optički lokacioni senzori impulsnog tipa služe kao etalonski instrumenti rastojanja u opsegu $50 - 1000 \text{ m}$. Akustični lokacioni senzori impulsnog tipa imaju veliku primenu u robotici, merenju nivoa tečnosti, medicinskoj dijagnostici, saobraćaju i u mnogim drugim oblastima. Naročito su rasprostranjeni ultrazvučni senzori. Ultrazvuk ima frekvenciju $20 - 200 \text{ kHz}$ kada je radni medij vazduh, odnosno frekvenciju $0,5 - 10 \text{ MHz}$ kada je u pitanju neki drugi medij.



Slika 15.17. Lokacioni senzor: a) senzor sa merenjem vremena preleta, b) senzor sa merenjem faze

Lokacioni senzori faznog tipa imaju predajnik (modulator) koji neprekidno emituje talas amplitudno modulisanim sinusnim signalom visoke frekvencije f (slika 15.17b). Princip rada zasniva se na posrednom merenju vremena preleta od prijemnika do objekta i obratno. Ovo vreme određuje se iz razlike faza referentnog modulirajućeg signala i odbijenog signala od objekta. Generator referentnog napona modulirajuće frekvencije daje

$$u_1 = U_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1), \quad (15.31)$$

gde je φ_1 početna faza. Odbijeni signal od objekta prijemnik pretvara u napon:

$$u_2 = U_{m2} \sin[\omega(t - t_0) + \varphi_1 - \varphi_2], \quad (15.32)$$

gde su: t_0 vreme potrebno talasnom signalu da pređe od predajnika do objekta i nazad do prijemnika, φ_2 fazno kašnjenje modulirajućeg napona u kolima senzora. Razlika faza između u_1 i u_2 je

$$\varphi_x = \omega t_0 + \varphi_2. \quad (15.33)$$

Budući da su $t_0 = 2x/v$ i $v = c/n$, nepoznato rastojanje objekta je:

$$x = \frac{c}{n2\omega}(\varphi_x - \varphi_2). \quad (15.34)$$

Tačnost merenja rastojanja zavisi od stabilnosti modulirajuće frekvencije i greške merenja razlike faza:

$$\frac{\Delta x}{x} = -\frac{\Delta\omega}{\omega} + \frac{\Delta\varphi}{\varphi}, \quad (15.35)$$

gde su: $\omega = 2\pi f$, $\Delta x = \Delta\varphi c/n4\pi f$, $\varphi = \varphi_x - \varphi_2$ i $c/f = \lambda$. Obično se zahteva da merenje nema veću grešku od neke zadane vrednosti, pa se, u skladu s tim, modulirajuća frekvencija bira kao

$$f = \frac{c \Delta\varphi}{n 4\pi \Delta x}. \quad (15.36)$$

Na primer, za $x=300$ m dozvoljena greška merenja je 0,3 mm. Ako se pretpostavi da je $\Delta\varphi = 0,1 - 0,5^\circ$, proizilazi da je potrebna modulirajuća frekvencija $f = 700 - 1500$ MHz, talasna dužina elektromagnetnog vala $\lambda = 0,2 - 0,4$ m.

Laserski interferometar. Na ulazu interferometra zvučni ili svetlosni talas intenziteta I_0 deli se na dva ili više parcijalnih talasa amplituda A_k . Parcijalni talasi prolaze kroz interferometar putevima različite dužine s_k , pa zbog toga svaki ima i različitu fazu $\varphi_k = \varphi_0 + 2\pi s_k / \lambda$. Superpozicijom parcijalnih talasa na izlazu interferometra dobija se signal čija amplituda zavisi od A_k , ali i φ_k , tj. suštinski zavisi od talasne dužine λ . Maksimalni intenzitet izlaznog signala pojavljuje se kada je efekat interferencije parcijalnih talasa najveći, tj. kada je razlika puteva jednaka celom broju talasnih dužina (parnom broju $\lambda/2$):

$$\Delta s_{ik} = s_i - s_k = N\lambda, \quad (15.37)$$

a minimalni intenzitet se dobija kada je efekat interferencije najmanji, tj. kada je razlika puteva jednaka neparnom broju $\lambda/2$:

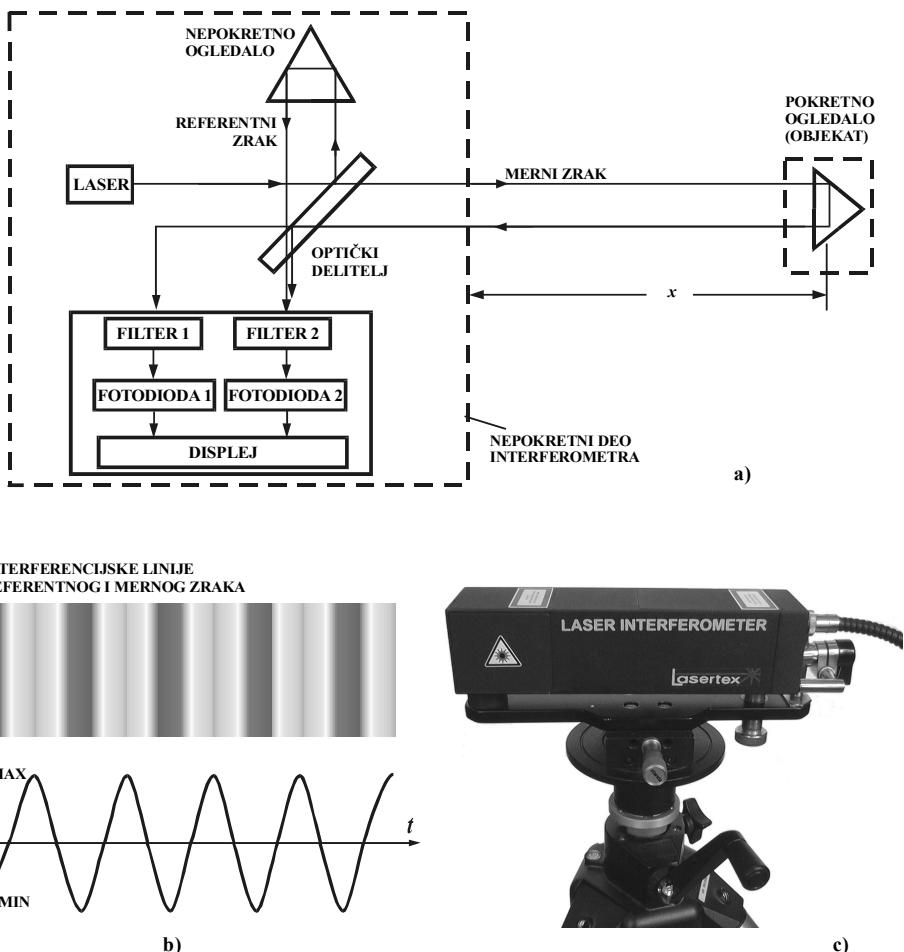
$$\Delta s_{ik} = s_i - s_k = \frac{(2N+1)\lambda}{2}, \quad (15.38)$$

pri čemu je $N = 1, 2, \dots$ red interferencije. Maksimumi interferencije formiraju svetle linije jer su talasi na putu s_i i s_k u fazi, odnosno minimumi interferencije formiraju tamne linije jer su talasi u protufazi.

Interferencijski princip merenja rastojanja sastoji se u brojanju interferencijskih linija, odnosno upoređivanju talasnih dužina i merenog rastojanja. Obično se primenjuju interferometri sa dva parcijalna talasa (Majkelsonov i Mah-Cenderov interferometar), a rede interferometri sa više parcijalnih talasa (Fabri-Peroov interferometar). Veliku primenu u tehničkoj praksi merenja rastojanja danas imaju optički (laserski) interferometri, kako za merenja u laboratorijskim uslovima tako i za merenja u mašinogradnji, metalnoj industriji i fleksibilnoj automatiziranoj proizvodnji.

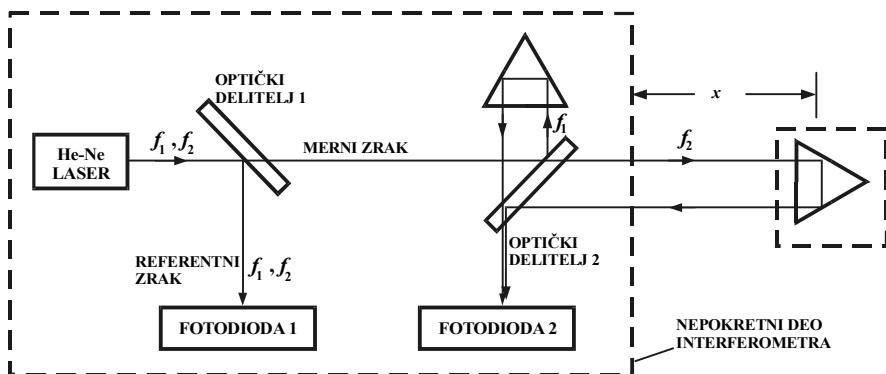
Laserski interferometar za merenje dužine obično se pravi na osnovu Majkelsonovog interferometra sa dva parcijalna zraka. Svetlost iz lasera dolazi na planparalelnu ploču, koja polovicu svetlosti reflektuje, a polovicu propušta (slika 15.18a). Takva ploča naziva se optički delitelj ili razdvajač snopa. Reflektovani (referentni) zrak ide do nepokretnog ogledala, a propušteni (merni) zrak do pokretnog ogledala pričvršćenog na objektu čije se rastojanje prati. Nakon odbijanja od ogledala, zraci se ponovo sastaju u optičkom delitelju i tu interferiraju (slika 15.18b). Interferencijski maksimumi i minimumi prate se pomoću fotodioda, što odgovara pomeranju objekta u odnosu na referentni položaj. Da bi se pratio i smer kretanja objekta, ispred fotodioda mogu se postaviti polarizacioni filteri, koji zakreću zrake za $1/4$ širine interferencijske linije, odnosno ukupno za $\pi/4$. Brojanje linija provodi se pomoću reverzibilnog brojača. Pomak interferencijskih linija za širinu jedne linije odgovara promeni merene dužine za $x = \pm \lambda/2$.

Laserski interferometar sa dvofrekventnim $He-Ne$ laserom omogućava povećanje tačnosti merenja prenosom spektra signala u oblast visokih frekvencija. Na veoma visokoj nominalnoj frekvenciji 0,5 PHz $He-Ne$ laser generiše dva suprotno



Slika 15.18. Laserski interferometar: a) interferometar sa dva parcijalna zraka, b) iterferencijske linije, c) izgled industrijskog laserskog interferometra za merenje rastojanja

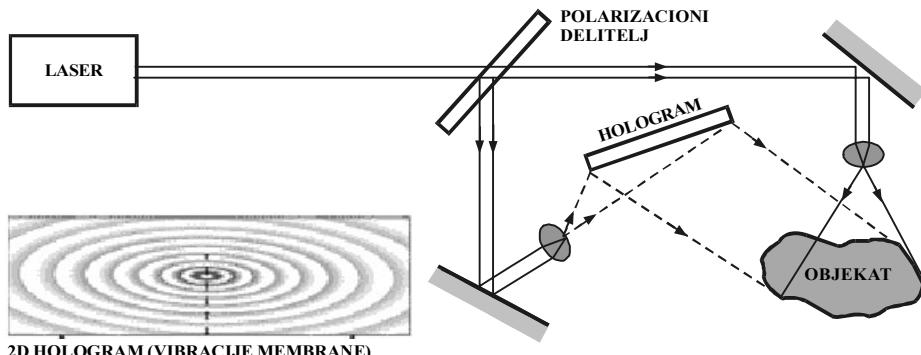
polarizovana svetlosna zraka, koja se razlikuju za 2 MHz . Na optičkom delitelju ovaj dvofrekventni zrak razdvaja se na merni i referentni zrak, koji su takođe dvofrekventni (slika 15.18b). Referentni zrak dolazi na polarizator, gde se njegove dve frekventne komponente konvertuju u svetlost iste polarizacije. Zatim dolazi do interferencije sa zrakom frekvencije 2 MHz , što se detektuje pomoću fotodioda. Merni zrak se na polarizacionom delitelju razdvaja na dva zraka, frekvencija f_1 i f_2 . Zrak frekvencije f_1 ide do fiksног, a zrak frekvencije f_2 do pokretnog ogledala. Za nulli položaj pokretnog ogledala (objekta), u polarizatoru 2 generiše se izlazni signal iste frekvencije kao na izlazu prvog polarizatora (2 MHz). Pomeraj pokretnog ogledala dovodi do Doplerovog pomaka u frekvenciji f_2 i promena na izlazu polarizatora 2, i to $0,5 - 3,5 \text{ MHz}$. Izlazi iz delitelja 1 i 2 se pojačavaju i oduzimaju, a rezultujući signal ide na brojač. Stanje brojača indicira pomeraj objekta, a promena stanja brojača u vremenu odgovara brzini kretanja objekta. Prednost laserskog interferometra je što ima veliku rezoluciju ($0,001 \text{ mm/m}$) na velikom opsegu (nekoliko metara).



Slika 15.19. Interferometar sa dvofrekventnim laserom

Rendgenski interferometri rade sa rendgenskim talasima ($\lambda = 10^{-8} - 10^{-11}$ m), koji prolaze kroz difrakcionu rešetku, sačinjenu od kristala kvarca ili silicijuma. Svojstvo ovih kristala je da je rastojanje između njihovih atomskih ravni postojano, što se može uzeti kao mera malog rastojanja. Rendgenski interferometar upotrebljava se kao sekundarni etalon za merenje malih rastojanja (od 10^{-10} do 10^{-4} m sa greškom $2 \cdot 10^{-12}$ m).

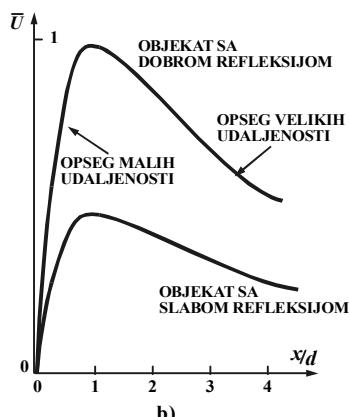
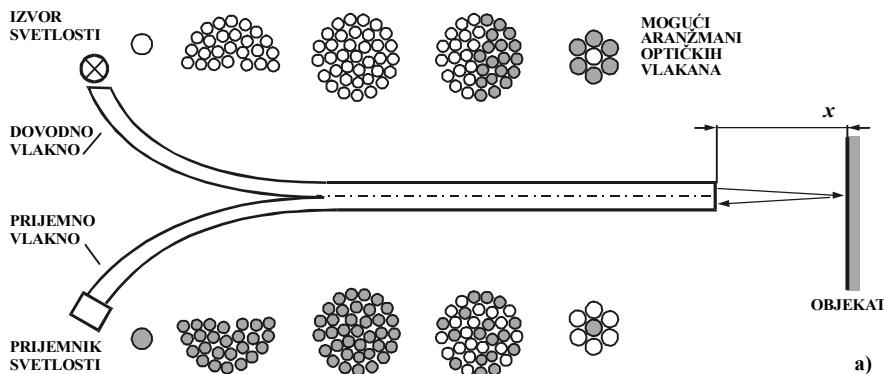
Holografski senzori spadaju u grupu radijacionih senzora. Holografija je metoda dobijanja trodimenzionalne slike objekta tako što se istovremeno prate amplituda i faza svetlosti sa objekta. U osnovi holografije leže efekti difrakcije i interferencije. Holografski interferometri služe za beskontaktno merenje reljefa trodimenzionalnog objekta. Sustina merenja sastoji se u interferenciji konturnih linija objekta istog nivoa. Objekt se osvetljava koherentnom svetlošću iz laserskog izvora: jedan njen deo se reflektuje od objekta i interferira sa referentnom svetlošću uzetom direktno iz izvora (slika 15.20). Svetlost prethodno prolazi kroz ekspandere koji omogućavaju da se osvetli veća površina. Tako se dobijaju dvodimenzionalne interferencijske slike (hologrami), koje se zapisuju na fotografskoj ploči. Kasnije, u bilo kom trenutku, hologram se može prosvetliti istom koherentnom svetlošću i tako rekonstruisati izvorni talasni front. Gledajući kroz hologram, uočava se verna trodimenzionalna slika objekta.



Slika 15.20. Holografski interferometarski senzor

Holografska interferometrija primenjuje se u mikroskopiji, medicini, biomehaniči, televiziji, kinematografiji i u mnogim drugim područjima. U proučavanju dinamičkih problema prilikom vibracija i udara, određivanju malih odstupanja i nepravilnosti u obliku objekta holografija predstavlja najperspektivniji metod merenja. Ozbiljan nedostatak metode bio je u razdvojenosti postupka snimanja i čitanja holograma, što se u novije vreme prevazilazi on-line praćenjem pomoću termoplastičnih kamera. Poteškoće u predstavljanju hologrfske informacije u numeričkom obliku postaju sve manje zahvaljujući mikroprocesorskoj podršci.

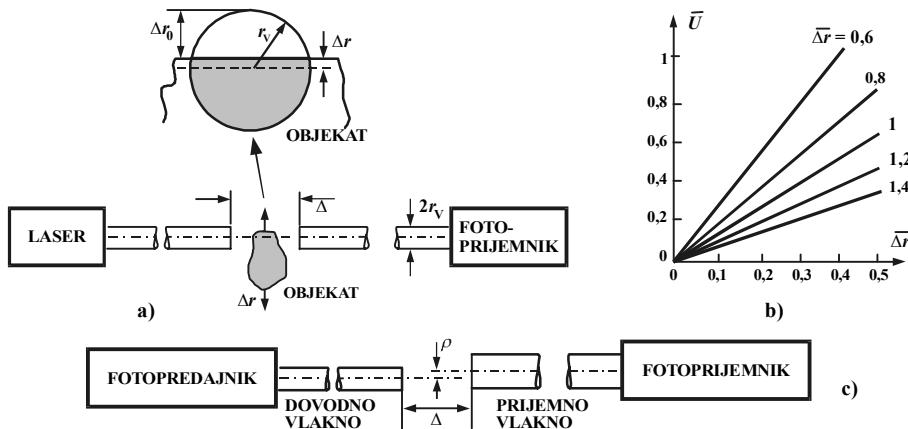
Senzori sa optičkim vlaknom. Najstariji tip ovog senzora radi na principu refleksije svetlosti od površine pokretnog objekta. Okomito na objekat postavljena su dva optička vlakna (slika 15.21a). Dovodno vlakno povezano je sa laserskim izvorom svetlosti, a prijemno vlakno povezano je sa fotodiodama. Izlazni signal zavisi od rastojanja između objekta i optičkih vlakana. Za $x=0$ i $x=\infty$ na fotodiodama nema signala. Odатле proizilazi da će izlazni signal za neko x imati maksimalnu vrednost. Dovodno i prijemno vlakno mogu se aranžirati na različite načine. Najjednostavniji postupak je da se standardni optički kabl sa neregularnim razmeštanjem vlakana razdeli na dve grupe – dovodnu i prijemnu. Statička karakteristika senzora $\bar{u} = u/u_{\max} = f(x/d)$ ima maksimum za $x \approx d$ (slika 15.21b). Na primer, za $d=0,025$ mm



Slika 15.21. Senzor sa optičkim vlaknom i refleksijom sa površine objekta: a) princip rada, b) statička karakteristika, c) izgled senzora debljine trakaštih materijala

rezolucija je $0,1\mu\text{m}$. To se odnosi na prednji, strmiji deo karakteristike. Radni deo može da bude i na linearном segmentu iza maksimuma, ali sa slabijim metrološkim pokazateljima. Sa u_{\max} označen je maksimalni napon na prijemniku koji se ima pri direktnom spoju predajnik-prijemnik.

Drugi tip senzora pomeraja na bazi optičkog vlakna primjenjuje se za neprovidne objekte. Dva paralela optička vlakna postavljena su tako da je između njih zazor Δ (slika 15.22a). U zazoru se nalazi pokretni objekt. Izlazni signal iz fotoprijemnika jednoznačno se menja sa pomicanjem objekta Δr ako je zadovoljen uslov da je objekat veći od prečnika vlakna ($d \geq 2r_v$). Izlazni signal $\bar{u} = u/u_{\max}$ proporcionalan je osvetljenom delu poprečnog preseka vlakna $\bar{\Delta}r = \Delta r/\Delta r_v$ u opsegu koji se utvrđuje kalibracijom. Karakteristika $\bar{u} = f(\bar{\Delta}r)$ zavisi od početnog položaja, tj. od vrednosti $\bar{\Delta}r_0 = \Delta r_0/r_v$ koje se na karakteristici pojavljuju kao parametri (slika 15.22b). Ova statička karakteristika je linearna za $0,6 < \bar{\Delta}r_0 < 1,4$.



Slika 15.22. Senzor sa optičkim vlaknom: a) senzor sa neprozirnim objektom, b) statička karakteristika, c) p-senzor i Δ -senzor

Optičko vlakno može da se upotrebi kao senzor zahvaljujući njegovim elastičnim svojstvima (slika 15.22c). Izlazni signal zavisi od zazora Δ između vlakana i rastojanja ρ između njihovih osa. Ako je u toku mernog procesa jedna od ovih veličina konstantna, druga se može dovesti u vezu sa pokretnim objektom i meriti njegovo pomeranje. U tom smislu razlikuju se ρ -senzor i Δ -senzor.

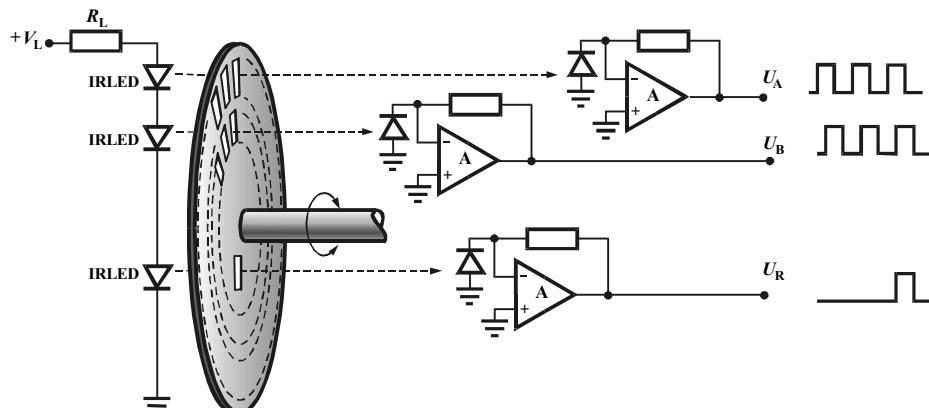
15.5. SENZORI UGAONOG POMERAJA

Senzori ugaonog pomeraja detektuju pomak objekta oko neke ose. Često ovi senzori služe i kao konvertori linearne (translatorne) kretanja u rotaciono kretanje. Fizikalni principi gradnje senzora linearne ugaonog pomeraja primjenjuju se i u gradnji senzora ugaonog pomeraja. Na primer, potenciometarski senzor ugaonog pomaka razlikuje se od linearne samo utoliko što je napravljen na bazi kružnog potenciometra. Zato nema potrebe da se detaljno izlaže tehnika senzora ugaonog pomeraja, ali treba razmotriti specifične izvedbe, koje nemaju odgovarajuću analogiju među senzorima linearne pomeraje.

Inkrementalni senzori (enkoderi) sastoje se od pretvarača merenog ugla u niz impulsa i brojača impulsa. Broj impulsa pamti se u odnosu na početnu poziciju. Kada dođe do promene ugla, generišu se samo dodatni impulsi proporcionalno toj promeni i njihov broj sumira na prethodno stanje brojača, te se na izlazu indicira ukupno ugaono pomeranje. Time se postiže velika brzina odziva, ali gubitak makar i jednog impulsa dovodi do greške koja se više ne može otkloniti. Brojač impulsa je reverzibilan: impulsi se sabiraju za pozitivne, a oduzimaju za negativne pomeraje.

Pretvaranje merenog ugla u sled impulsa ostvaruje se elektromagnetnim ili optoelektronским sredstvima. U prvom slučaju na osovinu čije se zakretanje meri postavlja se nazubljeni disk od feromagnetskog materijala. Za čitanje pozicije primenjuje se transformatorski pristup. Kada je zubac u vazdušnom zazoru impulsnog transformatora, izlaz iz transformatora je približno jednak nuli $U_2 \approx 0$, a kada je zazor slobodan, izlazni signal je U_1 . Poželjno je da odnos U_1/U_2 bude što veći radi što tačnijeg raspoznavanja logičkih nula od logičkih jedinica. Optimalna debljina diska je od 0,1 – 0,6 mm, prečnik $d=100$ mm, a broj zubača 200.

Optoelektronski enkoder sastoji se od izvora svetlosti, od jednog diska sa dva niza proreza ravnomerno raspoređenih po obodu i odgovarajućih elektronskih kola za obradu signala sa prijemnika svetlosti. Izvori svetlosti najčešće su infracrvene LED diode, a kao prijemnici odgovarajuće fotodiode. Prolaz svetlosti kroz prorene zakretanja osovine detektuje se u fotodiodi i generišu se pravougaoni impulsi (kvadratura enkodera). Na slici 15.23 detektori su fotonaponski elementi u režimu kratkog spoja. Broj impulsa proporcionalan je ostvarenom zakretanju.



Slika 15.23. Inkrementalni optoelektronski senzor

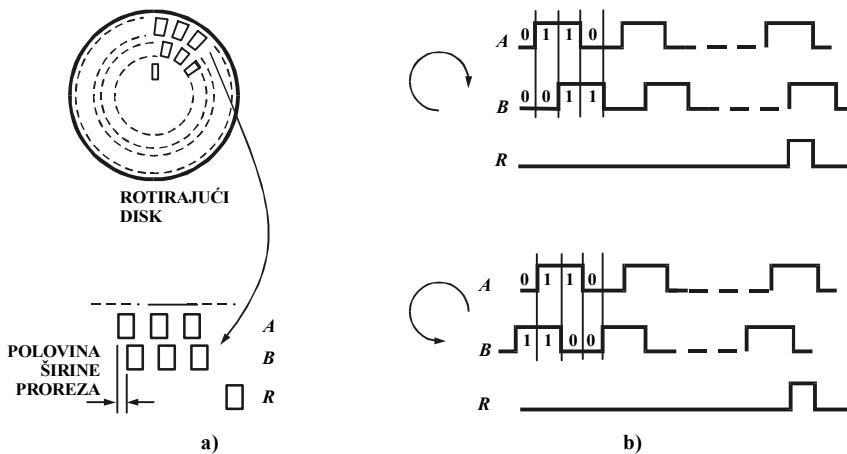
Prorezi na unutrašnjoj stazi rotirajućeg diska pomereni su za $1/2$ širine u odnosu na proreze po obodu, pa impulsi fotoprijemnika na unutrašnjoj stazi kasne ili prednjače u zavisnosti od smera rotacije (slika 15.24.a). Najveći diskovi imaju prečnik $d=150$ mm i približno 5 000 proreza, tj. rezoluciju $1 : 5\,000$ ili $\pm 4''$. Fotoprijemnici koji su opremljeni električnim kolima za brojanje i prednjih i zadnjih ivica impulsa imaju dvaput bolju rezoluciju: $\pm 2''$. Kodni diskovi uspešno se primenjuju u numerički upravljanim alatnim mašinama i za merenje malih linearnih pomeraja veličine $1\text{ }\mu\text{m}$, tako što se pomoću zupčanika linearno kretanje pretvara u ugaono.

Bez obzira da li se radi o magnetnom ili optičkom čitanju pozicije, analiza rada inkrementalnih senzora pokazuje da pretvarač ugla u sled impulsa generiše zapravo tri signala: A , B i R , čiji su međusobni položaji za jedan i drugi smer obrtanja osovine prikazani na slici 15.24b. Referentni signal R predstavljen je jednim impulsom, koji se pojavljuje svaki put nakon punog obrtaja osovine u odnosu na fiksnu referentnu tačku. Signal B fazno prednjači ili kasni za $T/4$ u poređenju sa signalom A , što zavisi od smera vrtnje osovine. Broj perioda impulsa A i B za jedan puni obrtaj osovine je konstantan i određen je konstruktivnim svojstvima pretvarača ugla u sled impulsa. Jedan period signala A odgovara rezoluciji:

$$\theta_r = \frac{2\pi}{N}, \quad (15.39)$$

gde je N ukupan broj impulsa za jedan obrtaj. Unutar jednog perioda uočavaju se četiri stanja signala A i B : ($A=0, B=0$), ($A=1, B=0$), ($A=1, B=1$) i ($A=0, B=1$). Za suprotan smer vrtnje stanja se menjaju obrnutim redosledom. Detekcijom ovih stanja rezolucija (15.39) povećava se četiri puta, odnosno:

$$\theta_{r'} = \frac{\theta_r}{4} = \frac{\pi}{2N}. \quad (15.40)$$

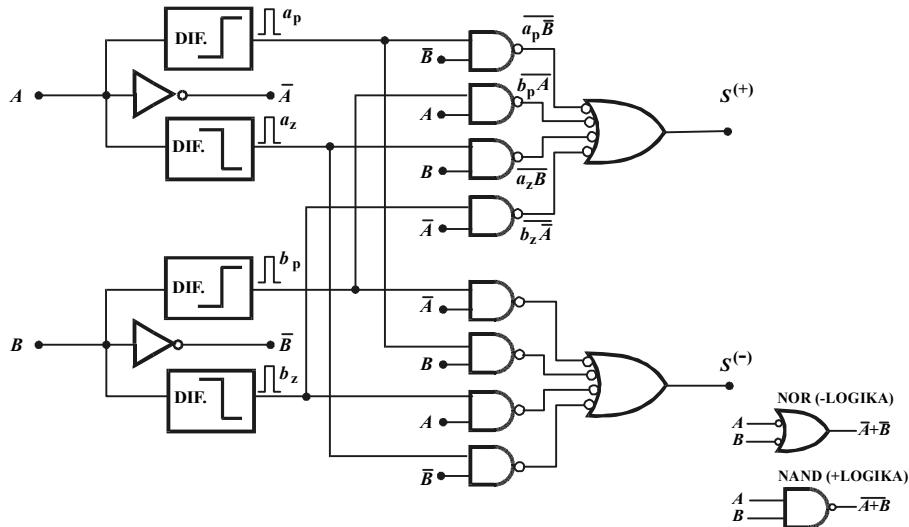


Slika 15.24. Generisanje impulsa na enkoderu: a) disk sa dve staze, b) međusobni položaj impulsa za različite smerove rotacije

Promenu ovih stanja elektronska kola detektuju praćenjem prednjih i zadnjih ivica signala A i B . Radi lakšeg uočavanja ivica uvođe se diferencijatori, jer se na njihovim izlazima za svaku ivicu pojavljuje jedan impuls male širine. Promena stanja signala A i B može da se prati odgovarajućim nizom impulsa $S^{(+)}$ i $S^{(-)}$, saglasno smeru kretanja osovine. Merenje ugaonog položaja svodi se na brojanje ovih impulsa. U skladu sa logičkim stanjima na slici 15.24, sumirajući signali $S^{(+)}$ i $S^{(-)}$ su:

$$\begin{aligned} S^{(+)} &= a_p \bar{B} + b_p A + a_z B + b_z \bar{A} \\ (15.41) \quad S^{(-)} &= b_p \bar{A} + a_p B + b_z B + a_z \bar{B}, \end{aligned}$$

gde su a i b impulsi iz diferencijatora koji odgovaraju prednjim (p) ili zadnjim (z) ivicama impulsa signala A i B . Elektronska šema za realizaciju merenja ugaonog pomaka na opisani način sastoji se od diferencijatora i logičkih kola za detekciju stanja signala A i B , tj. kola za generisanje sleda impulsa $S^{(+)}$ i $S^{(-)}$, koji dalje idu na reverzibilni brojač. U konkretnoj šemi NAND kola su realizovana sa pozitivnom logičkom konvencijom, a NOR kola sa negativnom (slika 15.25).



Slika 15.25. Generisanje akumulirajućih impulsa reverzibilnog brojača

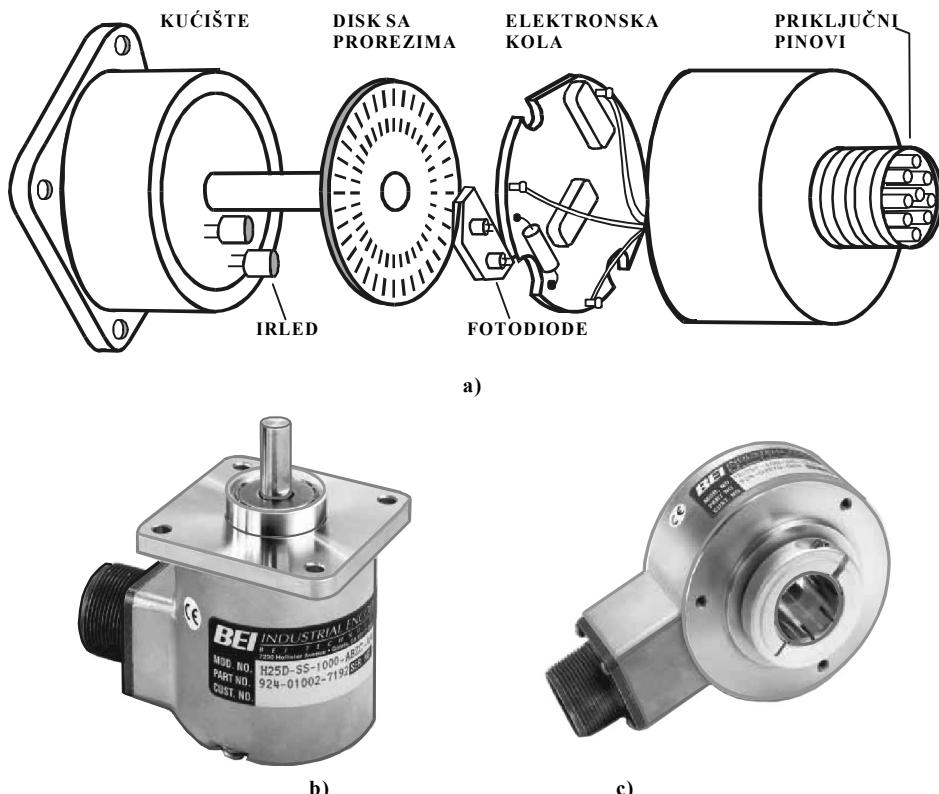
Kod mikroprocesorskih realizacija inkrementalnih senzora signali $S^{(+)}$, $S^{(-)}$ i R mogu se upotrebiti kao programski prekidi mikroprocesora, pa je brojanje impulsa jednostavno. Signali $S^{(+)}$ i $S^{(-)}$ povezuju se prvo na blok u kojem se realizuje logika prekida. Mereni ugao računa se dodavanjem pozitivnih i negativnih prirasta $\theta_{t'}$ u odnosu na prethodno stanje. Programski prekid zbog pojave signala R služi za nuliranje (resetovanje) brojača, pri čemu se u memoriji pamti predeni broj obrtaja. Time se onemogućava da se greška merenja napravljena u toku jednog obrtaja kumulativno prenosi dalje.

Prekidi izazvani impulsima $S^{(+)}$, $S^{(-)}$ i R pojavljuju se sa periodama:

$$T^{(+)} = T^{(-)} = \frac{2\pi}{\omega N} \quad \text{i} \quad T_R = \frac{2\pi}{\omega} , \quad (15.42)$$

gde je ω maksimalna ugaona brzina inkrementalnog senzora. Vreme za koje mikrokontroler obradi ove prekide iznosi najviše 1% perioda $T^{(+)}$, što ukazuje na malu zauzetost mikrokontrolera merenjem ugla. U preostalom vremenu mikrokontroler se može upotrebiti za priključivanje više identičnih enkodera ili u druge svrhe.

Na slici 15.26 prikazani su konstrukcija i tipične realizacije industrijskog enkodera sa punom i šupljom osovinom..



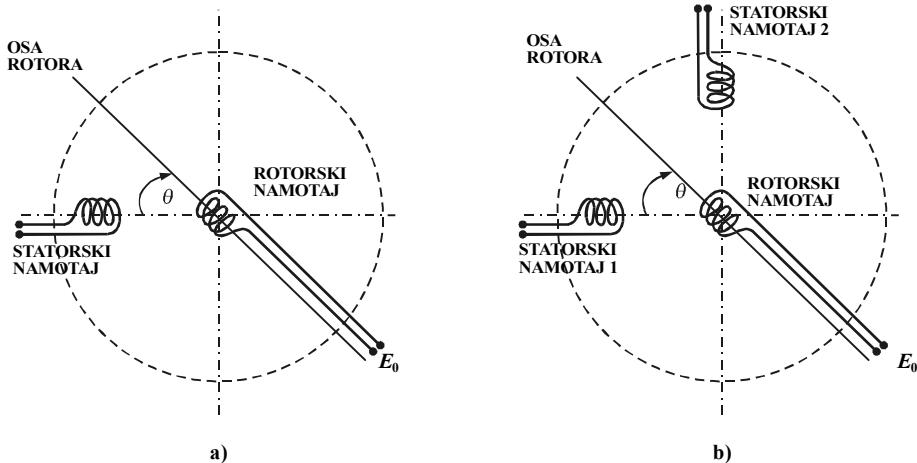
Slika 15.26. Konstrukcija optičkog inkrementalnog enkodera: a) presek enkodera, b) izvedba sa vanjskom osovinom, c) izvedba sa šupljom osovinom

Obртни трансформатор је електромеханички сензор сличан наизменичном микромотору. Излазни сигнал је гармоничка функција угаоног помераја осовине. Поред мерења угла у срвосистемима, ови сензори се примењују и за решавање математичких операција са тригонометријским величинама. Због тога се ови сензори називају и синхроразлагаč (sinhro-resolver) или само разлагаč (resolver). Роторски намотај спојен је на осовину чије се закретање прати (слика 15.27а). Наčин рада обртног трансформатора зависи од тога да ли се угаони померај конвертује у промену амплитуде или у промену фазе излазног напона.

Amplitudni režim rada обртног трансформатора остварује се прикључивањем статорског намотаја на наизменičан напон са осцилатора:

$$E_1 = E_m \sin(\omega t) . \quad (15.43)$$

У роторском намотају због међуиндукције индукује се електромоторна сила, чија величина зависи од узаямног положаја статора и ротора. У случају када је побудни магнетни флукс окомит на осу ротора, кофицијент међуиндукције једнак је нули, па је електромоторна сила једнака нули. Ако је роторски намотај у положају θ , у њему се индукује електромоторна сила пропорционална оном делу побудног магнетног флуksа који пресека намотај, односно:



Slika 15.27. Obrtni transformator: a) amplitudni režim rada, b) fazni režim rada

$$E_0 = KE_m \cos \theta \sin (\omega t). \quad (15.44)$$

Dobijeni izraz pokazuje da se amplituda naizmeničnog izlaznog signala menja po kosinusnom zakonu. Zato se celi uredaj naziva kosinusni obrtni transformator. Nelinearna karakteristika (15.44) približno je linearna samo za male promene ugla: $|\theta| < 15^\circ$. Da se postigne veća tačnost, potrebno je da kružna frekvencija ω pobudnog napona bude što veća. Ali kako sa porastom frekvencije rastu gubici u magnetnom kolu, kompromisno se uzima maksimalna frekvencija od $\omega = 400 \text{ Hz}$. Pod ovim uslovima kosinusni obrtni transformator obezbeduje tačnost merenja ugla do $\pm 0,1\%$. Ostali tipični parametri su: napon na statoru i rotoru oko 10 V_{ef} za prenosni odnos $1 \pm 4\%$, fazni pomeraj između navoja statora i rotora 5° , otpornost navoja statora 100Ω , otpornost navoja rotora 100Ω i osetljivost je oko 150 mV .

Opterećenje ima veliki uticaj na deformaciju izlaznog kosinusnog napona (15.44). Kada postoji opterećenje od strane uređaja koji se priključuje na rotor, rotorsko kolo je zatvoreno i u njemu teče struja, koja stvara svoj magnetni fluks. Uzdužna komponenta ovog fluksa ima suprotan smer od pobudnog fluksa. Zbog toga indukovana struja u statorskom namotaju svojim fluksom kompenzira uzdužnu komponentu rotorskog fluksa. Poprečna komponenta magnetnog fluksa u rotoru indukuje elektromotornu silu samoindukcije, koja se ne kompenzira kao uzdužna i zato deformatiše kosinusnu zavisnost izlaznog signala od ugla θ . Radi smanjivanja uticaja opterećenja stator i rotor prave se sa po dva medusobno okomita namotaja. Dodatni namotaji imaju kompenzirajuću ulogu. Izlazni naponi rotorskog navoja fazno su pomereni za 180° , zbog čega se ovakav senzor naziva sinusno-kosinusni obrtni transformator, sinhro razlagač ili resolver.

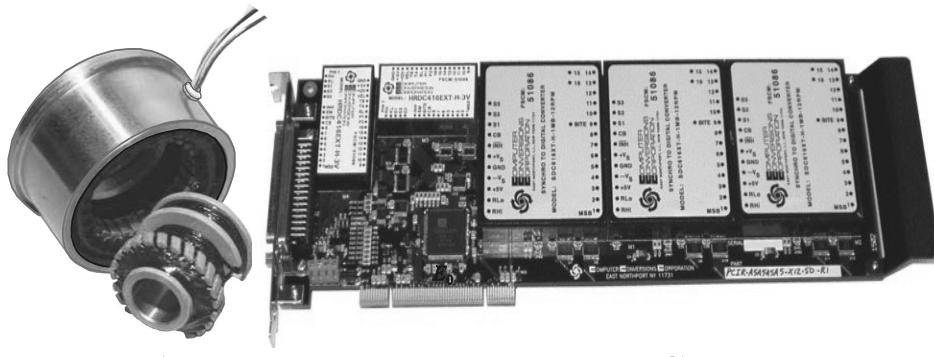
Fazni režim rada obrtnog transformatora ostvaruje se dovodenjem dvofaznog sinusnog napona na dva okomita statorska namotaja (slika 15.27b):

$$E_1 = E_m \sin (\omega t) \quad E_2 = E_m \sin (\omega t + \frac{\pi}{2}) = E_m \cos (\omega t). \quad (15.45)$$

Obadva pobudna namotaja indukuju napon u rotorskom namotaju. Ukupni indukovani napon je:

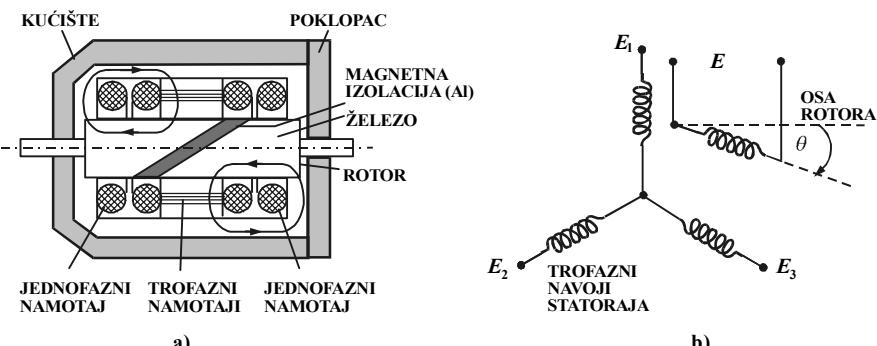
$$\begin{aligned}
 E_0 &= KE_m \sin(\omega t) \cos \theta + KE_m \cos(\omega t) \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = \\
 &= KE_m [\sin(\omega t) \cos \theta + \cos(\omega t) \sin \theta] = \\
 &= KE_m \sin(\omega t + \theta). \tag{15.46}
 \end{aligned}$$

Iz jednačine (15.46) proizilazi da je faza izlaznog napona linearno proporcionalna sa merenim uglom. Tačnost merenja ugla zavisi od tačnosti uređaja za merenje faze. U načelu, to je složen elektronski uređaj. Frekvencija pobudnog napona i opterećenje jednakost utiču na izlazni napon kao i kod amplitudnog režima rada. Na slici 15.28 prikazani su tipični izgled obrtnog transformatora i PCI karte za pretvaranje analognog izlaznog signala sa obrtnog transformatora u digitalni signal i povezivanje sa računaram.



Slika 15.28. Realizacija obrtnog transformatora: a) konstrukcija, b) PCI karta za interfejs

Selsin je posebna električna naizmenična mašina. Termin selsin označava da je to mašina koja se sama sinhronizuje. Princip rada selsina zasniva se na stvaranju tri naizmenične sinusne elektromotorne sile, čije amplitude i faze zavise od ugaonog položaja rotora. Selsin ima dva namotaja: trofazni – sa faznim namotajima pomerenim međusobno za 120° , spojenim u zvezdi i smeštenim na rotoru (ili statoru) i jednofazni – smešten na statoru (ili rotoru). Za tzv. normalni tip selsina naizmenični pobudni napon dovodi se na jednofazni namotaj, a izlazni signal uzima se sa krajeva faznih namotaja spojenih na tri kolektorska prstena na rotoru. Nedostatak kontaktnih selsina je trenje između četkica i prstenova na rotoru. I trofazni i jednofazni namotaji beskontaktnih selsina smešteni su na statoru. Posebna konstrukcija beskontaktnog selsina omogućava da pobudni fluks odgovara ugaonom položaju rotora (slika 15.29a). Telo selsina izradeno je u obliku čaure od dijamagnetskog materijala. Rotor je izrađen od transformatorskog lima da bi se izbegli gubici usled vihornske struje, pri čemu je ukoso duž rotora ubačen sloj dijamagnetskog materijala – tzv. magnetna izolacija. Vazdušni zazor između rotora i statora imaju znatno manji magnetni otpor od magnetne izolacije. Jednofazni namotaj podeljen je u dve sekcije, tako da se magnetni fluksi u njima zatvara kao što je prikazano na slici. Ovaj pobudni fluks leži u ravni okomitoj na sloj magnetne izolacije, pa se pri zakretanju rotora menja i smer magnetnog fluksa.



Slika 15.29. Selsin: a) konstrukcija beskontaktnog selsina, b) princip rada selsina

Ako se na jednofazni rotorski namotaj dovede naizmenični pobudni napon:

$$E = E_m \sin (\omega t), \quad (15.47)$$

pobudni fluks indukuje u faznim namotajima statora elektromotorne sile, čije su amplitude proporcionalne onom delu pobudnog magnetnog fluksa koji preseca pojedine fazne namotaje (slika 15.29b). Taj deo fluksa određen je sinusom ugla između pravca pobudnog i faznog namotaja. Prema tome, indukovane elektromotorne sile su:

$$E_1 = K E_m \sin (\omega t) \sin \theta \quad (15.48)$$

$$E_2 = K E_m \sin (\omega t) \sin (\theta + 120^\circ) \quad (15.49)$$

$$E_3 = K E_m \sin (\omega t) \sin (\theta + 240^\circ). \quad (15.50)$$

Prednost selsina je visoka pouzdanost, otpornost na delovanje temperature, vlažnosti i mehaničke vibracije, zbog čega imaju veliku primenu u merenju ugla u servosistemima vojne namene, te u mašinama alatljikama. Tipična tačnost je $\pm 0,5\%$, a najveći izvor greške je asimetričnost trofaznih navoja.

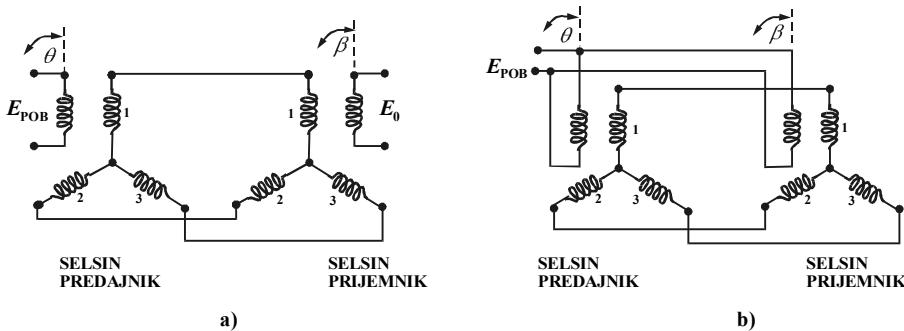
Selsin je veoma pogodan za daljinski prenos ugaonog položaja. Za ovu specifičnu namenu potrebna su dva identična selsina: selsin-predajnik i selsin-prijemnik. Selsini se nalaze u tzv. pozicionoj vezi, koja se ostvaruje spajanjem odgovarajućih trofaznih namotaja. Poziciona veza omogućava da se zakretanje rotora predajnika za neki ugao θ prenese na daljinu do prijemnika, kod kojeg će se za isti ugao zahrenuti magnetni fluks u njegovim faznim namotajima. Razlikuje se transformatorski i indikatorski režim rada selsina-prijemnika.

Transformatorski režim rada dobio je naziv po načinu stvaranja izlaznog napona: fazni namotaji statora prijemnika predstavljaju primar, a jednofazni namotaj rotora sekundar transformatora (slika 15.30a). Analiza je jednostavnija ako se pretpostavi da je rotor prijemnika fiksiran. Kada se rotor predajnika zakrene za ugao θ , indukovane elektromotorne sile (15.48-15.50) prenose se do odgovarajućih faznih namotaja prijemnika. Kako su oni nepokretni, u njima nastaje rezultujući magnetni

fluks čiji je pravac određen ugaonim položajem θ rotora predajnika. U jednofaznom namotaju prijemnika indukuje se *ems* sa amplitudom proporcionalnoj delu fluksa koji preseca namotaj:

$$E_0 = E_{0m} \cos \theta. \quad (15.51.)$$

Zavisnost $E_0 = f(\theta)$ je statička karakteristika dva selsina spregnuta u transformatorski spoj. Za male neusaglašenosti $\cos \theta \approx 1$, pa naizmenični izlazni signal ima maksimalnu amplitudu E_{0m} . Iz praktičnih razloga izlazni napon treba da je direktno proporcionalan uglu θ . To se postiže tako da je u početnom (usaglašenom) položaju rotor prijemnika fiksiran pod uglom od 90° u odnosu na rotor predajnika. Za male neusaglašenosti tada je $\cos(\theta + \pi/2) = -\sin \theta \approx \theta$, odnosno $E_0 = k\theta$. Koeficijent prenosa k izražava se u V/θ . Obično je $E_{0m} = 100 - 200 \text{ V}$, pa je vrednost ovog koeficijenta $k = 0,55 - 1,1 \text{ V}/\theta$. Zakretanjem rotora predajnika na drugu stranu faza izlaznog signala menja se za 180° . Transformatorski režim rada selsina primenjuje se u pozicionim servosistemima za detekciju ugaone razdešenosti $\theta - \beta$ dveju osovinama koje nisu mehanički vezane. U tom slučaju rotori selsina učvršćeni su na osovinama čije



Slika 15.30. Režimi rada selsinskih pozicionih sistema: a) transformatorski režim, b) indikatorski režim

pomake θ i β prate, a izlazni napon je $E_0 = E_{0m} \cos(\theta - \beta)$.

Kod indikatorskog režima rada jednofazni namotaj prijemnika priključen je na isti napon kao i jednofazni namotaj predajnika (slika 15.30b). Magnetni fluks u faznim namotajima prijemnika određen je položajem rotora selsina-predajnika. Između magnetnog fluksa u jednofaznom namotaju prijemnika i rezultujućeg fluksa u njegovim trofaznim namotajima dolazi do uzajamnog delovanja i javlja se obrtni moment:

$$M = M_m \sin(\Delta\theta), \quad (15.52)$$

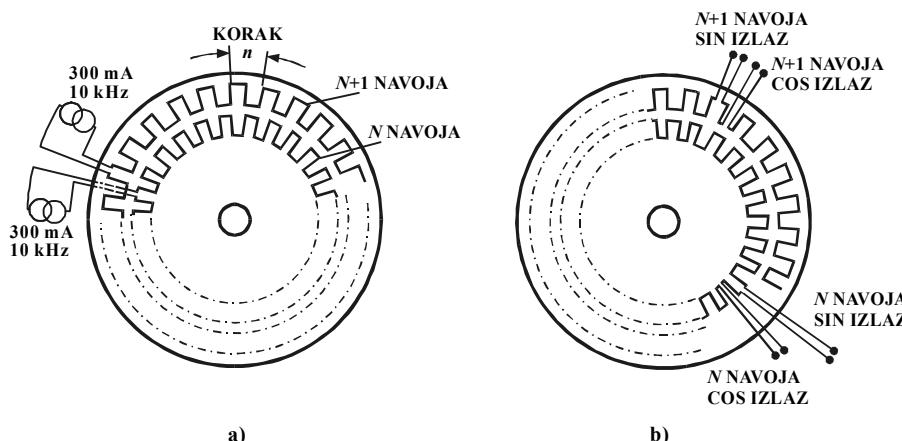
koji zakreće rotor prijemnika sve dok se rezultujući i pobudni fluks ne poklope. Tada rotor prijemnika zauzima isti ugaoni položaj kao i rotor predajnika, pa je $\Delta\theta = \theta_{pred} - \theta_{prij} = 0$. Kaže se da su položaji predajnika i prijemnika usaglašeni (sincronizovani), a moment (15.52) naziva se usaglašavajući moment. Tipična rezolucija je reda jednog stepena. Na tačnost indikatorskog režima rada selsina najviše utiču: trenje i opterećenje na osovinu selsin-prijemnika, neizbalansiranost rotora, nehomogenost magnetnog materijala, nejednakost vazdušnih zazora u različitim presecima itd. U

zavisnosti od veličine ugaone greške, selsini se dele na klase tačnosti: I - $\Delta\theta = \pm 0,75^\circ$, II - $\Delta\theta = \pm 1,5^\circ$, III - $\Delta\theta = \pm 2,5^\circ$. Zavisnost momenta od ugla $M=f(\theta)$ jeste statička karakteristika dva spregnuta selsina u indikatorskom režimu. Za male uglove ($\theta < 30^\circ$) karakteristika je linearna, tj. $M=f(\theta) \approx k\theta$, pri čemu se koeficijent prenosa izražava u Nm° .

Rotacioni induktosin je meduinduktivni (transformatorski) senzor, čiji je izlazni signal povezan sa merenim uglom sinusnom i kosinusnom funkcijom. Princip rada sličan je kao kod linearne induktosine. Osnovni elementi rotacionog induktosina su statorski i rotorski disk, prečnika 75–300 mm, između kojih se nalazi vazdušni zazor 0,1–0,5 mm. Rotorski i statorski navoje naneseni su radikalno u obliku tankog metalnog filma. Induktivna sprega između ovih navoja daje n perioda sin/cos signala za jedan puni obrtaj rotora (360°). Zahvaljujući velikom broju navoja postiže se tačnost merenja reda sekunde, pa čak i do $0,05''$, što je znatno bolje nego kod obrtnog transformatora i selsina. Primjenjuje se za merenje pozicije radarskih antena koje rotiraju određenom brzinom i u servosistemima gde je potrebna visoka pouzdanost.

Rotacioni induktosin obično se gradi kao inkrementalni senzor. Zbog toga će se informacija o originalnoj nuli izgubiti ukoliko dođe do prekida u napajanju u toku kretanja rotora. Poseban senzor-marker služi za generisanje impulsa za svaki puni obrtaj rotora. Tipični rotacioni induktosin ima dve inkrementalne staze, koje se međusobno razlikuju za jedan korak (slika 15.31). Označava se kao $N/N+1$ induktosin. Rotor se energizira strujom do 300 mA pri frekvenciji od 1000 kHz, a izlazni napon sa statora vodi se na prepojačavač i onda na A/D pretvarač sa rezolucijom od najmanje 20 bita.

Kada se navoje rotora i statora podudaraju, induktivna sprega je maksimalna, pa je i indukovani napon na statoru maksimalan. Kada se rotor pomeri za četvrtinu koraka, indukovani napon postane jednak nuli. Pri ravnomernom kretanju rotora izlazni napon je amplitudno modulisan, pri čemu je noseća frekvencija određena frekvencijom napona napajanja (5–20 kHz). Izlazni signal sa unutrašnje staze sa N



Slika 15.31. Rotacioni induktosin: a) rotor, b) stator

navoja nastaje na isti način, ali fazno prednjači ili kasni u zavisnosti od smera kretanja rotora.

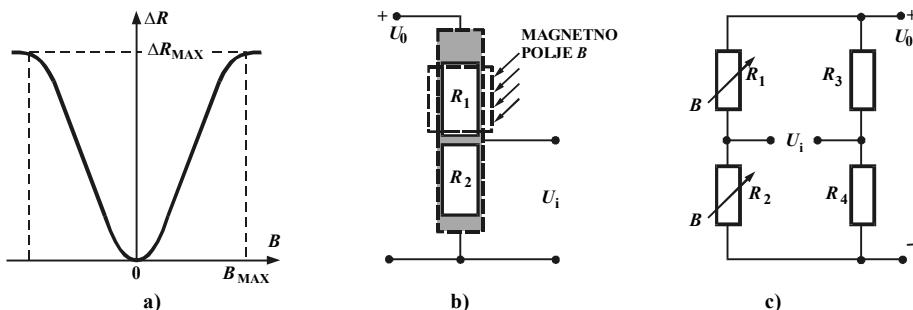
Magnetorezistivni senzori su specijalni beskontaktni senzori položaja, izrađeni od poluprovodnika čiji se otpor menja u magnetnom polju (Gausov efekat). Zato se još nazivaju i magnetoupravljeni ili Gausovi senzori. Materijali sa izrađenim magnetorezistivnim svojstvima su permaloj ($Ni_{81}Fe_{19}$), heteroepitaksijalne strukture InSb-NiSb (indijum-antimonid i nikal-antimonid), InSb-GaAs (indijum-antimonid i galijum-arsenid). Magnetorezistori u obliku diska sa kontaktima u sredini i po periferiji diska imaju najveću promenu otpora, ali zbog neravnomernog rasporeda strujnog toka imaju jako izražen temperaturni gradijent. Za praktičnu primenu najpovoljniji oblik ima tankoslojni pravougaoni element, mada je dubina modulacije manja nego kod diska. Najpoznatiji MR-senzori su: KMZ10 (Philips), FP210D250 (Siemens), 2SS52M (Honeywell) i KMT31 (HL Planar Technik).

Promena otpornosti MR-senzora u zavisnosti od polja B opisuje relacija:

$$\frac{\Delta R(B)}{R(0)} = F(B), \quad (15.53)$$

gde je $R(0)$ nominalni otpor (od 1Ω do nekoliko $k\Omega$) pri $B = 0$, a $\Delta R(B) = R(B) - R(0)$ prirast otpornosti koji karakteriše pretvaračku efikasnost senzora.

Funkcija $F(B)$ je nelinearna za polja indukcije $B < 0,3\text{T}$, a linearna za $B > 0,3\text{T}$, slika 15.32a. To je parna funkcija i zato jedan MR-senzor ne može da detektuje promenu smera vektora B . Indukcija B_{\max} koja dovodi do zasićenja u promeni otpora ΔR_{\max} , nominalni otpor $R(0)$ i osetljivost $S_{\text{MR}} = \Delta R(B)/\Delta B \Omega\text{T}^{-1}$



Slika 15.32. Magnetorezistivni senzor: a) tipična statička karakteristika, b) potenciometarski spoj, polumost sa diferencijalnim elementima R_1 i R_2 , c) redakcijski spoj.

projektuju se pogodnim izborom materijala i geometrije senzora. Obično kroz MR-senzor prolazi konstantna struja $I = 1 - 100\text{mA}$, a promena magnetnog polja detektuje se kao promena napona na krajevima senzora.

U zavisnosti od konkretne izvedbe, MR-čip sadrži jedan ili nekoliko otporničkih elemenata. Ako se dva magnetorezistivna elementa iste nominalne otpornosti spoje u seriju i preko njih pomera polje B , dobija se delitelj napona:

$$U_i = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_0. \quad (15.54)$$

Kada se polje nalazi iznad magnetootpornika R_1 , tada je $R_1 \gg R_2$ i izlazni napon ima najmanju vrednost: $U_{i\min} \neq 0$. Ako se polje pomeri nadole i prekrije jednak deo R_1 i R_2 , tada se dobija $U_i = 0,5U_0$. Kada je polje samo iznad R_2 , tada je $R_2 \gg R_1$ i izlazni napon je maksimalan: $U_i \approx U_0$. Ovakva konfiguracija predstavlja beskontaktni potenciometar (slika 16.32b).

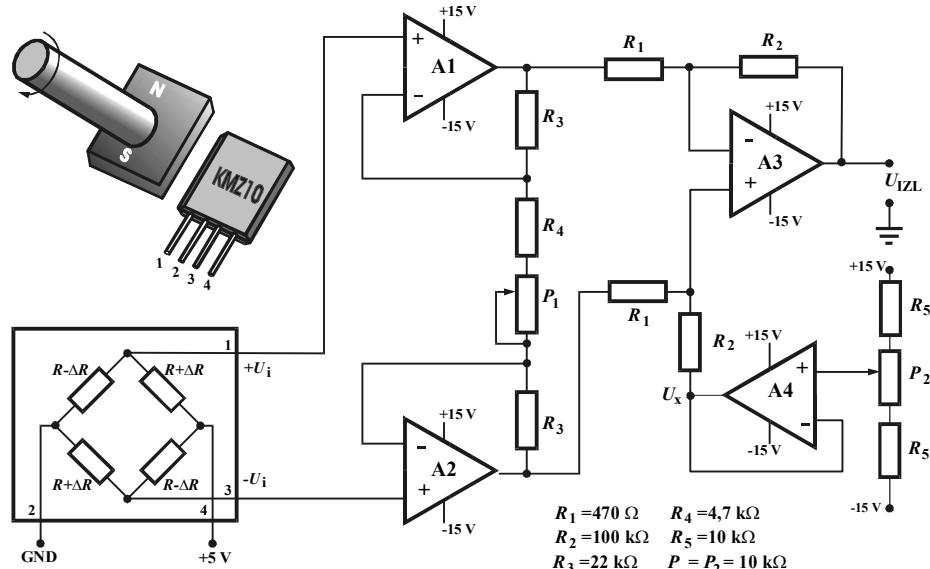
Na slici 16.32c predstavljen je polomost u kome dva magnetorezistivna elementa sa predmagnetizacijom B_0 čine diferencijalni spoj. Otpornici R_3 i R_4 projektuju se tako da izlazni napon bude jednak nula pri $B=0$. Kada se primeni mereno polje B , jednom otporniku raste otpor za $\Delta R = (dR/dB)\Delta B$, a drugome za isto toliko opada. Izlazni napon za polomost je:

$$U_i = U_0 \frac{\Delta R}{2R} = U_0 \frac{(dR/dB)\Delta B}{2R}, \quad (15.55)$$

Izlazna osetljivost na mereno polje je $U_i/\Delta B = U_0(dR/dB)/2$. Dva puta veći izlazni napon i dva puta bolja osetljivost dobija se pomoću punog mosta sa četiri magnetorezistivna elementa:

$$U_i = (\Delta R/R) \cdot U_0. \quad (15.56)$$

Zato se ugaoni položaj meri pomoću MR-senzora tipa puni most (slika 15.33). Na osovini je rotirajući magnet i tako se stvara promenljivo polje u funkciji ugaonog položaja. Izlazni napon mosta je reda mV, to je diferencija potencijala na



Slika 15.33. Magnetorezistivni senzor ugaonog pomeraja u spoju sa instrumentacionim pojačavačem

izlaznoj dijagonali mosta, pa se senzor priključuje na instrumentacioni pojačavač koji daje izlazni napon:

$$U_{\text{OUT}} = -\frac{R_2}{R_1} \left[1 + \frac{2R_3}{R_{P_1} + R_4} \right] \cdot (U_{+i} - U_{-i}) + U_x. \quad (15.57)$$

Kada se vrednosti otpornika naznačene na slici unesu u izraz za naponsko pojačanje instrumentacionog pojačavača, dobijaju se vrednosti pojačanja koje se mogu menjati potenciometrom P_2 u intervalu od $A_{\min} = 850$ (za $R_{P_1} = 10 \text{ k}\Omega$) do $A_{\max} = 2200$ (za $R_{P_1} = 0 \Omega$). Operacioni pojačavači koji se koriste u ovoj šemi su LM741 sa simetričnim napajanjem od $\pm 15 \text{ V}$. Preko jediničnog pojačavača A4 prenosi se napon U_x sa potenciometra P_2 koji služi za pomeranje statičke karakteristike po y-osi, tj. za poništavanje ofseta senzora i pojačavača.

Tipični merni opseg ovakvog senzora ugaonog pomeraja je $\pm 90^\circ$, napon napajanja $5 \pm 0,5 \text{ V}$, otpor opterećenja veći od $10 \text{ k}\Omega$, snaga disipacije 120 mW , osetljivost merenja ugaonog pomeraja $0,4 \text{ mV/V}^\circ$, radna temperatura od -45°C do 125°C . Karakteristike rotirajućeg magneta utiču na izlaz i zato je pre merenja neophodna kalibracija.

PITANJA I ZADACI

- 1) Pomoću struna-senzora meri se mehaničko naprezanje na površini radnog elementa koji je napravljen od materijala sa elastičnošću $E = 20,6 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$. Osetljivost senzora je $S_\varepsilon = y_m/\varepsilon_m = 100 \text{ mm}/(10^{-3} \text{ m/m})$. Odrediti mehaničko naprezanje σ ako je otklon struna-senzora $y = 75 \text{ mm}$.
Rešenje: $\sigma = 154,5 \text{ N/mm}^2$.
- 2) Objasniti sličnost i razlike u merenju linearног i ugaоног pomeraja. Kakve su mogućnosti pretvaranja linearног u ugaонi pomeraj i obrnuto?
- 3) Koje su glavne osobine inkrementalnih senzora pomeraja i pripadnih elektronskih šema?
- 4) Nacrtati principijelni izgled difrakcionih rešetaka i moar-linija za merenje ugaonog pomeraja. Ima li principijelnih razlika u pogledu detekcije ovih linija i linija dobijenih za linearni pomeraj? U čemu je suština „razvlačenja skale“ primenom moar-tehnike?
- 5) Navesti sličnost i razlike mernih šema za priključivanje otporničkih, kapacitivnih i elektromagnetskih senzora pomeraja.
- 6) Komparirati mogućnosti merenja malih i velikih pomeraja primenom radiacionih metoda.
- 7) Objasniti daljinsko prenošenje ugaone pozicije pomoću selsina.

LITERATURA

1. A.N. Marčenko, S.V. Svečnikov, A.K. Smovž: *Poluprovodnikovye senzornye potenciometričeskie elementy*, Radio i svjaz, Moskva, 1988.
2. *Osnovi elektronike. Automatika* (prev. sa ruskog *Avtomatika* - N.B. Levit i V.K. Podgorni), DSNO, Beograd, 1969.
3. V.D. Lizunov, V.M. Basel'ev, V.V. Miščenko, J.O. Gončarenko: *Obrascovye mery malyh dlin povyšennoj točnosti*, Izmeritel'naja tehnika, Moskva, 4/1989, str. 4-6.
4. A.A. Voronov, V.K. Titov: *Osnovy teorii avtomatičeskogo regulirovaniija i upravlenija*, Visšaja škola, Moskva, 1977.
5. R. Rajković, R. Bojčevski: *Merenje uglova optičkim inkrementalnim davačem sa aktivnim učešćem mikroprocesora*, VI Savetovanje o merenju, JUREMA 29 (1984), str. 69-71, Zagreb, 1984.
6. M. Nemet: *Merenje pomaka pri numeričkom upravljanju alatnih strojeva*, JUREMA 25 (1980), Svezak 4, str. 33-38, Zagreb, 1980.
7. J. Ljubić: *Primjena moire tehnike za mjerjenje linearnih pomjera*, JUREMA 25 (1980), svezak 2, str. 133-138, Zagreb, 1980.
8. L. Trasov: *Laser physics and applications*, prev. sa ruskog, Mir, Moskva, 1986.
9. L.M. Pljuta: *Golografičeskij interferometr s vzaimno ortogonal'nym raspoloženiem vektorov čuvstvitel'nosti*, Izmeritel'naja tehnika, Moskva, 1/1989, str. 24-25.
10. V.G. Žilin: *Voloknno-optičeskie izmeritel'nye preobrazovateli skorosti i davlenija*, Energoatomizdat, Moskva, 1987.
11. B.A. Til'man: *Mnogoslojnye kodovye škaly v datčikah položenija*, Izmeritel'naja tehnika, Moskva, 6/1989, str 17-19.
12. G. Švenk, M. Popović: *Ispitivanje vibracija metodom holografije sa usrednjavanjem po vremenu*, JUREMA, 1990.
13. M.Kurosawa, M.Takahashi, T.Higuchi : *An ultrasonic XY stage using 10MHz surface acoustic ultrasonic wave*, pp. 538-542, IEEE Ultrasonic Symposiu, 1994.
14. P.G.Davis, I.J.Bush: *Fiber-optic displacement sens*, IV Pacific Northwest Fiber Optic Sensor Work- shop, SPIE VOL PBD, 1998.
15. C.S.Roumenin: *Solid state magnetic sensors*, Elsevier, Amsterdam, 1994.
16. *Semiconductor sensors - Data handbook*, Philips Semiconductors, 1992.
17. D.S.Nyce: *Linear position sensor - Theory and application*, Wiley-Interscience, New York, 2004.
18. *Principi rada struna senzora*: www.aguide.net/magazine/Q2-2000/pdf/pg8.pdf
19. *Rotacioni enkoder*: www.beied.com/
20. *Induktosin*: ruhle.com
21. *Dokumentacija proizvođača*: www.pm.instrumentation.com, www.rdpe.com/index.htm, www.omega.com, www.siliconsensors.com/CP_Ph.html, www.sitck.se, www.udt.com/app_notes.htm, www.honeywell.com

16

SENZORI BRZINE I UBRZANJA

16.1. FIZIKALNI OSNOVI MERENJA BRZINE I UBRZANJA

Translatorna i ugaona brzina u savremenoj tehničkoj praksi mere se u širokom opsegu: translatorna brzina $0 - 15\,000 \text{ m/s}$, a ugaona $0 - 20\,000 \text{ rad/s}$. Pomoću pogodnog prenosnog mehanizma translatorna brzina obično se pretvara u ugaonu. Zato će se posebna pažnja u narednom tekstu posvetiti senzorima ugaone brzine – tahometrima. Jedinica za merenje translatorne brzine je m/s , ugaone rad/s , a jedinica za merenje frekvencije okretaja je s^{-1} .

Ubrzanje je neophodan parametar u sistemima upravljanja kretanjem centra mase pokretnih objekata (aviona, raketa, brodova, podmornica, brzih vozova i dr.) i u sistemima inercijalne navigacije. Senzori za merenje ubrzanja nazivaju se akcelerometri. Jedinica translatornog ubrzanja je m/s^2 , a ugaonog rad/s^2 . Ubrzanje se često izražava i pomoću ubrzanja sile Zemljine teže ($g=9,80665 \text{ m/s}^2$).

Klasifikacija tahometara vrši se prema: tipu konverzije energije u primarnom elementu senzora, načinu primene i metodi merenja. Prema tipu konverzije razlikuju se: mehanički, magnetni, elektromehanički i stroboskopski tahometri. Mehanički tahometri imaju samo mehaničke pretvaračke elemente (centrifugalni, frikcionni, vremenski, hidraulički i pneumatski tahometri). Glavni element magnetnih tahometara je indukciona pretvarač. Elektromehanički tahometri u svojim mernim kolima sadrže elektromehaničke pretvarače (tahometarski generatori, tahometri sa brojanjem impulsa). Stroboskopski tahometri rade na principu stroboskopskog efekta.

Po načinu primene razlikuju se stacionarni i prenosivi tahometri. Stacionarni tahometri trajno su postavljeni na osovinu objekta, a prenosivi (ručni) priključuju se na osovinu povremeno. Prema metodi merenja, tahometri se dele na kontaktne i beskontaktne.

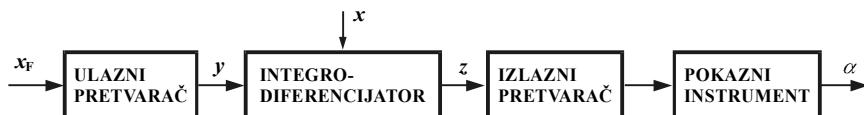
Klasifikacija akcelerometara u klasičnom obliku je iskustvena i obično se provodi prema konstruktivnim osobinama akcelerometra (način pomeranja i način vešanja mase), prema tipu izlaznog signala (kontinualni, diskretni), prema tipu veze između merenog ubrzanja i izlaznog signala (prosti i integrirajući), prema načinu konverzije ubrzanja u izlazni signal (direktni i kompenzacioni) itd. Najčešće se klasifikacija vrši prema odnosu vlastite frekvencije akcelerometra i opsega frekventnog spektra merenog ubrzanja. U tom smislu razlikuju se:

- akcelerometri, koji imaju vlastitu frekvenciju iznad svih frekvencija u spektru merenog ubrzanja;
- velosimetri, čija je vlastita frekvencija bliska frekvencijama koje su sadržane u spektru merenog ubrzanja;
- vibrometri, čija je vlastita frekvencija manja od frekvencija koje su sadržane u spektru merenog ubrzanja;
- rezonansni akcelerometri, koji imaju vlastitu frekvenciju jednaku osnovnoj frekvenciji merene vibracije;
- polurezonantni akcelerometri, čija se vlastita frekvencija razlikuje od osnovne frekvencije merenog ubrzanja za neki određeni iznos.

Principi gradnje senzora brzine i ubrzanja. Osnovni element senzora brzine i ubrzanja je diferencijator, koji omogućava automatsku konverziju merene ulazne veličine u izlazni signal proporcionalan izvodu te veličine.

Ako je poznata jednačina linearnog (translatornog) kretanja tela $x = f(t)$, tada je linearna brzina izvod pomeraja u vremenu $v = dx/dt$, a ubrzanje drugi izvod pomeraja u vremenu $a = d^2x/dt^2$ ili izvod brzine u vremenu $a = dv/dt$. Integriranjem se može iz poznatog ubrzanja dobiti brzina $v = \int_{t_1}^{t_2} a dt$, a pomeraj integriranjem brzine $x = \int_{t_1}^{t_2} v dt$. Na sličan način se iz poznatog ugaonog kretanja $\alpha = f(t)$ diferenciranjem dobijaju ugaona brzina $\omega = d\alpha/dt$ i ugaono ubrzanje kao $a_\omega = d^2\alpha/dt^2$ ili $a_\omega = d\omega/dt$, a integriranjem $\alpha = \int \omega dt$ i $\omega = \int a_\omega dt$.

Prethodno razmatranje koje se odnosi na mehaničko kretanje može se uopštiti: pomoću diferenciranja ili integriranja ulazne veličine mogu se odrediti brzina i ubrzanje te veličine. U skladu s tim, struktura senzora brzine i ubrzanja sastoji se iz četiri osnovna bloka u serijskoj vezi: ulaznog pretvarača, integrodiferencirajućeg bloka, izlaznog pretvarača i bloka za indikaciju izlaza (slika 16.1). Zadatak ulaznog i izlaznog pretvarača je da omogući normiranje i usaglašavanje signala sa integrodiferencirajućim blokom.



Slika 16.1. Principijelna blok-struktura senzora brzine i ubrzanja

Integrodiferencijator je funkcionalni pretvarač čija je izlazna veličina z izvod ili integral ulazne veličine y , pri čemu je $y = y(t)$ ili $y = y(x)$, odnosno:

$$z = dy/dt \quad z = \int y dt \quad (16.1)$$

ili:

$$z = \frac{dy}{dx} \quad z = \int y \, dx. \quad (16.2)$$

Za diferenciranje i integriranje po vremenu t dovoljno je da blok ima samo jedan ulaz. Kada se ove operacije obavljaju po nevremenskom argumentu x , potreban je i drugi ulaz. Integriranje po argumentu x u tom slučaju realizuje se u tri etape:

- 1) diferenciranje x po vremenu t : $\dot{x} = dx/dt$
- 2) množenje izvoda x po t i y : $y\dot{x} = y(dx/dt)$
- 3) integriranje proizvoda $y\dot{x}$ po t :

$$z = \int y \dot{x} \, dt = \int y(dx/dt) \, dt = \int y \, dx. \quad (16.3)$$

Operacija diferenciranja po argumentu x u bloku sa dva ulaza takođe se provodi u tri etape:

- 1) diferenciranje x i y po t : $\dot{x} = dx/dt$ i $\dot{y} = dy/dt$
- 2) množenje izlazne veličine z i izvoda $\dot{x} = dx/dt$: $z\dot{x} = z(dx/dt)$
- 3) izjednačavanje proizvoda $z\dot{x}$ sa izvodom ulaza $\dot{y} = dy/dt$:

$$z(dx/dt) = dy/dt \quad \text{ili} \quad z = \frac{dy}{dx}. \quad (16.4)$$

Integrodiferencijator n -tog reda gradi se serijskim povezivanjem n integrodiferencijatora prvog reda, tako da se na izlazu dobija:

$$z_n = d^n y / dx^n \quad \text{ili} \quad z_n = \int \int \dots \int y \, dx^n. \quad (16.5)$$

Integrodiferencijatori se razlikuju po fizikalnom principu rada (mehanički, elektromehanički, električni, elektronski, optički i dr.), po tipu procesa koji služi za integriranje i diferenciranje (stacionarni, nestacionarni), po tipu operacija (integrator, diferencijator) i po strukturi (direktni, inverzni). Inverzna struktura omogućava zamenu izlaza i ulaza, tako da integrator i diferencijator mogu zameniti uloge.

Frikcioni integrodiferencijator pravi se pomoću diska i kotura ili pomoću diska i kotura sa kugličnim prenosom (slika 16.2). Ako nema klizanja kotura, u tački dodira linearne brzine kotura i diska su jednake, pa je:

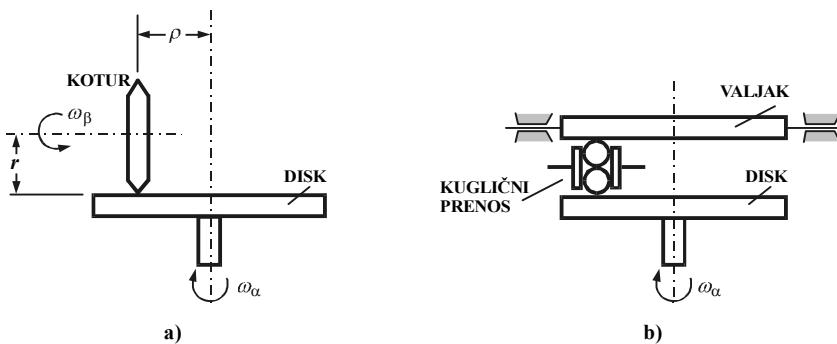
$$\omega_\alpha \rho = \omega_\beta r$$

$$\frac{d\alpha}{dt} \rho = \frac{d\beta}{dt} r, \quad (16.6)$$

gde su ω_α i ω_β ugaone brzine diska i kotura, α i β ugaoni pomeraji njihovih osa, te ρ i r pozicija i radijus kotura. Iz jednačine (16.6) proizilazi zavisnost:

$$\rho d\alpha = r d\beta , \quad (16.7)$$

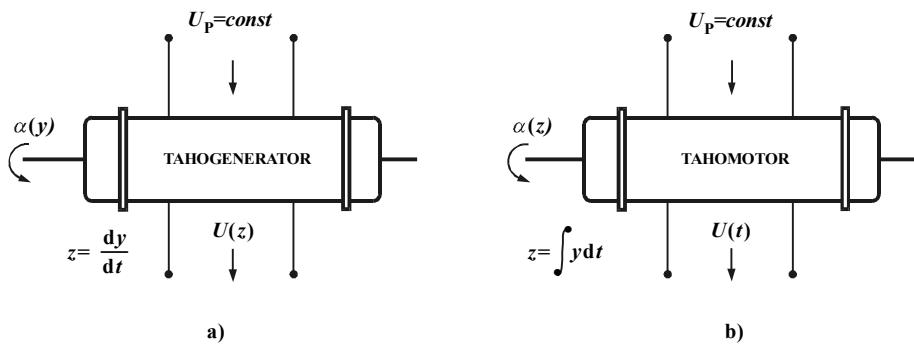
koja zadovoljava ranije postavljene relacije (16.3) i (16.4). Od tri promenljive veličine (α , β i ρ) dve predstavljaju ulaze, a jedna izlaz. Obično se za argument x uzima ugao zakretanja diska α , za funkciju $y=f(x)$ uzima se ugao zakretanja kotura $\beta=f(\alpha)$, a izlaz z je radijalna pozicija ρ .



Slika 16.2. Frikcioni integrodiferencijator: a) sa koturom i diskom, b) sa kugličnim prenosom

Na osi kotura ne sme delovati opteretni moment, jer bi došlo do klizanja i grešaka u diferenciranju i integriraju. Zato se za nominalnu ugaonu brzinu diska uzima najviše 1000 min^{-1} . Tome odgovara brzina kotura od $2500 - 3000 \text{ min}^{-1}$ u krajnjem položaju. Obrtni moment na disku uspostavlja stacionarno stanje ugaone brzine. Tačnost frikcionalnih integrodiferencijatora sa koturom i diskom je do $\pm 0,0001\%$.

Elektromašinski integrodiferencijatori su jednosmerne i naizmenične taho-mašine. Svojstvo ovih mašina je da operaciju diferenciranja po vremenu t provode u generatorskom režimu, a operaciju integriranja po t u motornom režimu (slika 16.3).



Slika 16.3. Elektromašinski integrodiferencijator: a) tahogenerator, b) tachomotor

Iz elektrotehnike je poznato da za obrtne električne mašine važi približna relacija:

$$U_p \omega = k U_r , \quad (16.8)$$

gde je U_p napon pobude, a U_r napon na namotajima rotora. Kada mašina radi u generatorskom režimu, tada je:

$$U_r = (U_p/k) \omega = c(d\alpha/dt) , \quad (16.9)$$

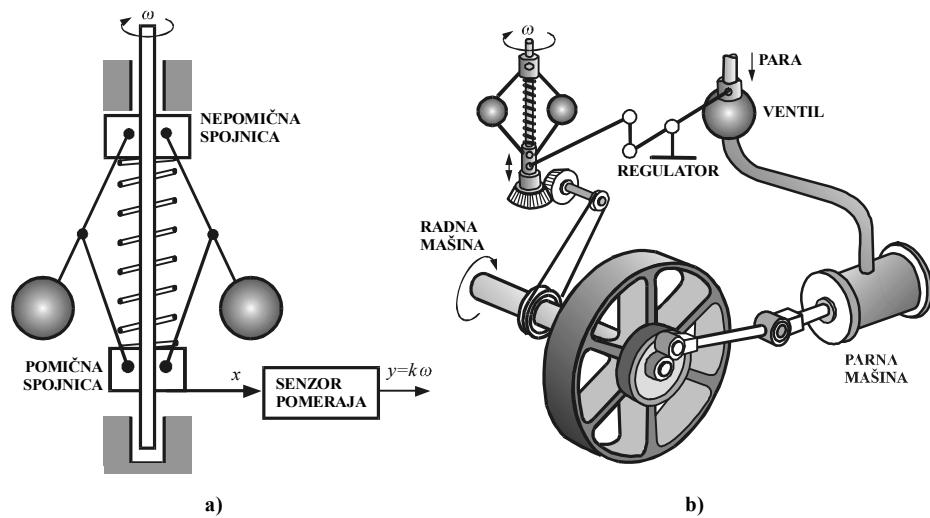
a kada mašina radi u režimu motora, tada je:

$$\alpha = (k/U_p) \int U_r dt = (1/c) \int U_r dt . \quad (16.10)$$

Kao što se vidi, ovde postoji množenje (proizvod $U_p \omega$), no budući da se desna strana jednačine (16.8) ne može napisati u diferencijalnom obliku, znači da je moguće samo integriranje i diferenciranje po t . Da bi se omogućile ove operacije i po nevremenskom argumentu x , primenjuju se šeme sa dve ili tri mašine. Opšta svojstva elektro-mašinskih integrodiferencijatora, pored navedenih, jesu inercionost, mogućnost inverzije i upotreba stacionarnog procesa za operacije integriranja i diferenciranja.

16.2. SENZORI UGAONE BRZINE

Centrifugalni senzor je mehanički uređaj. Njegov rad zasniva se na pojavi centrifugalne sile pri rotacionom kretanju. Na osnovu ovakvog senzora J. Vat je 1784. napravio centrifugalni regulator brzine parne mašine (slika 16.4a). Ovaj datum smatra se datumom naučnog utemeljenja teorije automatskog upravljanja.



Slika 16.4. Centrifugalni senzor: a) konstrukcija, b) primena na parnoj mašini

Na rotirajućoj osovini centrifugalnog senzora je teret – kugle koje su pomoću zglobne veze i poluga povezane sa spojnicama (slika 16.4b). Jedna spojница je fiksirana za osovinu, a druga se pomiče duž osovine. Između spojnice je sabijena opruga, koja teži da se izduži i da tako približi kugle osovini senzora. Na kuglama se zbog rotacije javlja centrifugalna sila F_c , a njena komponenta duž osovine $F_{os} = k_c \omega^2$ pomera pokretnu spojnicu dok se ne uravnoteži silom opruge $F_o = k_o x$:

$$k_o x = k_c \omega^2. \quad (16.11)$$

Kretanje spojnica prenosi se na pokazni instrument sa kazaljkom ili na senzor linearног pomeraja sa električnim izlazom. Linearizacija statičke karakteristike (16.11) postiže se upotreбom nelinearne opruge čija je sila $F_o = kx^2$. Tipična tačnost centrifugalnih senzora je $\pm 1 - 2\%$.

Senzori sa satnim mehanizmom (chronometarski tahometri), rade na principu merenja broja obrtaja u toku određenog perioda vremena. Prema tome, oni ne mere trenutnu vrednost ugaone brzine, već srednju vrednost. Zato se ovi senzori nazivaju i tahometri srednje brzine ili tahoskopi. Ako je trenutna brzina osovine $\omega = \omega(t)$, srednja brzina ω_{sr} u toku vremenskog intervala T računa se pomoću integrala:

$$\omega_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^T \omega(t) dt = \frac{2\pi n}{T}, \quad (16.12)$$

gde je n broj obrtaja osovine u toku vremena T . Senzori srednje brzine imaju tri bitne konstruktivne celine: satni mehanizam, brojač obrtaja i uređaj za startanje i resetovanje. Glavna svojstva tahoskopa su jednostavnost izrade, visoka pouzdanost i relativno visoka tačnost ($\pm 1\%$). Veliku primenu imaju u saobraćajnim vozilima.

Magnetni senzor ima stalni magnet na osovini čija se brzina meri. Na drugoj osovini, koja se nalazi na istom pravcu sa glavnom osovinom, učvršćen je cilindrični poklopac od nemagnetnog materijala zanemarljivog električnog otpora – najčešće je to aluminijum. Na istoj osovini je i mehanizam za pokazivanje, čija je opruga jednim krajem zavarena za osovinu, a drugim krajem za kućište senzora (slika 16.5a).

Pri okretanju glavne osovine magnetne silnice stavnog magneta presecaju poklopac, pa se u njemu indukuje elektromotorna sila i javljaju vihorne struje. Uzajamno delovanje magnetnog polja vihornoih struja i polja stavnog magneta stvara rotirajući moment u odnosu na osu poklopca. Ovaj moment zakreće poklopac, u istom smeru u kojem se okreće stalni magnet, sve dok se ne uspostavi stanje ravnoteže sa protivdelujućim momentom opruge:

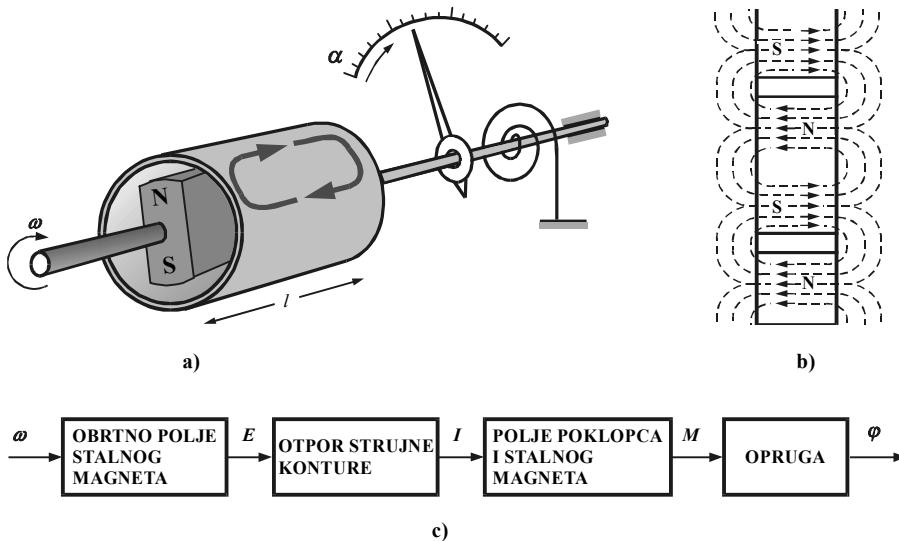
$$BII \cdot D \cdot 2p = \frac{Eb h^3}{12L} \alpha, \quad (16.13)$$

gde su BII magnetna sila na poklopac [N], D prečnik magneta [m], $2p$ broj pari polova magneta, B magnetna indukcija [T], I dužina cilindra (konture), I struja pri delovanjem jednog para polova [A], α ugao zakretanja poklopca [$^\circ$], E Jangov modul elastičnosti [Pa], te b , h i L širina, debljina i dužina opruge [m].

Struja I određuje se iz odnosa elektromotorna sile U koja se indukuje na poklopcu zbog rotacionog kretanja magneta i ukupnog električnog otpora konture R :

$$I = \frac{U}{R} = \frac{Blv}{R} = \frac{Bl}{R} \cdot \frac{D\omega}{2}, \quad (16.14)$$

gde je ω merena ugaona brzina.



Slika 16.5. Magnetni senzor: a) funkcionalna šema, b) magnetno polje, c) lanac konverzija

Na slici 16.5b vidi se da su konture složenog oblika, pa se zato otpor R računa kao $R = k_k \rho / \Delta$, gde je k_k korekcioni koeficijent pomoću kojeg se uzima u obzir neravnomerni raspored strujnih kontura, ρ specifični otpor materijala od kojeg je izrađen poklopac [Ωm] i Δ debljina poklopca [m]. Ako se izraz za struju I uvrsti u jednačinu ravnoteže momenata (16.12), dobija se linearna statička karakteristika:

$$\alpha = \frac{12(BlD)^2 \Delta \rho L}{k_k \rho E b h^3} \omega = k \omega. \quad (16.15)$$

Koeficijent statičkog prenosa k zavisi od konstruktivnih, električnih i magnetnih parametara. Praktični problem javlja se kod merenja malih ugaonih brzina, jer treba obezbediti dovoljan moment za zakretanje poklopca. Analiza leve strane jednačine (16.13) pokazuje da se to može postići povećanjem magnetne indukcije B stalnog magneta ili povećanjem struje I . Struja će biti veća što je specifični otpor materijala ρ manji. Interesantno je da na povećanje momenta broj polova slabo utiče budući da istovremeno raste i koeficijent k_k .

Na tačnost magnetnog senzora nepovoljno deluju temperaturne promene. Sa porastom temperature indukcija B stalnog magneta i modul elastičnosti E materijala od kojeg je napravljen poklopac opadaju, a specifični otpor ρ i dužina opruge L rastu. Ako se navedeni parametri (B , E , ρ , L) odaberu na adekvatan način, ukupno

delovanje temperature na tačnost može se značajno smanjiti. Tipična tačnost magnetskih senzora je od $\pm 0,5\%$ do $\pm 1\%$.

Kada se ukloni opruga, okretanje glavne osovine u celosti se prenosi na okretanje osovine na kojoj je učvršćen poklopac. Tako se pravi magnetna spojnica, koja služi za beskontaktni prenos obrtaja osovine u mernim instrumentima.

Istosmerni tahogenerator je istosmerni generator koji stvara elektromotornu silu proporcionalnu brzini obrtanja rotora. Pobuda tahogeneratorske ostvaruje se pomoću stalnih magneta (slika 16.6a) ili namotaja sa konstantnom i nezavisnom pobudom (slika 16.6b). Rotorski (armaturni) namotaj preseca magnetno polje i indukuje se elektromotorna sila E proporcionalna fluksu pobude ϕ i brzini obrtanja ω :

$$E = c\phi\omega. \quad (16.16)$$

Konstanta proporcionalnosti c odražava konstruktivna svojstva mašine. U realnim uslovima na izlazu tahogeneratorske je priključeno neko opterećenje R_L , pa je struja u kolu rotora:

$$I = \frac{E}{R_r + R_L} = \frac{c\phi\omega}{R_r + R_L}, \quad (16.17)$$

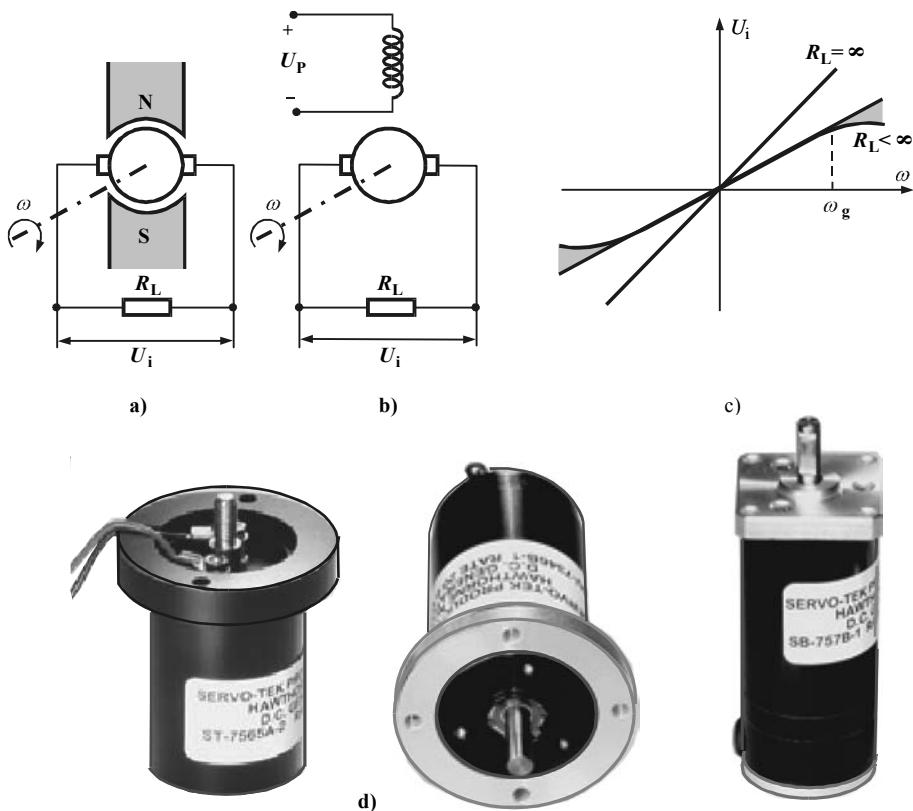
gde je R_r unutrašnji otpor tahogeneratorskog kola. Izlazni napon na opterećenju R_L proporcionalan je brzini vrtnje, a polaritet mu se menja s promenom smera vrtnje:

$$U_i = \frac{c\phi\omega}{R_r + R_L} R_L = k\omega. \quad (16.18)$$

Koeficijent statičkog prenosa k iznosi $3\text{--}100\text{ mV/ob/min}$. Na tačnost linearne karakteristike najviše utiču opterećenje, prelazni otpor četkica i temperatura. Svakoj vrednosti otpora opterećenja $R_L < \infty$ odgovara određeni dijapazon promene brzine ω od 0 do ω_g za koji je izlazni napon linearan. Sa porastom brzine rastu struja rotora i indukcija, ali za $\omega = \omega_g$ struja rotora poprima takve iznose da indukcija dostiže zasićenje, pa statička karakteristika postaje nelinearna (slika 16.6c). Zbog toga se opterećenje bira tako da struja rotora bude $0,01\text{--}0,02\text{ A}$. Prelazni otpor četkica utiče na pojavu zone neosetljivosti, jer se pri malim brzinama generiše elektromotorna sila približno istog reda kao i pad napona na prelaznom otporu. Granice zone neosetljivosti određuju se kao $\omega_{\min} = \Delta U_k / k_{\max}$, gde je ΔU_k pad napona na kontaktima i k_{\max} maksimalna vrednost koeficijenta pojačanja. Osim toga varničenje četkica može da predstavlja izvor radio smetnji. Uticaj temperature ogleda se u promeni otpora pobudnog kruga, a time se menja struja pobude i pobudni fluks. Preporučuje se upotreba tahogeneratorske zasićene magnetne krugove, jer je tada statička karakteristika manje osetljiva na delovanje temperature. Njihova tipična tačnost je reda $\pm 1\%$, opseg $0\text{--}5\,000\text{ ob/min}$.

Tahogenerator ima prenosnu funkciju aperiodskog bloka prvog reda:

$$G_{TG}(s) = U_i(s) / \Omega(s) = \frac{k}{\frac{L_r + L_L}{R_r + R_L} s + 1}, \quad (16.19)$$



Slika 16.6. Istosmerni tahogenerator: a) pobudno kolo sa stalnim magnetom, b) nezavisno pobudno kolo, c) uticaj opterećenja na statičku karakteristiku, d) izgled tahogeneratora

gde je $\Omega(s) = L [\omega(t)]$. Inercionost tahogeneratora je slabo izražena, budući da su induktivnosti rotorskog navoja i opterećenja L_r i L_L praktično zanemarljivo mali. Tako se tahogenerator može tretirati kao bezinercioni blok sa prenosnom funkcijom:

$$G_{TG}(s) = U_i(s) / \Omega(s) = k . \quad (16.20)$$

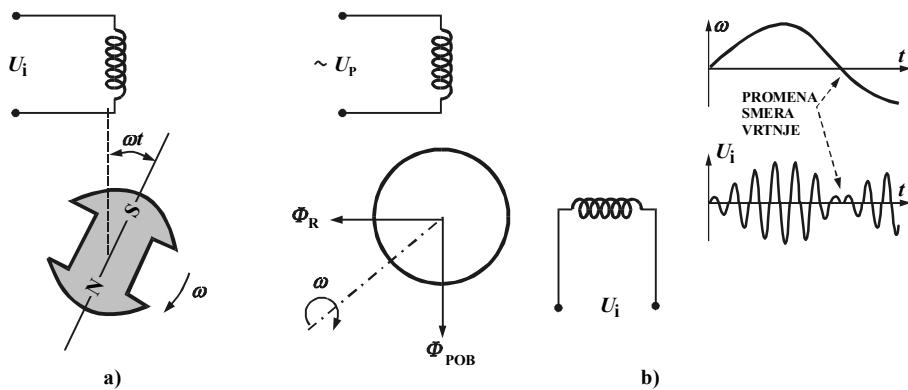
Imajući u vidu da je ugaona brzina derivacija ugaone pozicije osovine $\omega(t) = d\theta/dt$, istosmerni tahogenerator je u odnosu na ugaonu poziciju idealni diferencijator:

$$G_{TG} = U_i(s) / \Theta(s) = ks . \quad (16.21)$$

Istosmerni tahogeneratori se priključuju na A/D konvertor preko jednog nisko propusnog filtera radi otklanjanja impulsnih špiceva sa komutatora i otporničkog delitelja za usaglašavanje potrebnog naponskog nivoa.

Naizmenični tahogeneratori prave se kao sinhroni ili asinhroni tahogeneratori. U prvom slučaju to je jednofazni sinhroni motor sa rotorom od

stalnog magneta (slika 16.7a). Promena ugaone brzine takvog rotora odražava se na promenu amplitudu i frekvenciju izlaznog napona. Mana ovog tahogeneratora je nelinearna statička karakteristika. Mnogo češće naizmenični tahogenerator pravi se kao dvofazni asinhroni motor. Kratko spojeni rotor izrađuje se u obliku šupljeg aluminijumskog kaveza. Na statoru se pod uglom od 90° nalaze pobudni i generatorski namotaji. Pobudni namotaj priključen je na naizmenični izvor frekvencije 50 ili 400 Hz, a sa generatorskog namotaja dobija se izlazni napon proporcionalan ugaonoj brzini (slika 16.7b). Kada rotor miruje, naizmenični magnetni fluks ϕ_{pob} normalan je na izlazni namotaj, te je u njemu elektromotorna sila jednaka nuli. Kada rotor počne da se okreće, u kratko spojenom rotorskom navoju indukuje se obrtna elektromotorna sila, koja stvara fluks ϕ_r u smeru izlaznog navoja. Delovanjem fluksa ϕ_r , u izlaznom namotaju nastaje naizmenična elektromotorna sila iste frekvencije kao i pobudni napon i sa amplitudom koja je proporcionalna brzini vrtnje rotora, tj. izlazni signal je amplitudno modulisan. Za jedan smer vrtnje izlazni signal je u fazi sa pobudnim signalom, a za suprotni smer vrtnje faza se promeni za π . Promene smera ugaone brzine mogu se registrovati demodulacijom izlaznog signala pomoću fazno osjetljivog detektora.



Slika 16.7. Naizmenični tahogenerator: a) sinhroni tahogenerator, b) asinhroni tahogenerator

Statička karakteristika $U_i = f(\omega)$ ima najbolju lincarnost u poređenju sa ostalim tahogeneratorima. Glavne osobine asinhronog tahogeneratora su visoka pouzdanost i mala izlazna snaga. Tipična tačnost je $\pm 0,05\%$, opseg 0–4 000 ob/min, a osjetljivost 3 mV/ob/min.

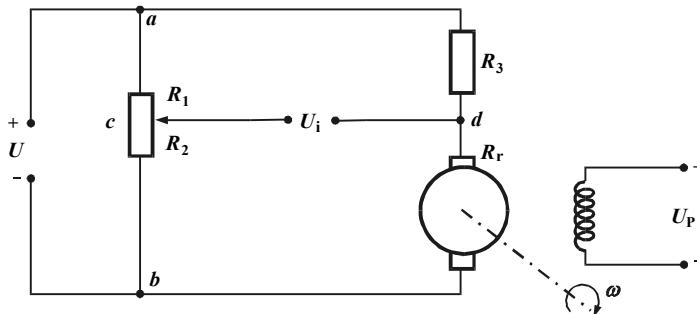
Prednost tahogeneratora je u jednostavnoj konstrukciji i relativno visokoj tačnosti. Nedostaci se odnose na direktnu vezu između rotirajuće osovine i osovine tahogeneratora. Zbog habanja i netačnog centriranja može doći do slabljenja i pucanja veze.

Tahometarski mostovi su specijalni istosmerni ili naizmenični mostovi, koji se primenjuju kao brzinska povratna sprega u sistemima automatskog upravljanja. Sistem upravljanja sa tahometarskim mostom je jednostavniji, a statičko i dinamičko opterećenje na izvršni motor su manji. Na slici 16.8 prikazan je istosmerni tahometarski most u čiju je jednu granu uključen otpor rotora R_r . Napon napajanja mosta U

istovremeno napaja i kolo rotora. Ako u izlaznom kolu ne teče struja ($R_{\text{opt}} = \infty$), tada su izlazni napon i struja rotora:

$$U_i = U_{\text{ac}} - U_{\text{ad}} = UR_1/(R_1 + R_2) - I_r R_3, \quad (16.22)$$

$$I_r = (U - k\omega)/(R_r + R_3), \quad (16.23)$$



Slika 16.8. Tahometarski most

gde je $k = E/\omega = (U_r - I_r R_r)/\omega$ konstanta motora. Eliminacijom promenljive I_r , dolazi se do rešenja

$$U_i = U \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_r + R_3} \right) + \frac{k R_3}{R_r + R_3} \omega. \quad (16.24)$$

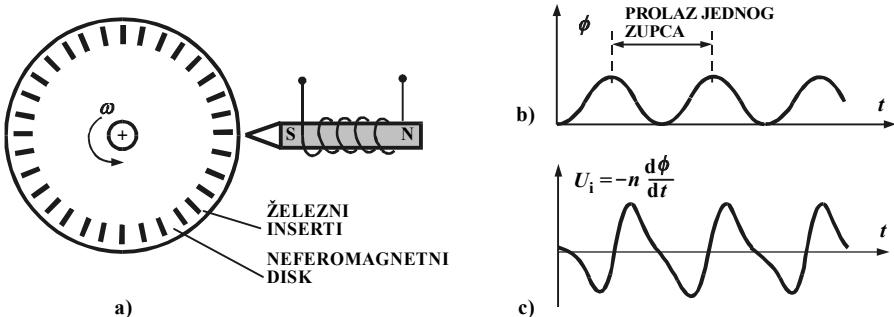
Kada se most nalazi u ravnoteži, tada je $R_1 R_r = R_2 R_3$, pa je izraz u zagradi jednak nuli. Ravnoteža se postiže pomeranjem klizača potenciometra dok motor miruje ($\omega = 0$). Tako se dobija da je izlazni napon direktno proporcionalan ugaonoj brzini:

$$U_i = k R_3 \omega / (R_r + R_3) = k_{\text{TM}} \omega, \quad (16.25)$$

gde je k_{TM} koeficijent prenosa (osetljivost) tahometarskog mosta. Statička karakteristika $U_i = f(\omega)$ linearna je samo kad je opterećenje veliko. U dinamičkom pogledu tahometarski most ponaša se kao bezinercioni blok. Tipična tačnost je $\pm 2 - 5\%$. Glavne prednosti tahometarskog mosta su jednostavnost i mogućnost beskontaktnog merenja ugaone brzine.

Elektromagnetski (reluktantni) senzori ugaone brzine rade na principu promene otpornosti magnetnog kola usled prolaska železnih zubaca diska koji je montiran na rotirajuću osovinu. To su indukcioni ili induktivni senzori, sa mnogo brojnim varijacijama u konstrukciji.

Indukcioni senzori ugaone brzine sastoje se iz dva dela. Prvi deo uvek je postavljen na osovinu. Izgrađen je u obliku diska od neferomagnetskog materijala po čijem se obodu nalaze pravilno raspoređeni inserti od železa (slika 16.9a) ili u obliku zupčanika od feromagnetskog materijala. U neposrednoj blizini rotirajućeg dela, na rastojanju oko 0,5 mm, fiksiran je indukcioni detektor pomeraja. Svojom



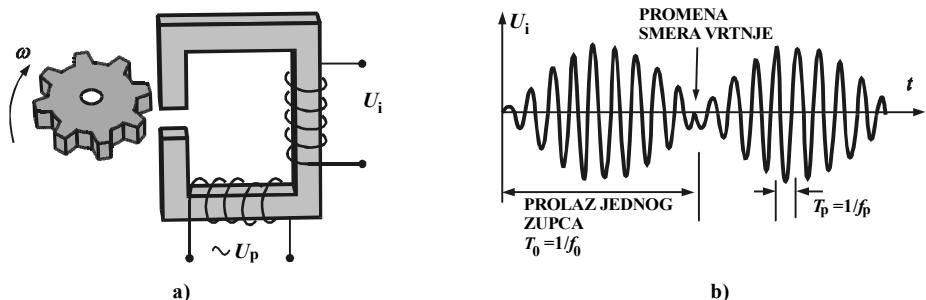
Slika 16.9. Elektromagnetski indukcijski senzor ugaone brzine: a) principijelna šema, b) vremenska promjena magnetnog fluksa, c) promjena izlaznog napona sa brzinom vrtnje

magnetopobudnom silom M stalni magnet stvara magnetni fluks $\phi = M/R_m$, gde je R_m magnetni otpor između polova magneta. Primicanjem feromagnetnog inserta na disku ili zupca na zupčaniku smanjuje se magnetni otpor i, prema tome, raste magnetni fluks. Odmicanjem inserta ili zupca stvara se suprotni efekat. Tako nastaje vremenska promjena magnetnog fluksa $\phi(t)$ (slika 16.9b), odnosno indukuje se elektromotorna sila $e = -d\phi/dt$ (slika 16.9c).

Karakteristično je da su i amplituda i frekvencija izlaznog napona proporcionalne ugaonoj brzini. Ako je izlazna informacija amplituda, za očitanje ugaone brzine primjenjuje se voltmeter, a u drugom slučaju frekvencimetar. Poteškoće u očitavanju prisutne su kad su male brzine, jer je tada indukovani napon mali i jednak naponu šuma. Povećanje broja inserata (zubaca) N povoljno utiče na tačnost merenja pomoću frekvencimetra, jer je tada frekvencija izlaznog napona f veća za N puta od frekvencije vrtnje osovine f_o :

$$f = N f_o. \quad (16.26)$$

Opisani princip je jednostavan. Međutim, kako je izlazni napon nepravilnog oblika, prvo ga je potrebno pretvoriti u niz impulsa pomoću detektora nule. Broj impulsa N u toku posmatranog vremenskog perioda T daje srednju vrednost ugaone brzine: $\omega_{sr} = 2\pi N/T$. Za određivanje trenutne brzine potrebna su kola koja vreme trajanja pojedinih impulsa računaju na osnovu broja impulsa visoke i stabilne frekvencije.



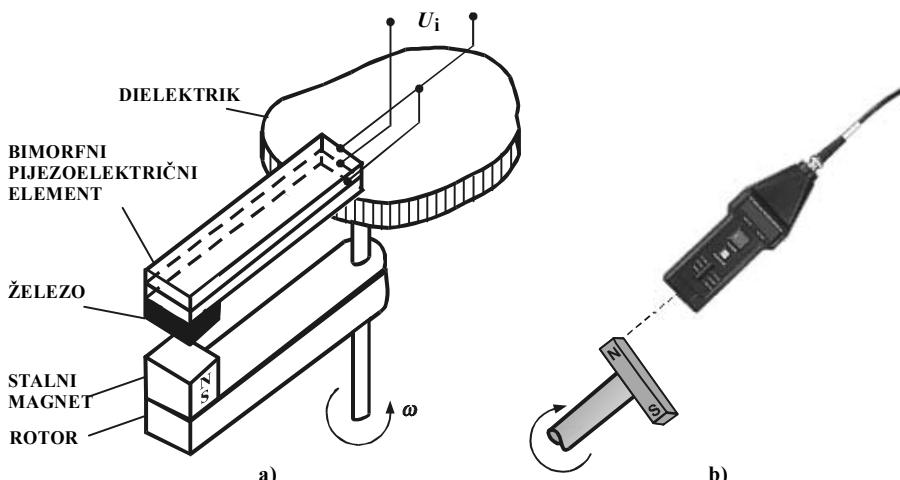
Slika 16.10. Elektromagnetski reluktantni senzor transformatorskog tipa: a) principijelna izvedba, b) oblik izlaznog napona

U inženjerskoj praksi dosta se upotrebljava elektromagnetski senzor transformatorskog tipa. Na primar se dovodi naizmenični napon napajanja visoke frekvencije, a na sekundaru se dobija izlazni napon (slika 16.10a). Sa prolaskom železnog inserta na rotirajućem disku ili zupca na zupčaniku, menjaju se otpor magnetskog kola i amplituda izlaznog napona (slika 16.10b). Budući da je izlazni napon amplitudno modulisan, za tačno očitavanje potrebno je zadovoljiti uslov

$$f_p \gg Nf_0 , \quad (16.27)$$

gde su: f_p frekvencija napona napajanja primara, N broj inserata (zubaca) i f_0 frekvencija vrtnje osovine. Kod digitalnog očitanja izlaza prvo se mora izvršiti demodulacija, zatim transformacija u sled impulsa i, na kraju, njihovo brojanje.

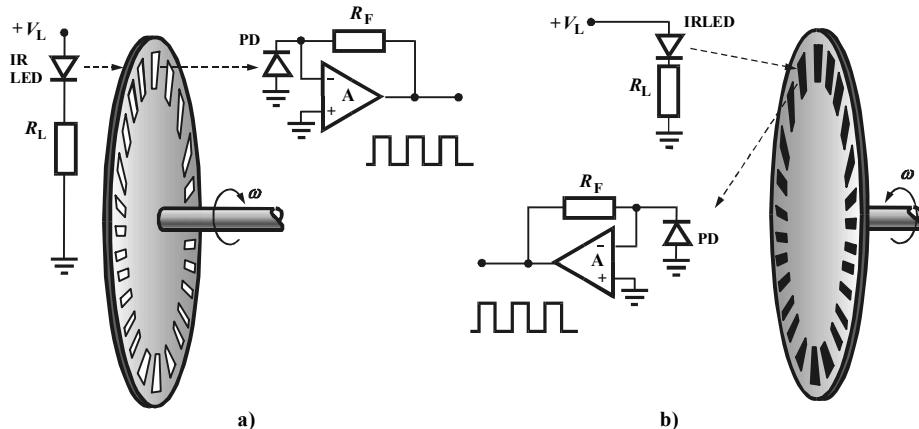
Pijezoelektrični tahometar ima izlazni signal čija frekvencija zavisi od merene ugaone brzine. Osnova za gradnju pijezoelektričnog tahometra je bimorfni pijezoelement u obliku trake. Jedan kraj trake upresovan je u dielektrični materijal a drugi kraj je sloboden. Na slobodnom kraju pričvršćena je železna pločica (slika 16.11a). Rotor je napravljen takođe u obliku trake od nemagnetnog materijala na čijem je kraju stalni magnet. Prilikom obrtanja rotor periodički dolazi ispod bimorfne elemente, tako da privlačna sila između magneta i železne ploče izaziva njegovo savijanje. Zbog direktnog pijezoelektričnog efekta nastaju impulsi naponskog signala na izlazu. Frekvencija ovih impulsa proporcionalna je brzini vrtnje. Zbog malih dimenzija pijezoelektrični tahometar pogodan je za gradnju povratne sprege po ugaonoj brzini u minijaturnim servosistemima, u robotici itd. Na slici 16.11b je ručni pijezoelektrični tahometar. Tipična tačnost je $\pm 0,5 - 1,5\%$.



Slika 16.11 Pijezoelektrični tahometar a) konstrukcija b) ručni tahometar

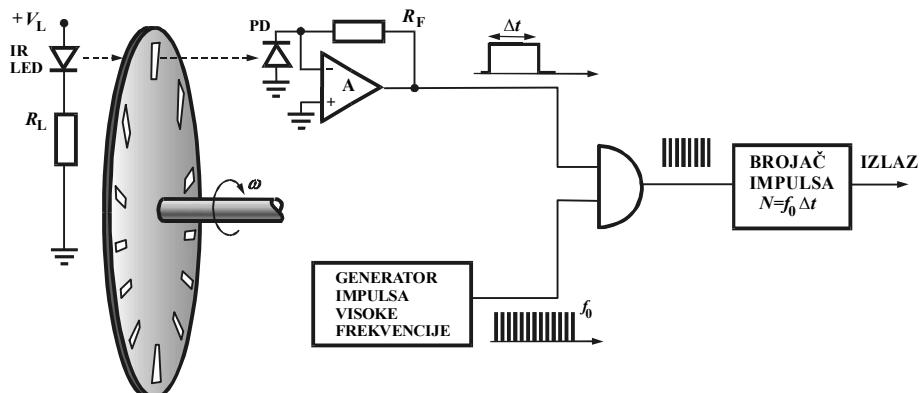
Optoelektronski enkoder spada u grupu senzora ugaone brzine sa impulsnim izlaznim signalom čija je frekvencija multipli frekvencije obrtanja osovine. Ovi senzori razlikuju se samo po tehnici generisanja impulsa, tj. razlikuju se po primarnom elementu konverzije, koji može biti elektromagnetski (kao u ranije razmotrenom slučaju), kapacitivni, radioaktivni ili optoelektronski. Svi senzori sa impulsnim izlaznim signalom imaju slična kola za obradu signala.

Optoelektronski pretvarač broja obrtaja u impulse ima rotirajući disk sa linijama, tj. prorezima ili reflektirajućim sektorima (slika 16.12). U prvom slučaju izvor i prijemnik svetlosti su na suprotnim stranama diska, a u drugom slučaju su sa iste strane. Prednost optoelektronskog tahometra u odnosu na elektromagnetne je u mogućnosti dobijanja većeg broja impulsa za jedan obrtaj i manjoj zavisnosti od šumova.



Slika 16.12. Optoelektronski tahometar: a) izvor i prijemnik svetlosti na suprotnim stranama diska, b) izvor i prijemnik svetlosti sa iste strane rotirajućeg diska

Merenje ugaone brzine na osnovu broja impulsa u jedinici vremena, pri čemu jedan impuls odgovara jednoj liniji, pogodno je za srednje i velike brzine osovine. Za male brzine meri se vreme potrebno za prolaz jedne linije. U principu dovoljan je jedan impuls za jedan obrtaj, ali zbog veće tačnosti na disku ima više linija. Na slici 16.13 prikazan je tahometar kod koga logičko I-kolo propušta na brojač impulsa visoke i stabilne frekvencije f_0 u toku vremena Δt koliko traje impuls sa fotodiode. Kalibracijom se utvrđuje zavisnost brzine vrtnje i broja impulsa.



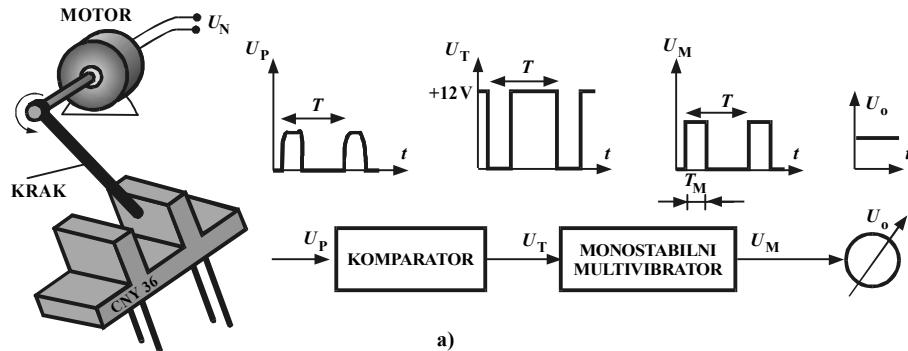
Slika 16.13. Optoelektronski tahometar za merenje male ugaone brzine

Senzor sa optokaplerom pogodan je i za samogradnju. Na osovinu jednosmernog motora pričvršćen je krak koji usled rotacije u optoelektronском proksimiti senzoru U-tipa, tj. u optokapleru CNY36, prekida infracrveni zrak (slika 16.4a). Na izlazu proksimiti senzora dobija se povorka impulsa U_p čija učestanost $f = 1/T$ Hz zavisi od ugaone brzine motora $\omega = 2\pi/T$ rad/s, odnosno od brzine vrtnje motora $n = 60/T$ o/min. Ovaj signal zatim je doveden na komparator koji daje pravougaone impulse U_T iste učestanosti kao na izlazu iz proksimiti senzora. Negativni impulsi sa komparatora pobudjuju monostabilni multivibrator koji generiše impulse U_M fiksног trajanja T_M , ali iste učestanosti kao na izlazu iz proksimiti senzora i komparatora. Srednja vrednost ovih impulsa direktno je proporcionalna brzini vrtnje motora n i može se jednosmernim voltmetrom:

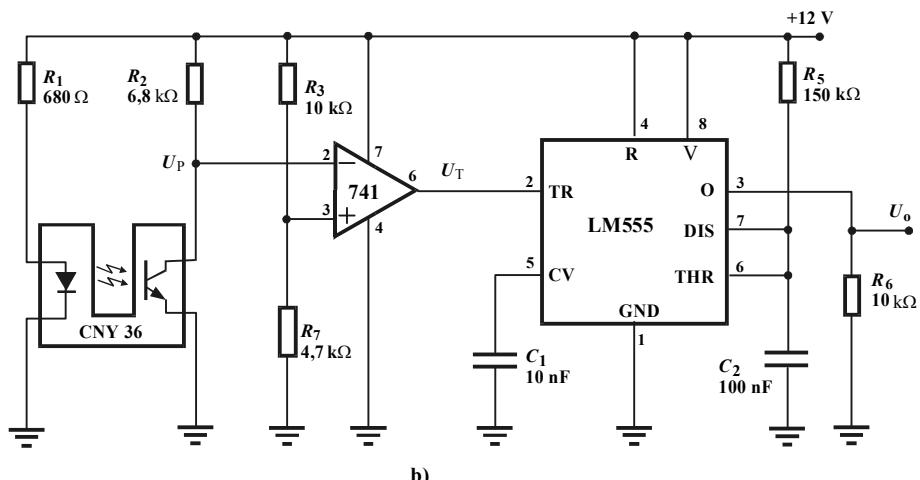
$$U_0 = \frac{U_M T_M + 0 \cdot (T - T_M)}{T} = \frac{U_M T_M}{T} = kn. \quad (16.28)$$

Monostabilni multivibrator realizovan je pomoću tajmera 555 i za vrednosti sa elektronske šeme na slici 16.4b dobija se da je vreme trajanja impulsa:

$$T_M = 1,1 R_5 C_2 = 1,1 \cdot 150 \text{ k}\Omega \cdot 470 \text{ nF} = 78 \text{ ms}. \quad (16.29)$$



a)



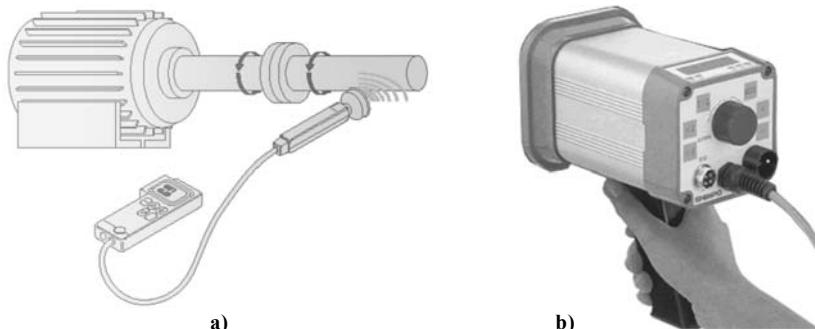
b)

Slika 16.14. Senzor ugaone brzine sa optokaplerom: a) principijelna šema, b) elektronska šema

Umesto fiksne vrednosti otpornika R_5 može se postaviti odgovarajući potenciometar i podešiti širinu impulsa U_M tako da izlazni napon bude kalibriran za direktno očitanje brzine. Na primer, da 500 mV odgovara brzini od 500 o/min. Prilikom kalibracije statičke karakteristike $U_0=kn$ promena brzine vrši se podešavanjem napona napajanja U_N . Sližan tahometar može se realizovati pomoću optokaplera sa refleksijom optičkog zraka.

Stroboskopski senzor ugaone brzine radi na principu stroboskopskog efekta, tj. na prividnom zaustavljanju rotirajuće osovine kada se ona osvetljava impulsima svetlosti čija je frekvencija jednakoj frekvenciji vrtnje osovine. Na primer, osovina koja rotira brzinom 1500 obrtaja u minuti prividno će da stoji ako je posmatramo na svetlosti koja bleska uniformno sa 1500 bleskova u minuti. Ako svetlost ima 1599 bleskova, izgledaće kao da osovina rotira unapred 1 obrtaj u minuti, odnosno pri 1501 bljeskova osovina kao da rotira unazad za 1 obrtaj u minuti. Bleskanje svetlosti podešava se potenciometrom, a položaj klizača kalibriran je u obrtajima u minuti.

Isti efekat primećuje se i kada je frekvencija vrtnje osovine f veća i puta od frekvencije impulsa svetlosti f_s , tj. kada je $f = i \cdot f_s$. Za $i=1$ reč je o sinhronizmu prvog reda, a u opštem slučaju o sinhronizmu i -tog reda. Da bi se dobila stvarna vrednost merene ugaone brzine, neophodno je znati vrednost koeficijenta i . Na slici 16.15 su tipični stroboskopi.



Slika 16.15. Stroboskop: a) merenje sa stroboskopom, b) izgled stroboskopa

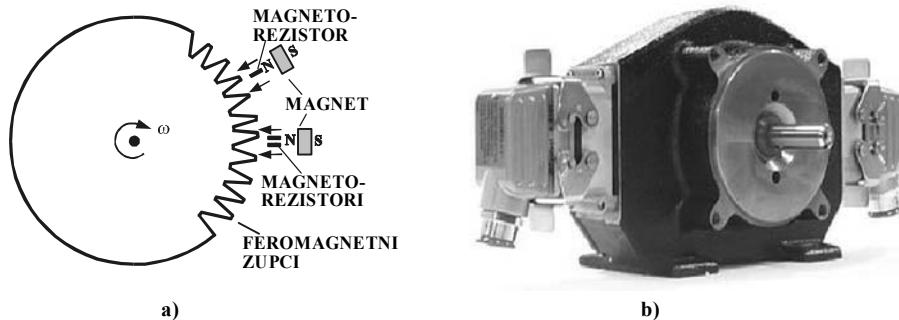
Praktična procedura svodi se na to da se kontinualnim podešavanjem frekvencije na stroboskopskoj bleskalici podeši najveća moguća frekvencija $f_s = f_{\max}$ za koju se uočava sinhronizam. Tome odgovara sinhronizam prvog reda ($i=1$). Zatim se smanjuje frekvencija ($f_a = f_{\min}$) sve do narednog sinhronizma. Na osnovu toga frekvencija obrtaja osovine je

$$f = \frac{f_{\min} \cdot f_{\max}}{f_{\max} - f_{\min}}, \quad (16.30)$$

Tipični opseg frekvencija stroboskopskog senzora je 0 – 25 000 bleskova u minuti, a tačnost merenja je $\pm 1\%$.

Magnetorezistivni senzor je, pored merenja linearne i ugaone pozicije, pogodan za merenje linearne i ugaone brzine (slika 16.16a). Šema sa dva magnetorezistora omogućava i detekciju smera vrtnje. Nailaskom zubaca od feromagnetskog

materijala menja se magnetno polje u kojem se nalazi senzor, tako da se na izlazu dobija odgovarajući naponski impuls. Izvedba sa dva magnetorezistora na rastojanju od 1/2 širine zupca omogućavada se odredi smer kretanja. Tipični podaci koji se odnose na magnetorezistore su: dužina 2–2,5 mm, nominalni otpor 180, 400 ili 500 Ω , magnetna indukcija pri kojoj dolazi do zasićenja u promeni otpora $B=0,8\text{--}2\text{ T}$, nominalna struja 5 mA i frekventni opseg 0–5 MHz. Minimalno rastojanje zubaca je 0,05 mm, tipična tačnost $\pm 1\text{--}2\%$, a uticaj temperature je do $\pm 1\% R/\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Slika 16.16. Magnetorezistivni senzor: a) konstrukcija tachometra sa magnetorezistorima, b) izgled tachometra

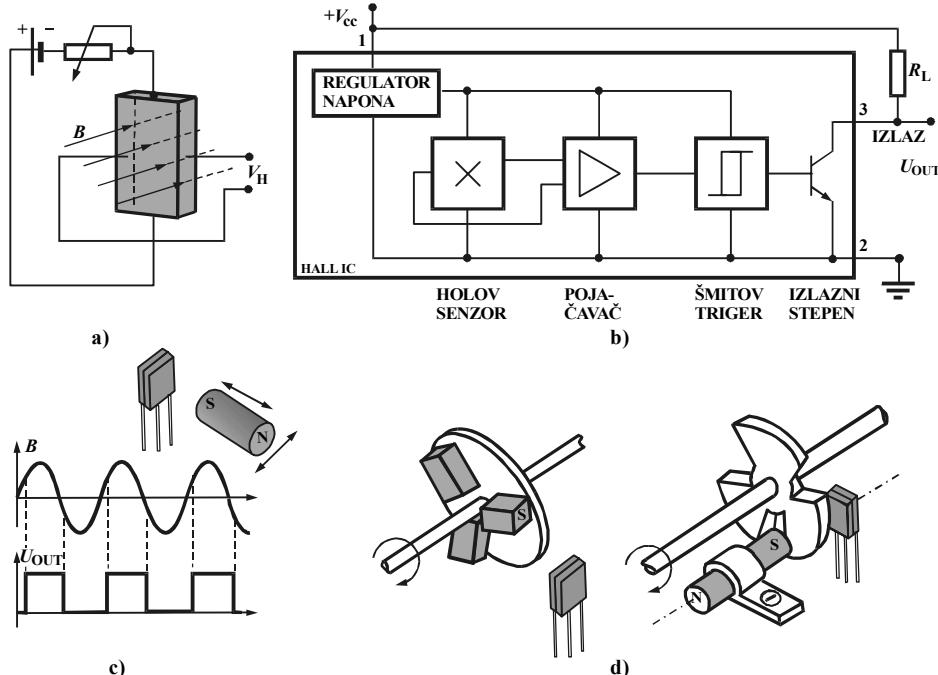
Senzor na bazi Holovog efekta. Holov efekt poznat je od 1879. godine. Njegova praktična primena postaje sve izrazitija zahvaljujući postojanju odgovarajućih poluprovodničkih materijala. Isto kao magnetorezistivni senzori, senzori na bazi Holovog efekta spadaju u red specijalnih elektromagnetskih senzora. Holov efekat nastaje kada se poluprovodnik kroz koji teče struja unese u magnetno polje. Ako se poluprovodnička pločica nalazi u fiksiranom položaju okomito na magnetno polje indukcije B i ako kroz pločicu protiče struja I (slika 16.17a), tada se u smeru poprečno na tok struje javlja tzv. Holov napon:

$$V_H = kIB/d, \quad (16.32)$$

gde su d debljina pločice i k Holova konstanta, koja zavisi od karakteristika poluprovodnika i temperature. Tipična vrednost Holovog napona je reda mV. Treba napomenuti da je povećanje Holovog napona pomoću povećanja struje I ili smanjivanja debljine d ograničeno zbog zagrejavanja pločice. Senzor na bazi Holovog efekta pravi se u integrisanoj tehnologiji kao čip u kome su ugradeni pojačavač i komparator sa TTL kompatibilnim izlazom, tj. izlaz sa otvorenim kolektorom (slika 16.17b). U kolu je izvršena i temperaturna kompenzacija. Senzor je osetljiv na promene polja od svega 0,1 mT, ali zbog nekompenziranog drifta nule od 10 mT prag komparatora postavlja se na vrednost 20–50 mT.

Senzor ugaone brzine pravi se jednostavno pomoću čipa sa Holovim senzorom i odgovarajućeg stalnog magneta koji se pomera paralelno sa senzorom. Magneti su tada postavljeni po obodu rotirajućeg diska. Može se napraviti i konstrukcija da su magnet i senzor u fiksnom položaju, a disk da ima feromagnetne zupce. Prolaskom zubaca dolazi do periodične promene magnetne indukcije B , tako da se dobija sled impulsa sa frekvencijom proporcionalnoj merenoj ugaonoj brzini

(slika 16.17c). Postoje čipovi koji imaju i četvrti izvod na koji se priključuje kondenzator za formiranje visokopropusnog filtera kojim se popravlja distorzija impulsa na izlazu.



Slika 16. 17. Senzor na bazi Holovog efekta: a) ilustracija Holovog efekta, b) senzor i kolo za obradu signala u čipu, c) promena fluksa i izlazni signal, d) obrotomer sa Holovim senzorom

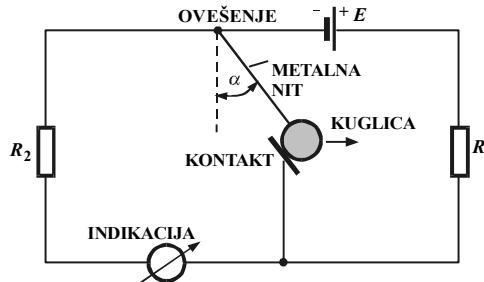
Prekidači na bazi Holovog efekta imaju veliku perspektivu u oblasti merenja ugaonog položaja i ugaone brzine. Na slići 16.17d prikazane su dve praktične realizacije za merenje ugaone brzine. U prvom slučaju na rotirajućem disku smešteni su mikromagneti, a u drugom slučaju umesto diska koristi se propeler. Prolaskom magneta pored feromagnetnih krakova, dobija se niz četvrtki, čija je frekvencija proporcionalna merenoj ugaonoj brzini. Posebno su interesantni diskovi koji po obodu imaju veliki broj magneta, tako da se dobija tzv. prstenasti magnet.

16.3. AKCELEROMETRI

Kontaktni akcelerometar. Ubrzanje se može odrediti diferenciranjem signala koji je dobijen merenjem brzine, ali se to izbegava jer zbog prisustva šuma rezultat proračuna ubrzanja sadrži veliku grešku. Akcelerometar kontaktnog tipa je najprostiji jer samo signalizira da je trenutna vrednost ubrzanja veća od neke odredene vrednosti, npr. maksimalno dozvoljene a_d . Osnova rada ovog senzora je u merenju sile inercije $F_{in} = ma_d$, gde je m poznata masa. Sve dok je ubrzanje manje ili jednako od zadane vrednosti $a \leq a_d$, metalna kuglica mase m naleže na kontakt i strujni krug se zatvara samo kroz otpornik R_1 (slika 16.18). Kada se akcelerometar kreće sa

linearnim ubrzanjem $a > a_d$, kuglica je odvojena od kontakta i strujni krug zatvara se kroz otpornike R_1 i R_2 , te instrument indicira prekoračenje ubrzanja. Uslov odvajanja kuglice od kontakta je:

$$a_d = g \cdot \tan \alpha . \quad (16.33)$$



Slika 16. 18. Kontaktни akcelerometar

Inercioni senzor linearog ubrzanja radi na principu merenja sile inercije ($F_{in} = ma$). Osnovni delovi inercijalnog akcelerometra su kruto telo mase $m[\text{kg}]$, koje je pomoću opruge krutosti $c[\text{N/m}]$ i prigušivača sa koeficijentom viskoznog trenja $B[\text{N/m/s}]$ pričvršćeno za kućište (slika 16.19a). Telo mase m ima ulogu primarnog osjetilnog elementa i njegovo kretanje proporcionalno je ubrzanju. Kada je senzor na objektu koji se kreće pravolinijski pod delovanjem sile ma , na primarni element deluju sile suprotnog smjera: $-m\ddot{x}$ sila inercije, $-B\dot{x}$ sila otpora trenja i $-cx$ sila opruge. Balans ovih sila daje poznatu jednačinu kretanja prikazanog mehaničkog sistema:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} + cx = -ma , \quad (16.34)$$

odnosno:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta\omega_0 \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = -a , \quad (16.35)$$

gde su $\omega_0 = \sqrt{c/m}$ frekvencija vlastitih oscilacija senzora i $\beta = B/2m\omega_0$ koeficijent prigušenja. Odavde se mogu izvesti sledeće jednačine osetljivosti izlaza:

- osetljivost na ubrzanje objekta a

$$S_a(p) = x/a = -1/(p^2 + 2\beta\omega_0 p + \omega_0^2) ; \quad (16.36)$$

- osetljivost na brzinu objekta v

$$S_v(p) = x/v = -pS_a(p) ; \quad (16.37)$$

- osetljivost na pomeraj objekta y

$$S_y(p) = x/y = pS_v(p) = p^2 S_a(p) . \quad (16.38)$$

Prenosna funkcija inercionog senzora je:

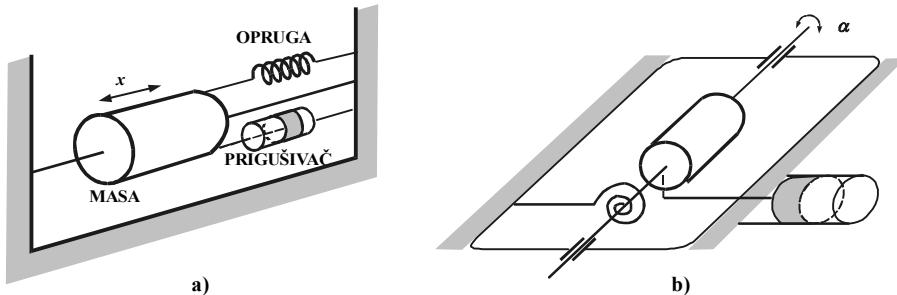
$$G_a(s) = \frac{X(s)}{A(s)} = -\frac{1}{s^2 + 2\beta\omega_0 s + \omega_0^2} . \quad (16.39)$$

Znak minus označava da je smer kretanja x mase m suprotan od smera akceleracije. Diferencijalna jednačina (16.35) i prenosna funkcija (16.36) opisuju oscilatorni sistem drugog reda. To znači da će inercijalni senzor dobro detektovati samo sporo promenljivo ubrzanje. Sa povećanjem vibracija i frekvencije ubrzanja, dinamička greška senzora postaje sve veća. Smanjivanje greške postiže se pažljivim projektovanjem vlastite frekvencije ω_0 i koeficijenta prigušenja β . Obično se uzima $\beta=0,7-0,8$ jer se time, za dato ω_0 , postiže najkraće vreme smirenja prelaznog procesa. Vlastita frekvencija senzora ω_0 bira se tako da bude veća od frekvencije merenog ubrzanja, tj. $\omega_0 > (5-10)\omega$. Ovo se postiže smanjenjem mase m ili povećanjem krutosti opruge c . Manja masa, međutim, znači manju silu inercije F_{in} , tj. manju osjetljivost S_a , a isti efekat na osjetljivost ima i povećanje krutosti opruge. Sviše velika vlastita frekvencija ω_0 , osim toga, čini senzor osjetljivim na smetnje. Prema tome, vlastitu frekvenciju treba izabrati tako da zadovoljava ograničenje:

$$(5-10)\omega < \omega_0 < \omega_s , \quad (16.40)$$

gde je ω_s najmanja frekvencija smetnje.

Pomeranje mase može da se direktno prenosi na pokazni instrument. Električni izlazni signal dobija se postavljanjem otporničkog, induktivnog, kapacitivnog ili pijezoelektričnog senzora pomeraja.



Slika 16.19. Inercijalni akcelerometar: a) linear nog pomeraja, b) ugaonog pomeraja

Inercijalni senzor ugaonog ubrzanja ima primarni element u obliku krutog tela momenta inercije I (slika 16.19b). Kada objekat rotira ugaonim ubrzanjem $\dot{\phi}$ na primarnom elementu stvara se moment inercije $M_{in} = I\ddot{\phi}$. Ovom momentu suprotstavlja se moment sile inercije $I\ddot{\alpha}$, moment sile prigušenja $B'\dot{\alpha}$ i moment sile opruge $c\alpha$. Balans navedenih momenata daje jednačinu rotacionog kretanja senzora:

$$I \frac{d^2\alpha}{dt^2} + B' \frac{d\alpha}{dt} + c\alpha = -I\ddot{\phi} . \quad (16.41)$$

Uobičajeni oblik jednačine rotacionog kretanja je:

$$\ddot{\alpha} + 2\beta\omega_0 \dot{\alpha} + \omega_0^2 \alpha = -\ddot{\phi} . \quad (16.42)$$

U stacionarnom stanju prve dve komponente na levoj strani jednake su nuli, tako da je ugao zakretanja osetljivog elementa α proporcionalan ugaonom ubrzaju $\dot{\phi}$ oko ose x . U dinamičkom pogledu inercioni senzor ugaonog ubrzanja je sistem drugog reda sa prenosnom funkcijom oblika (16.39). Za smanjivanje greške primenjuju se specijalne konstrukcije sa malim momentom trenja, malim histerezisom i malom zonom neosetljivosti.

Senzor ubrzanja kompenzacijonog tipa (servoakcelerometar). Glavne osobine ovakvog senzora su kompenzacija momenta ili sile i prisustvo aktivnog korekcionog kola, čiji su parametri ekvivalentni mehaničkom prigušenju krutosti. Pomoću korekcionog kola mnogo je lakše podešavanje potrebnih vrednosti koeficijenta prigušenja i vlastite frekvencije.

Na slici 16.20a prikazan je klasični senzor sa kompenzacijom momenta. Senzor je pričvršćen na objektu, koji se kreće sa linearnim ubrzanjem a . Zbog ubrzanja će ovešena masa m imati ugaoni otklon α , koji se detektuje pomoću transformatorskog senzora pomeraja RVDT osetljivosti k_1 . Na izlazu RVDT javlja se napon ΔU proporcionalan pomeraju α . Pojačavač, sa koeficijentom pojačanja k_2 , sadrži i korekciono kolo sa prenosnom funkcijom $G_k(s)$. Izlaz iz korekcionog kola je istosmerni strujni signal I_i ili napon U_i na opteretnom otporniku R . Strujni signal je istovremeno i signal povratne sprege, koji u elektromagnetnom pretvaraču generiše silu $F_{ps} = BI_il = k_3I_i$. Ova sila na rastojanju l_2 od centra ovešenja mase stvara moment koji ima suprotan smer od smera momenta izazvanog silom inercije $F_{in} \cdot l_1$, gde je l_1 dužina od mesta ovešenja do centra mase.

Prenosna funkcija razmotrenog senzora sa kompenzacijom momenta dobija se prema struktornoj blok-schemi (slika 16.20b):

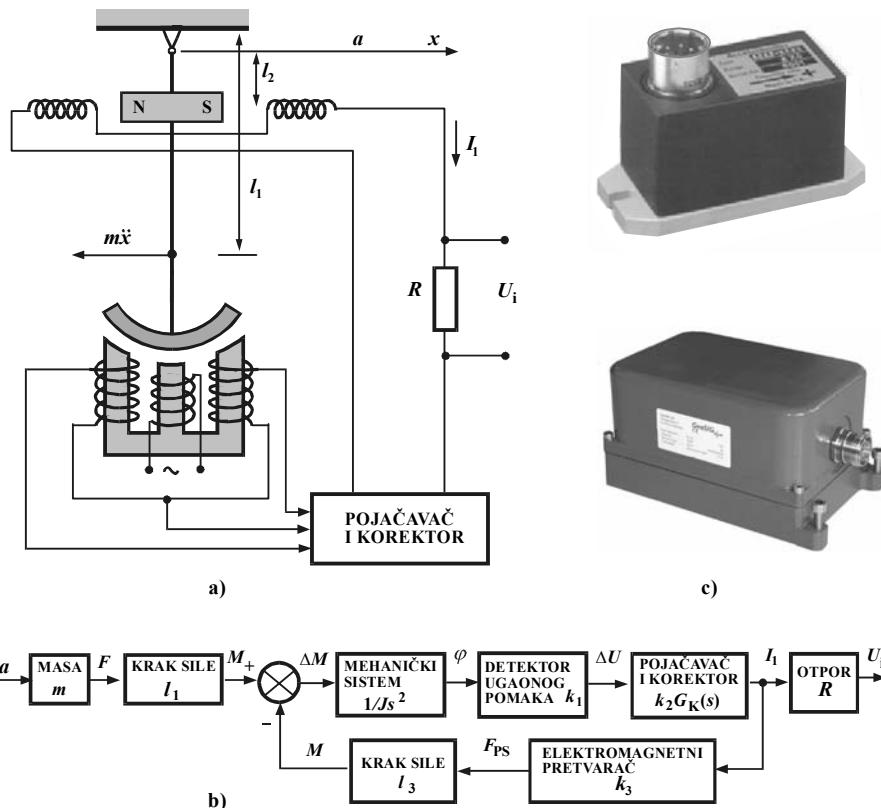
$$G(s) = \frac{U_i(s)}{A(s)} = ml_1R \frac{(1/Js^2)k_1k_2 G_k(s)}{1 + l_2 k_3 (1/Js^2)k_1k_2 G_k(s)}, \quad (16.43)$$

koja se može napisati u sažetom obliku kao:

$$G(s) = S_a \frac{G_k(s)}{Js^2/k + G_k(s)}, \quad (16.44)$$

gde su $S_a = ml_1R/l_2k_3$ osetljivost senzora na ubrzanje, J moment inercije i $k = k_1k_2k_3l_2$ koeficijent koji je ekvivalentan krutosti opruge u ranije razmatranim mehaničkim senzorima ubrzanja. Vrednost koeficijenta k podešava se izborom pojačanja k_2 , pa se zato k_2 i naziva krutost „električne opruge“. Ukoliko nema korekcionog kola, tj. ako je $G_k(s) = 1$, tada je struktura sa negativnom povratnom spregom nestabilna. S obzirom na veliko fazno zaostajanje, kao korekcioni blok primenjuje se diferencijator sa prenosnom funkcijom $G_k(s) = T_1 s + 1$, tako da je u tom slučaju:

$$G(s) = S_a \frac{T_1 s + 1}{T_1^2 s^2 + 2\xi T_1 s + 1}, \quad (16.45)$$



Slika 16. 20. Senzor akceleracije sa kompenzacijom momenta: a) funkcionalna šema, b) blokšema, c) tipični izgled

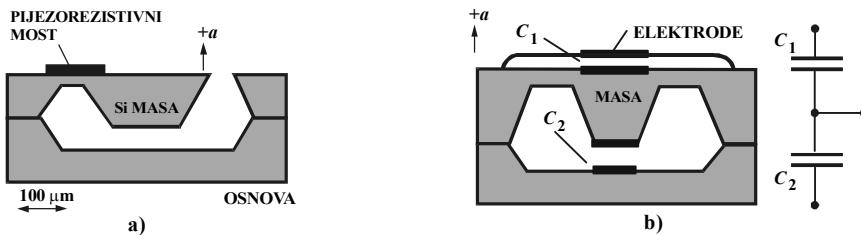
gde su $T = \sqrt{J/k}$ vremenska konstanta senzora sa korekcijom i $\xi = T_1/2T$ koeficijent prigušenja. Pogodnim izborom krutosti „električne opruge“ i parametara korekcionog bloka postiže se željeno dinamičko ponašanje senzora. Prednost uključivanja diferencijatora u direktnu granu senzora je u proširivanju frekventnog opsega senzora i povećanju rezerve stabilnosti. Razmotreni diferencijator je idealizacija realnog diferencijatora koji ima prenosnu funkciju oblika $G_k(s) = K(T_1 s + 1)/(T_2 s + 1)$, gde su $T_1 > T_2$ i $K < 1$. Uvođenjem takvog korekcionog kola, smanjuje se osetljivost na niskim frekvencijama, proširuje se frekventni opseg, povećava osetljivost na brze promene i smetnje, a prenosna funkcija senzora postaje trećeg reda:

$$G(s) = S_a K \frac{T_1 s + 1}{(T^2 T_2 / K) s^3 + (T^2 / K) s^2 + T_1 s + 1}. \quad (16.46)$$

Nakon prelaznog procesa uspostavlja se stacionarno stanje, u kojem je izlazni signal proporcionalan merenoj akceleraciji. Koeficijent proporcionalnosti određen je osetljivošću S_a . Senzor ubrzanja sa kompenzacijom sile razlikuje se od senzora sa kompenzacijom momenta po tome što je masa ovešena u pravcu delovanja ubrzanja.

Poluprovodnički akcelerometar pravi se kao integrisana mikromehanička struktura (slika 16.21a). Seizmička masa je ovešena na posebno profilisanu

silicijumsku konzolu koja trpi deformaciju pod delovanjem ubrzanja. Deformacija se detektuje pijeozrezistorskim mostom. Veća osetljivost dobijena je pomoću diferencijalnog kapacitivnog senzora kod kojeg srednji sloj ima ulogu seizmičke mase (slika 16.21b). Poluprovodnički akcelerometri odlikuju se malim dimenzijama i širokom primenom u komercijalne svrhe, u automobilima, u pokretnim mašinama, u robotici, za merenje vibracija, itd.



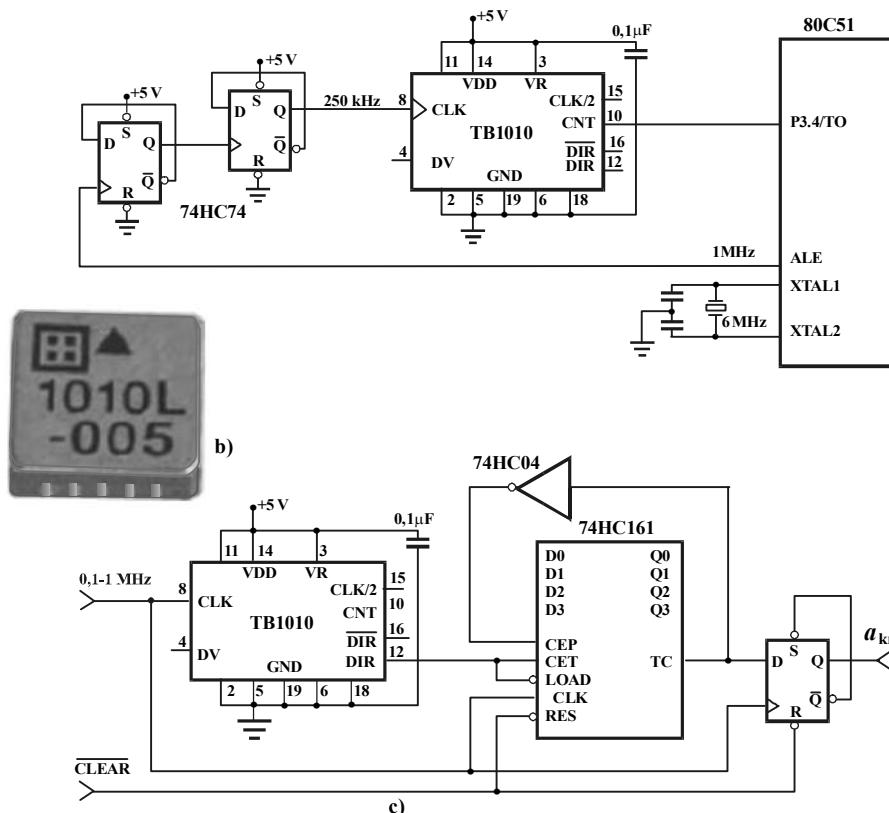
Slika 16.21. Poluprovodnički akcelerometar: a) seizmička masa na eleastičnoj konzoli, b) masa na pokretnoj elektrodi diferencijalnog kapacitivnog senzora

Digitalni akcelerometar. Kombinovanjem poluprovodničkog akcelerometra sa elektronskim kolima dobijeni su integrirani digitalni senzori kao monolitni čipovi. Primer je senzor TB1010 (slika 16.22a). To je 20-pinski čip 10×10 mm u pakovanju tipa LCC (Leadless Chip Carier), sa izvanrednim karakteristikama: najmanji opseg je $\pm 2\text{g}$ a najveći čak do $\pm 1000\text{g}$ (zavisno od tipa), impulsni izlaz frekvencije $0,1 - 1\text{ MHz}$ (zavisno od izbora frekvencije kloka), tačnost $\pm 1\%$ opsega, dozvoljeno prekoračenje opsega i do deset puta, napajanje $+5\text{ V}$, dobra zaštita od elektromagnetskih smetnji i jednostavno povezivanje sa mikroprocesorom.

U čip su integrirani pojačavač i sigma-delta A/D konvertor. Ovaj A/D konvertor je integracionog tipa, a sastoji se iz modulatora koji konverte analogni ulazni signal u 1-bitni signal na izlazu i digitalnog filtera koji konverte 1-bitni signal u n -bitni ekvivalent. Tako se dobija izlazni signal CNT (count) u kome je broj impulsa logičkih jedinica u određenom vremenskom intervalu proporcionalan merenoj akceleraciji, pri čemu je frekvencija izlaza data u odnosu na frekvenciju kloka.

Akcelerometar se povezuje na brojač impulsa mikrokontrolera. Za mikrokontroler Intel 80C51 takav brojač je T0 i nalazi se na pinu 4 porta 3 P3.4 (slika 16.22b). Maksimalna brzina ovog brojača je 250 kHz i zato se na klok akcelerometra moraju dovesti impulsi najviše do ove frekvencije. To mogu biti impulsi sa eksternog kloka. Ovde su iskorišteni impulsi sa izlaza ALE (Address Latch Enable) jer na mikrokontroler nisu priključene vanjske memorije. Na ovom izlazu su impulsi frekvencije $1/6\text{fosc} = 1\text{ MHz}$ i zato je dodat delitelj sa 4 (kolo 74HC74 sa dva flip-flopa D-tipa) da bi se dobilo 250 kHz .

Izlaz digitalnog akcelerometra može se pretvoriti u analogni pomoću niskopropusnog RC-filtera, kome se vrednosti za R i C odreduju u zavisnosti od frekventnog opsega akcelerometra. Na slici 16.22c prikazana je šema za detekciju kritične vrednosti ubrzanja a_{kr} koja se daje u odnosu na maksimum mernog opsega. Brojač 74HC161 radi sinhrono sa akcelerometrom i prima signale sa logičkog izlaza DIR. Kritičnoj vrednosti ubrzanja od $a_{kr} = 0,875a_{max}$ odgovara najmanje 16 visokih



Slika 16.22. Digitalni akcelerometar TB1010: a) povezivanje sa mikrokontrolerom, b) senzorski čip, c) kolo za detekciju praga,

logičkih nivoa zaredom. Čim se detektuje visoki logički nivo na izlazu DIR, počinje brojanje koje traje najmanje 16 klok ciklusa. U normalnom stanju, sve dok je $a < a_{kr}$, u toku ovih 16 klok ciklusa pojaviće se niski logički nivo na izlazu DIR i tada se brojač resetuje na nulu i sa narednim visokim nivoom DIR signala započinje novo brojanje. Resetovanje brojača se obavlja tako što se nula sa TC i D0-D3 prenosi na izlaze Q0-Q3, a Q izlaz D flip-flopa je na nuli. Čim se pojavi naredni visoki nivo na izlazu DIR, brojač započinje novo brojanje. Ako se zaredom pojavi 16 impulsa visokog nivoa, izlaz brojača TC postavlja se na 1, a D flip-flop postavlja $\bar{Q} = 0$ i $\bar{S} = 0$. Izlaz $Q = 1$, koji označava pojavu kritične vrednosti, zadržava se sve do vanjskog reseta jer bilo koja naredna promena TC se ne odražava na izlaz flip-flopa. Identična struktura brojača može da se priključi na invertovani izlaz \overline{DIR} i da se postavi kritična vrednost za negativno ubrzanje.

16.4. SENZOR VIBRACIJA

Vibracije. U toku rada postrojenja, mašina, mehanizama i instrumenata često nastaju mehaničke oscilacije kao posledica velikih ubrzanja kod periodičkog kretanja masa, udarnih delovanja opterećenja, rotacionog kretanja osovina sa nepravilnim ležištimi i sl. Takve oscilacije su štetne za rad uredaja. One predstavljaju beskorisnu

potrošnju energije, smanjuju koeficijent korisnog delovanja; zbog njih se povećavaju dimenzijske pojedinosti delova uređaja, a mogu da dovedu do lomova i havarija. U inženjerskoj praksi ovakve oscilacije nazivaju se vibracije i zbog štetnog delovanja imaju negativnu konotaciju. U opštem slučaju vibracije imaju periodički, slučajni ili tranzijentni karakter. Vibracija sa velikom amplitudom i malim vremenom trajanja označava se kao udarna ili šok-vibracija. Vibracije se dešavaju kako prilikom linearnog tako i prilikom rotacionog kretanja, pa je za njihovo praćenje potrebno šest senzora ili jedan osetljiv na svih šest komponenti ubrzanja. U praksi se retko primenjuje svih šest. Pre nego se izvrši redukcija na potrebnii broj senzora, vrši se test pomoću kojeg se utvrđuje prisustvo vibracija duž osa i oko osa. Pri tome se vodi računa o mogućnosti pojave poprečnih vibracija, tj. o uticaju vibracija duž (oko) jedne ose na vibracije duž (oko) druge ose.

Parametri vibracija. Najčešće mereni parametri vibracija su frekvencija osnovne oscilacije (prvog harmonika), frekvencija viših harmonika, te pomeraj, brzina i ubrzanje tela zbog vibracija. Ređe se mere trenutne i srednje vrednosti, vršne vrednosti kod neperiodičke vibracije, varijacije faze itd. Senzori za ove namene su kontaktnog ili beskontaktnog tipa. Beskontaktni vibrometri su specijalne izvedbe kapacitivnih, elektromagnetskih i optoelektronskih senzora. Najširu primenu imaju senzori sa seizmičkim MBK-sistemom, gde se kretanje ovešene mase pretvara u električni signal pomoću potenciometarskog, kapacitivnog, induktivnog, pjezelektričnog ili magnetostripcionog senzora pomeraja. Senzor je uvek sastavni deo složenog mernog sistema, koji se sastoji od pretvarača, osciloskopa i oscilografa, te analizatora spektra.

Seizmički senzor. Parametri vibracija ispitivanog objekta mere se pomoću pomeraja mase m u odnosu na nepokretni koordinantni sistem (skala z na slici 16.23a). Ovaj metod je veoma jednostavan. Njegov suštinski nedostatak je što nije uvek moguće u blizini objekta naći pogodnu nepokretnu površinu, na koju bi se postavila skala u jedinicama pomeraja. Sličan problem javlja se i kada je vibrirajući objekat mali. Zbog navedenih razloga više se primenjuje merenje parametara vibracija pomoću pomeraja mase m u odnosu na relativni (vezani) koordinantni sistem (skala y na slici 16.23a). Skala x označava pomeraj objekta u odnosu na nepokretni koordinatni sistem. Jednačina ravnoteže sila koje deluju na seizmički element mase m ima oblik:

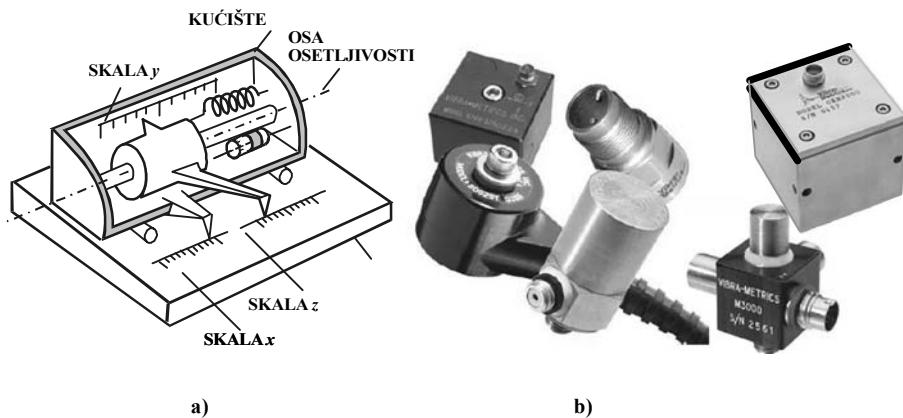
$$m\ddot{z} + B\dot{y} + cy = 0. \quad (16.47)$$

Iz geometrijske veze $z = x + y$ proizilazi uobičajeni oblik:

$$\ddot{y} + 2\beta\omega_0\dot{y} + \omega_0^2 y = -\ddot{x}. \quad (16.48)$$

Pažljivim izborom koeficijenata prigušenja i sopstvene frekvencije, seizmički senzor se prilagođava specifičnim zahtevima u pogledu merenja vibracija. Merenje amplitude pomeraja vibrirajućeg objekta najbolje se ostvaruje ako nema prigušivača, tj. kada je $B=0$. Ako se još odabere opruga sa veoma malim koeficijentom krutosti, tada je $\omega_0 = \sqrt{c/m} \approx 0$. Zbog male krutosti opruga je sposobna da zadržava masu samo u okolini početnog položaja, pa jednačina (16.48) postaje:

$$\ddot{y} = -\ddot{x}. \quad (16.49)$$



Slika 16. 23. Seizmički senzor: a) princip rada, b) pjezoelektrični senzori vibracija

Ako su početni uslovi nulti, izlaz senzora je proporcionalan pomeraju ispitivanog objekta, tj. $y = -x$. Tada senzor radi u režimu vibrometra. Budući da je pobuda periodična, izlazni pomeraj meri se kao vrednost od vrha do vrha, tj. kao vrednost između maksimalnog pozitivnog i maksimalnog negativnog pomeraja. Pomeraj kao parametar vibracija meri se u rasponu od 10^{-13} m do 10 m.

Merenje trenutne brzine kućišta senzora, tj. brzine vibracije objekta, najbolje se ostvaruje ako je krutost opruge mala ($\omega \approx 0$) i ako je prigušenje veliko. U tom slučaju sila koja deluje na seizmički element prenosi se do elementa uglavnom samo putem viskoznog trenja, jer se njegova inercija gotovo u celosti poništava silom prigušenja. Jednačina (16.48) tako postaje:

$$2\beta\omega_0\dot{y} = -\ddot{x}, \quad (16.50)$$

odakle proizilazi da je izlaz senzora proporcionalan brzini \dot{x} , tj. $y = -\dot{x}/2\beta\omega_0$. Seizmički senzor sa ovakvim karakteristikama radi u režimu velosimetra. Brzina kao parametar vibracija meri se u rasponu $10^{-8} - 10^3$ m/s.

Za merenje ubrzanja potrebno je da opruga ima veliki koeficijent krutosti kako bi se postigla što veća vlastita frekvencija senzora. Osim toga, prigušenje treba da je što manje, jer seizmički element treba da prati oscilacije kućišta, a da se pomera u odnosu na svoj ravnotežni položaj samo u trenutku kada se kućište kreće sa ubrzanjem. U tom slučaju jednačina (16.48) postaje:

$$\omega_0^2 y = -\ddot{x}, \quad (16.51)$$

pa je izlaz proporcionalan ubrzaju, odnosno $y = -\ddot{x}/\omega_0^2$. Seizmički senzor koji zadovoljava navedena ograničenja radi kao akcelerometar. Ubrzanje kao parametar vibracija u tehničkoj praksi meri se u rasponu $10^{-6} - 10^5$ g.

Karakteristike seizmičkog senzora zavise od konstruktivnih osobina i navedenih ograničenja. Njegove karakteristike u pogledu merenja pomeraja, brzine i

ubrzanja kao parametara vibracije u funkciji su frekvencije pobude. Ove tri zavisnosti proizvodači seizmičkih senzora daju na jedinstvenom dijagramu radi jednostavnijeg određivanja ukupnog radnog opsega.

Pijezoelektrični akcelerometar u vibrometriji ima najveću primenu u odnosu na ostale akcelerometre. Razlog su izvanredne tehničke karakteristike: osetljivost $0,003 - 1000 \text{ pC/ms}^{-2}$ ($0,03 - 100 \text{ pC/g}$), mogućnost merenja udarnih ubrzanja (i preko 2000 g), frekventni opseg od 0,1 Hz do 100 kHz, rad na temperaturi do 80°C , neosetljivost na akustične šumove, neosetljivost na delovanje električnog i magnetnog polja i dr. Za merenje parametara vibracija iznad 80°C upotrebljavaju se visokotemperaturni pijezoelektrici. Način i kvalitet fiksiranja pijezoakcelerometra na merni objekat jako utiče na tačnost. Tipična izvedba sastoji se od pijezokeramičkog diska ili prstena pritisnutog seizmičkom masom m i oprugom. Pri vibraciji kućišta, promenljiva sila koja nastaje zbog kretanja seizmičke mase deluje na pijezodiskove, pa se na njihovim oblogama javlja električni naboј:

$$q = \alpha F = \alpha ma . \quad (16.52)$$

Da bi se postigla što veća osetljivost u odnosu na ubrzanje, masa m treba da je što manja, reda 0,001 kg. Pijezoakcelerometar priključuje se na pojačavač napona, nakon čega se integracijom može odrediti vibrobrzina ili vibropomak.

16.5. RADARSKI SENZORI

Detekcija pokretnih objekata. Za izdvajanje pokretnih objekata iz mirujuće okoline upotrebljavaju se radari sa Doplervim efektom. Zbog malih dimenzija ovakvi radari primenjuju se u detekciji brzine vozila u saobraćaju, u beskontaktnom merenju vibracija, u sistemima zaštite od provala, u automatskom praćenju (brojanju) elemenata na traci, u robotici, u merenju nivoa i u drugim oblastima.

Principijelna struktura radara sastoji se iz stabilnog oscilatora mikrotalasa fiksne frekvencije u opsegu 1,6 – 30 GHz ($\lambda = 187 - 10 \text{ mm}$), pojačavača snage i modulatora koji omogućavaju impulsni rad predajnika, tako da se pomoću antene emituju impulsi trajanja 10–20 μs . Zadatak antenske skretnice je da između emisije dva uzastopna impulsa isključi predajnik, a uključi prijemnik. Prijemnik radi na bazi stepena za mešanje frekvencije zračenja f i frekvencije odjeka f_p kako bi se dobila kvalitetna selekcija Doplrove frekvencije f_D . Za detekciju Doplrove frekvencije upotrebljavaju se Šotkijeve diode. U novije vreme Ganove diode, napravljene od galijum-arsenida, služe za gradnju i predajnika i prijemnika.

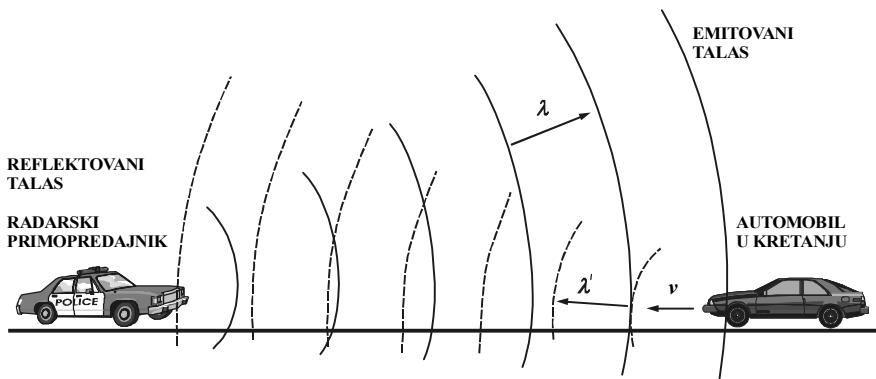
Doplerov efekat manifestuje se kod reflektovanih talasa sa pokretnih objekata kao promena frekvencije u odnosu na frekvenciju emitovanog vala $f_R - f_E = \Delta f_D$, gde je promena $\Delta f_D = f_D$ Doplerova frekvencija. Za objekat koji se približava izvoru f_D ima pozitivan predznak, a za objekat koji se udaljava preznak f_D je negativan. Stacionarni objekat daje konstantan napon, dok pokretni objekat daje naizmenični napon proporcionalno svojoj radikalnoj brzini, tj. brzini u smeru zračenja. Doplerova frekvencija f_D računa se pomoću jednačine:

$$f_D = \frac{2v}{\lambda} = \frac{2vf}{c}, \quad (16.53)$$

gde su: v [m/s] radijalna brzina objekta u smeru zračenja, f frekvencija predajnika i c brzina elektromagnetskog zračenja. Radari za kontrolu brzine vozila u saobraćaju rade na ovom principu (slika 16.24). Kod ovih radara relativna promena Doplerove frekvencije baždari se u jedinacama brzine [km/h] i to se pokazuje na ekranu ili se rezultat merenja preko interfejsa vodi na računar:

$$f_D/f = kv. \quad (16.54)$$

gde koeficijent $k = 2f/c$ zavisi od radne frekvencije radara.



Slika 16.24. Radarsko merenje brzine vozila u saobraćaju

Prethodne jednačine vrede pod pretpostavkom da je kretanje objekta radijalno prema primopredajniku ili radijalno od njega. Kada se objekat kreće pod nekim uglom θ u odnosu na primopredajnik, jednačina za Doplerovu frekvenciju postaje:

$$f_d = 2v(f/c) \cos \theta. \quad (16.55)$$

Detekcija smera kretanja. Konvencionalni radari za kontrolu brzine vozila ne razlikuju dolazeći od odlazećeg vozila. Zbog toga je moguće da u trenutku kada vozilo prilazi nedozvoljenom brzinom u vidno polje radara ne bude detektovano jer ga pokriva bliže vozilo koje prolazi manjom brzinom pored radara u odlazećem smeru. Nova generacija radara može da bude fiksirana ili u pokretu, a detektuju i smer kretanja lociranih objekata (slika 16.25). Greška radarskog merenja brzine je manja od $\pm 0,1$ km/h, opseg 1–480 km/h, vreme akvizicije 10 ms, maksimalni domet 1,8 km

Određivanje dometa. Ako je zračenje predajnika (transmitera) P_t izotropno, tada je gustina snage P_g [W/m²] na rastojanju R jednaka odnosu transmitovane snage P_t i površine lopte poluprečnika R , odnosno:

$$P_g = P_t / 4\pi R^2. \quad (16.56)$$



Slika 16.25. Radari za merenje brzine vozila u sabraćaju: a) standradni radar,
b) dualni radar sa detekcijom smera

Realna antena je parabolična ili ima oblik levka, tako da je zračenje usmereno. Za direkcione antene gustina snage računa se pomoću jednačine:

$$P_g = P_t G_t / 4\pi R^2, \quad (16.57)$$

gde je G_t pojačanje antene predajnika. Transmitovani elektromagnetični talas odbija se od objekta i vraća nazad izotropski do antene, pa je gustina snage na otvoru (aperturi) antene:

$$P_g = P_t G_t \sigma / (4\pi)^2 R^4, \quad (16.58)$$

gde je σ refleksivnost površine objekta, koja zavisi od njegove veličine i vrste materijala. Tako, na primer, plastični materijali skoro u potpunosti propuštaju elektromagnetne talase, voda ih apsorbuje, a metali reflektuju.

Snaga koja dolazi na prijemnik jednak je gustini snage na otvoru antene (16.58) pomnoženoj sa efektivnom površinom otvora, odnosno:

$$P_p = \frac{P_t G_t \sigma}{(4\pi)^2 R^4} A_{ef} = \frac{P_t G_t \sigma}{(4\pi)^2 R^4} \frac{G_p \lambda^2}{4\pi}, \quad (16.59)$$

gde su G_p pojačanje antene prijemnika i λ talasna dužina zračenja. Budući da se ista antena upotrebljava i za transmitovanje i za prijem signala, pojačanja G_t i G_p su jednaka, tj. $G_t = G_p = G$, tako da iz prethodnog izraza proizilazi da je udaljenost objekta R nelinearna sa primljenom snagom P_p :

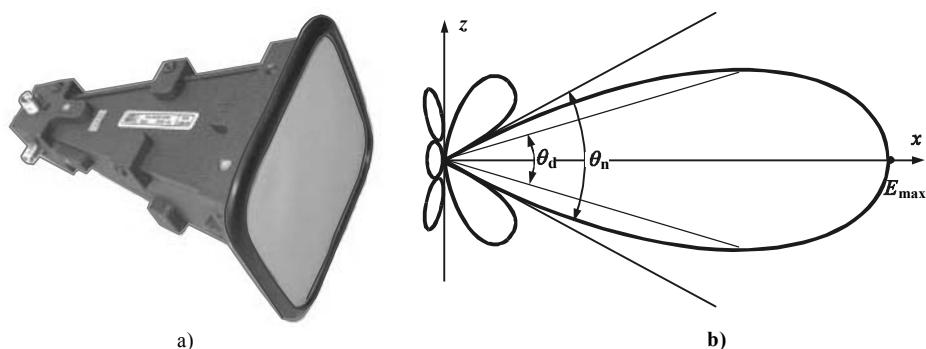
$$R = [P_t G^2 \lambda^2 \sigma / (4\pi)^3 P_p]^{1/4}. \quad (16.60)$$

Maksimalni domet na kome se detektuje kretanje nekog objekta ograničen je minimumom prijemnog signala, odnosno minimumom odnosa signal/šum koji se može procesirati u prijemniku. Prema tome, $R = R_{max}$ dobija se za $P_p = P_{pmax}$.

Antena kao deo radara pretvara elektromagnetnu energiju u prostorni elektromagneti talas i obrnuto. Dijagram elektromagnetiog zračenja obično se daje u vertikalnoj i horizontalnoj ravni. Tipičan dijagram zračenja sastoji se od glavne i sekundarnih latica (slika 16.26). Osnovne karakteristike antene su:

- širina snopa θ_n u horizontalnoj, odnosno vertikalnoj ravni (ugao unutar kojeg se nalazi glavna latica)
- ugao usmerenosti θ_d u horizontalnoj, odnosno vertikalnoj ravni (ugao unutar kojeg snaga zračenja ne pada ispod polovine snage koja se zrači u centralnom smeru)
- faktor potiskivanja sekundarnih latica s (odnos maksimuma zračenja glavne latice i maksimuma zračenja najveće sekundarne latice).

Antena se projektuje tako da se dobije širi ili uži snop zračenja. Na primer, u sistemima zaštite od provala ili u detekciji otvorenosti vrata potrebna je antena sa širokim dijagrameom, dok je za brojanje, radarsku ogradi i merenje brzine potrebna antena sa uskim dijagrameom zračenja. Levak-antena u tehnici senzora najviše se primjenjuje. Njena je osobina da ima uži dijagram zračenja u horizontalnoj, a širi u vertikalnoj ravni. Rotacijom antene za 90° ovi dijagrami menjaju mesta, tako da se ovakva antena lako prilagodava različitim potrebama.



Slika 16.26. Radarska antena: a) izgled antene radara, b) dijagram zračenja antene

Objekat koji se prati mora da izade iz snopa zračenja pre nego što nađe sledeći objekat, inače dolazi do pogrešne indikacije. Minimalno rastojanje između objekata zavisi od širine snopa. U radarskim senzorima ovo rastojanje je oko 5 cm. U jednoj sekundi obično se može detektovati najviše do 10 objekata.

Na kraju, treba istaći da vibracije postolja antene nepovoljno utiču na rad radarskog senzora. U tom slučaju odbijeni talas od nepokretnog objekta radar detektuje kao kretanje. Uticaj vibracija smanjuje se specijalnim prigušivačima vibracija ili smanjivanjem osetljivosti radara.

PITANJA I ZADACI

- 1) Objasniti princip gradnje senzora brzine i ubrzanja na bazi integrodiferencijatora.
- 2) Odrediti koeficijent prenosa k jednosmernog tahogeneratora čiji su podaci: brzina vrtnje $\omega = 4000$ ob/min, struja rotora $I = 0,08$ A, otpor navoja rotora $R_r = 400 \Omega$ i otpor opterećenja $R_L = 5750 \Omega$.
Rešenje: $E = c\phi\omega = 0,08 \cdot 400 + 0,08 \cdot 5750 = 492$ V, $c\phi = 492/4000 = 0,123$, $k = c\phi R_L(R_r + R_L)^{-1} = 0,115$ V/ob/min.
- 3) Koje su sličnosti i razlike elektromagnetskog i optičkog tahometra?
- 4) Analizirati izraz za osetljivost na ubrzanje u stacionarnom stanju inercionog akcelerometra.
- 5) Pri merenju vibracija viši harmonici mogu biti nekoliko puta veći od osnovne frekvencije. Da li će inercioni akcelerometar tačno indicirati ubrzanje u prisustvu viših harmonika? Može li inercioni vibrometar indicirati amplitudu oscilacija višeg harmonika?
- 6) Uporediti osobine akcelerometra direktnog i kompenzacionog tipa.
- 7) Pod kojim uslovima tahogenerator može da se tretira kao bezinercioni sistem?

LITERATURA

1. *Mechanical vibration and shock measurements*, Application of B&K Equipment, Brüel&Kjaer, 1984.
2. S.L. Rjabikin, F.J. Zagavura: *Sredstva izmerenija parametrov dvizhenij*, Višča škola, Kiev, 1987.
3. N. I. Podlesnyj, V.G. Rubinov: *Elementy sistem avtomatičeskogo upravlenija i kontrola*, Višča škola, Kijev, 1982.
4. G.K. Bojkov, V.G. Kiselev, S.S. Kostjukovič, V.I. Solomaho: *Laboratornyj praktikum po priboram točnoj mehaniki*, Vyšejšaja Škola, Minsk, 1983.
5. A.S. Moris: *Principles of measurements and instrumentation*, Prentice Hall Inc, Englewood Cliffs, 1988.
6. D.P. Ekman: *Industrial instrumentation*, McGraw Hill, 1958.
7. *Microwave sensing modules and sources*, Techn. note, Alpha Industries, Inc. 1987.
8. S. Mc Clelland: *The penny drops for magnetic sensors*, Sensors Review, 9(3), p. 156-166, 1989.
9. G.R. Horner, R.J. Lacey: *Rotary velocity and position transducers under review*, Sensors Review, 7(4), p. 209-215, 1987.
10. *Modifying Hall effect sensors to generate digital output*, Trent Wood Sprague Electric UK, Sensors Review 7(4), p. 209-215, 1987.
11. J.M. Staffel: *Encoder uses image sensors for break through accuracy*, Control Engineering, december, 1989.
12. *Digital accelerometer TB1010*, Silicon Design Inc (manual), www.silicondesigns.com
13. *Dokumentacija proizvođača*: www.honeywell.com, www.sensormag.com, www.philips.com

17

SENZORI SILE I MOMENTA

17.1. FIZIKALNA OSNOVA MERENJA SILE I MOMENTA

Sila je jedna od osnovnih veličina u mehanici. U skladu sa drugim Njutnovim zakonom, sila F se definiše kao proizvod mase m i ubrzanja a :

$$F = m \cdot a . \quad (17.1)$$

Jedinica za silu je $N=k\text{gm}/\text{s}^2$. Ako je masa poznata, sila se, prema jednačini (17.1), određuje merenjem ubrzanja. Metode merenja na ovoj osnovi nazivaju se akcelerometarske metode, a odgovarajući senzori sile su, u suštini, akcelerometri.

Sila Zemljine teže (težina) jeste sila koja nastaje delovanjem ubrzanja Zemljine teže g :

$$G = m \cdot g , \quad (17.2)$$

i uvek je usmerena prema centru mase Zemlje. Ubrzanje Zemljine teže nelinearno zavisi od geografske širine a i nadmorske visine h :

$$g = 9,78049(1 + a \sin^2 a - b \sin^2 2a) - (c + d \cos^2 2a)h + eh^2 , \quad (17.3)$$

gde su konstante $a=5,3024 \cdot 10^{-3}$, $b=5,9 \cdot 10^{-7}$, $c=3,0855 \cdot 10^{-6}$, $d=2,2 \cdot 10^{-9}$ i $e=7,2 \cdot 10^{-13}$. Merenje sile Zemljine teže pri poznatom g svodi se na merenje mase. Jednačinu (17.2) potrebno je korigovati za iznos sile uzgona.

Metode merenja sile primenom gravitacionog zakona nazivaju se metode balansa, jer se nepoznata sila direktno ili indirektno poredi sa poznatom gravitacionom silom. Odgovarajući senzori sile su vase.

Deformacija tela delovanjem sile definiše se na osnovu Hukovog zakona:

$$F = c \cdot l , \quad (17.4)$$

gde je c krutost tela, a l vektor deformacije tela. Ako je poznat koeficijent krutosti, tada je silu moguće odrediti merenjem deformacije. Najveći broj senzora sile radi na ovom principu.

Merenje sile merenjem deformacije realizuje se na jedan od sledećih načina:

- 1) Meri se površinska deformacija tela ili deformacija elastičnog elementa u senzoru. Elastični elementi mogu biti opruge, prstenovi, cilindri i specijalno profilisani elementi. Elastični senzori sile po ovoj metodi su, zapravo, senzori pomeraja.
- 2) Mere se parametri ili svojstva elastičnog elementa u senzoru koji se menjaju pod uticajem sile. Takvi parametri su: električni i magnetni otpor, frekvencija vlastitih oscilacija i drugi, a senzori sile se označavaju kao pijezoelektrični, magnetootporni, magnetoelastični itd.
- 3) Mere se svojstva tela koja se menjaju delovanjem sile. Takve osobine su: brzina prostiranja zvuka, provodenje toplove, električni i magnetni otpor, prelamanje svetlosti, a senzori se označavaju kao ultrazvučni, termoelastični, magnetoelastični, fotoclastični, jonizacioni, interferometarski i drugi. Ovi senzori najviše se upotrebljavaju za detekciju mehaničkog naprezanja.

Problemi merenja sile. Sila se meri u širokom opsegu $0 - 10^9 \text{ N}$, pri dinamičkim promenama $0 - 100 \text{ kHz}$, u temperaturnom intervalu od -270°C do 1200°C , u različitim sredinama i pod delovanjem raznovrsnih smetnji. Četiri su glavna problema koja treba rešiti u toku gradnje senzora sile. Prvi problem odnosi se na tačnost, budući da se merenje sile u pravilu mora provoditi sa tačnošću koja je veća nego kod merenja drugih veličina. U tehničkim merenjima zahteva se tačnost $\pm 1\text{--}2\%$, ali je u automatizovanoj proizvodnji i robotici neophodna tačnost $\pm 0,1\text{--}0,2\%$. Ovo usložnjava gradnju senzora kako u metodsko-teorijskom tako i u praktičnom pogledu. Drugi problem nastaje zbog toga što je sila vektorska veličina, a senzor na izlazu daje skalarnu veličinu. Treći problem je ograničenost mehaničkih naprezanja u realnom materijalu. Uvek se smatra da sila deluje u jednoj tački, ali kako realni materijali mogu izdržati samo ograničena naprezanja, kod merenja sile moraju se definisati određeni segmenti površine na kojima deluje ista sila. U praksi se meri sila, mada se u suštini radi o polju sile. Četvrti problem odnosi se na pojavu da se senzor sile ponaša na jedan način kada je sam, a na drugi način kada je ugrađen u složeni merni sistem.

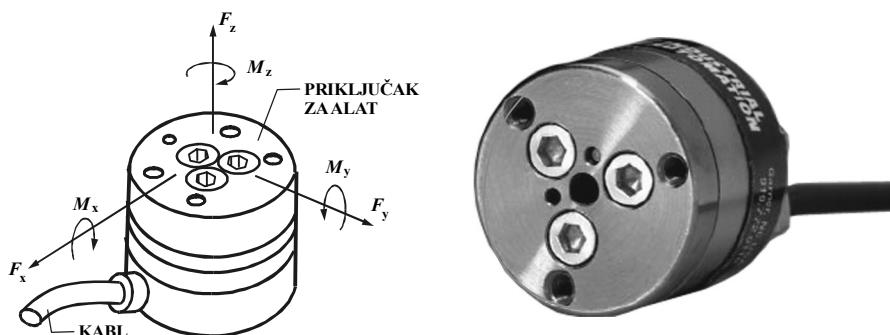
Merenje intenziteta i pravca. U numerički upravljenim mašinama i u robotici, pored intenziteta sile F i momenta M , potrebna je i informacija o pravcu njihovog delovanja. To se ostvaruje merenjem komponenata vektora \mathbf{F} i \mathbf{M} duž koordinatnih osa x , y i z . Intenzitet sile u tom slučaju odreduje se pomoću jednačine:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}. \quad (17.5)$$

Između pojedinih komponenata i intenziteta postoje relacije:

$$F_x = F \cos \alpha, \quad F_y = F \cos \beta \quad \text{i} \quad F_z = F \cos \gamma, \quad (17.6)$$

na osnovu kojih se mogu izračunati i uglovi α , β i γ , koji definišu pravac delovanja sile \mathbf{F} . Merenje intenziteta i pravca delovanja sile vrši se pomoću višekomponentnih senzora sa specijalno profilisanim elementima osetljivim na deformacije duž i oko osa ili pijezokristalni diskovi sećeni duž određene ose (slika 17.1). Neophodni proračuni, u skladu sa jednačinama (17.5) i (17.6), mogu se obaviti upotrebom adekvatnih mernih šema i algoritama.

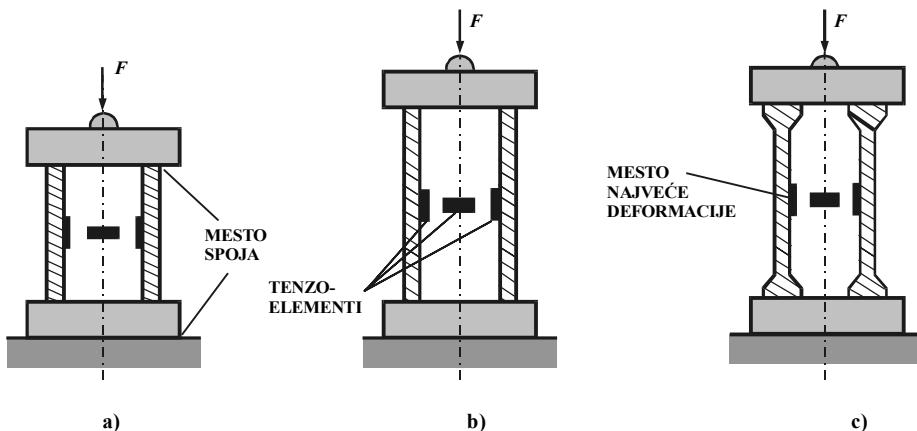


Slika 17.1. Šestokomponentni senzori: a) komponente sile i momenta, b) izgled senzora

17.2. PRINCIPI GRADNJE SENZORA SILE I MOMENTA

Principi gradnje. Gradnja senzora sile odredena je fizikalnim principom konverzije sile u izlazni signal, te tehničkim i ekonomskim mogućnostima. U okviru ovih ograničenja moguće je napraviti veliki broj različitih senzora. Međutim, da bi se doabile optimalne tehničke karakteristike, prilikom gradnje treba poštovati: princip monolitnosti, princip integriranja, princip simetrije i princip optimalnih konstruktivnih granica.

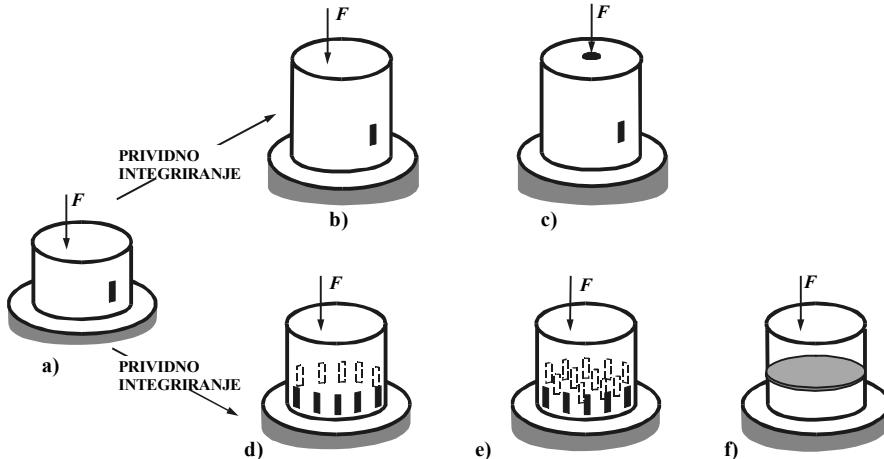
Princip monolitnosti podrazumeva da se merena sila unutar senzora prenosi samo pomoću jednog elementa (slika 17.2). Ukoliko ima više elemenata, na spojevima se javlja trenje, koje utiče na tačnost senzora. Iz tehničkih razloga nije uvek moguće izbeći upotrebu više elemenata za prenos sile, ali se njihov broj može smanjiti tako da se prelazi između elemenata postavljaju što dalje od mesta na kojem je primarni element konverzije, zatim tako što će se veza između elemenata postaviti



Slika 17.2. Princip monolitnosti konstrukcije tenzootporničkog senzora sile: a) osnovna konstrukcija, b) poboljšana konstrukcija udaljavanjem spoja ploče i cilindra od mesta sa najvećom deformacijom, c) poboljšana konstrukcija smanjenjem deformacije na mestu prelaza ploča-cilindar

na mestu najmanje deformacije, tj. na zadebljanjima, te upotreboru elemenata sa što sličnijim geometrijskim i mehaničkim karakteristikama.

Princip integriranja podrazumeva da senzor mora imati osetljivi element sa nekom površinom poprečnog preseka kako bi se izbegla pojava velikih mehaničkih naprezanja na mestu delovanja sile. Zato je senzor sile tačniji što je osetilni element bolje rasporeden po površini na koju deluje sila. U tom smislu integriranje može biti prividno (o polju deformacije, tj. o merenoj sili koja ga stvara sudi se prema vrednosti polja u samo jednoj tački) ili stvarno (o polju deformacije i sili sudi se na osnovu vrednosti u više tačaka). Konstruktivna rešenja gde je omogućeno prividno integriranje su: postavljanje osetilnog elementa što dalje od mesta gde deluje sila, ograničavanje oblasti (tačaka) na koju deluje sila na ulazu u senzor, te simetričnost senzora. Stvarno integriranje omogućava se: postavljanjem više osetilnih elemenata po



Slika 17.3. Princip integriranja u gradnji otporničkog senzora sile: a) osnovna konstrukcija, b) udaljavanje mesta delovanja sile od mesta gde je postavljen osetilni element, c) smanjenje ulazne površine pomoću sferne veze, d) osetilni elementi po vanjskoj površini senzora, e) osetilni elementi po površini poprečnog preseka, f) kontinualno raspodeljeni osetilni element po površini poprečnog preseka

vanjskoj površini senzora, postavljanjem više senzora po poprečnom preseku senzora, te primenom kontinualno raspodeljenog osetilnog elementa (slika 17.3).

Princip simetrije podrazumeva da su stanja senzora asimetrična kada je u pitanju delovanje merene sile, a simetrična kada su u pitanju sva druga delovanja. Poželjno je da karakteristika senzora bude maksimalno nesimetrična na promene merene sile, tako da otklon senzora od neopterećenog stanja bude mera delujuće sile. Očuvanje simetričnosti u odnosu na sve druge veličine najbolji je način izdvajanja merene od ostalih veličina. Simetričnost na vanjska delovanja (temperatura, vlažnost i sl.) s_1, s_2, \dots, s_n obezbeđuje postojanost (invarijantnost) nulte tačke, tj. u opštem slučaju je:

$$f(F=0, s_1, s_2, \dots, s_n) = f(0, 0, \dots, 0) . \quad (17.7)$$

Simetričnost na parazitna opterećenja p_1, p_2, \dots, p_n znači simetričnost promene karakteristike senzora, odnosno neosetljivost na parazitna opterećenja:

$$f(F, p_i) = f(F, -p_i) \text{ za svako } p_i. \quad (17.8)$$

Simetričnost u odnosu na mesto na kojem deluje sila, znači neosetljivost na tu promenu:

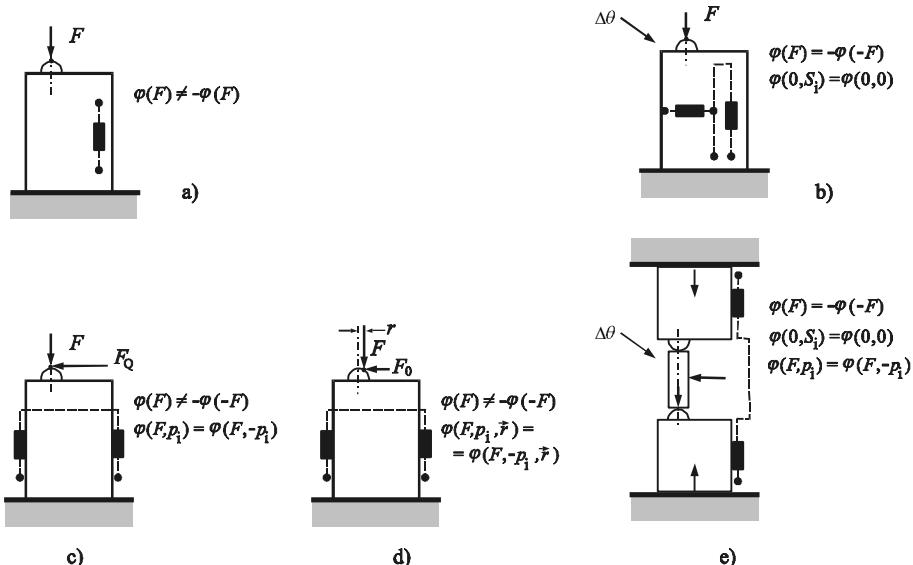
$$f(F, \vec{r}) = f(F, -\vec{r}). \quad (17.9)$$

Prvo navedena simetričnost ostvarljiva je samo pomoću specijalnih rešenja, koja su često povezana sa tehnološkim i konstruktivnim poteškoćama. Metod kompenzacije pokazuje se kao veoma pogodan, jer se pomoću relativno jednostavnih dopunskih elemenata postiže invarijantnost u odnosu na vanjska delovanja. Smanjenje osetljivosti na ta delovanja je metod pomoću kojeg se greška zbog odstupanja od potpune simetrije može samo reducirati, ali ne i sasvim odstraniti. Ovaj metod uvek se detaljno razrađuje kod primene nekog novog principa ili načina konstrukcije senzora.

Poseban slučaj asimetričnosti senzora je antisimetričnost njegove statičke karakteristike:

$$f(F) = -f(-F). \quad (17.10)$$

Budući da je funkcija f neparna, njen razvoj u Tejlorov red nema parne članove. To je dobro zato što na taj način kvadratna komponenta greške, koja inače brzo raste, uopšte ne postoji. Prema tome, senzor sa takvom karakteristikom ima bolju linearnost i veći merni opseg. Takvi senzori se grade primenom tehnike diferencijalnih šema, tj. spajanjem dva senzora u jedan jedinstveni. Na oba sastavna



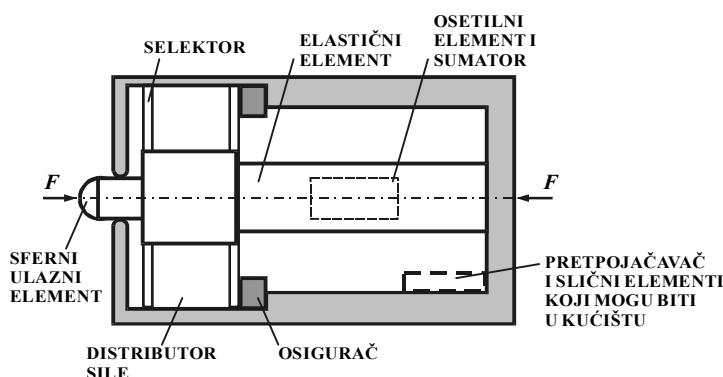
Slika 17.4. Primena principa simetrije u gradnji tenzootporničkog senzora sile: a) senzor bez smetnje, b) simetrija u odnosu na delovanje okoline (temperatura $\Delta\theta \sim S_1$), c) simetrija u odnosu na opterećenje $F_q \sim p$, d) simetrija u odnosu na promenu mesta delovanja sile, e) antisimetričnost u odnosu na merenu silu - primena tehnike diferencijalnih šema

senzora deluje ista sila, ali suprotna po smeru delovanja. Izlazni signal dobija se kao razlika izlaza iz sastavnih senzora. Slika 17.4 ilustruje princip simetrije na primeru gradnje tenzootporničkog senzora sile.

Princip optimalnih konstruktivnih razmara. Za svaku konkretnu šemu konstrukcije postoje gornja i donja granica nominalnih vrednosti sile. Nije celishtodno prelaziti definisani opseg zato što greške merenja postaju tako veće, a može doći i do trajnog oštećenja senzora. Ukoliko je potreban senzor za veću ili manju nominalnu силу, obično se menja njegova konstrukcija, a ukoliko zadatak nije moguće realizovati datim tipom senzora, tada se gradi senzor sa drugim principom pretvaranja.

Struktura senzora. Jednokomponentni senzori sile smešteni su u hermetički zatvorenom kućištu, pogodnom za montažu. Kućište je opremljeno potrebnim mehaničkim priključcima i električnim izvodima. Mada se rad senzora sile zasniva na različitim fizičkim principima, u strukturi svakog senzora mogu se uočiti tipični elementi (slika 17.5):

- ulazni element, čija konstrukcija i oblik prijemne površine (najčešće ravna ili sferna) zavise od toga da li ulazna sila deluje na sabijanje ili istezanje elementa
- element za prenos sile od ulaznog elementa do konvertora sile u električni signal
- selektor, koji štiti senzor od poprečnih parazitnih sila, a pravi se u obliku jednostrukе ili dvostrukе membrane, pričvršćene za kućište
- osigurač od preopterećenja
- elastični element, koji pretvara ulaznu silu u ekvivalentnu deformaciju
- konvertor sile u električni signal, koji se nalazi na mestu sumiranja sile
- kućište, koje štiti senzor od nepoželjnih mehaničkih i termičkih uticaja.



Slika 17.5. Principijelna konstrukcija senzora sile

17.3. SENZORI SILE

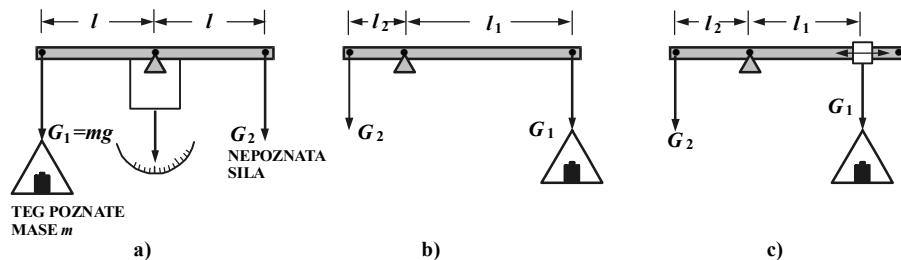
Senzori težine zasnivaju se na primeni jednačine gravitacije, odnosno metode balansa. Fundamentalni instrumenti ovoga tipa su mehaničke vase. Nepoznata sila (težina) upoređuje se sa gravitacionom silom koju ima poznata masa m . Ako su kraci jednakim (slika 17.6a), balans se opisuje jednačinom:

$$G_1 l = G_2 l , \quad (17.11)$$

odakle sledi da je:

$$G_1 = G_2 . \quad (17.12)$$

Na ovaj način prave se tzv. analitičke vase. Očitanje mase je direktno. Moguće je meriti masu u opsegu 0,001 g do 100 kg sa rezolucijom do 10^{-7} opsega. Povećanje tačnosti ograničeno je tačnošću etalonske mase, varijacijom ubrzanja Zemljine teže i temperaturnom razlikom između krajeva krakova.



Slika 17.6. Instrumenti sa balansom sile: a) vaga sa jednakim kracima, b) vaga sa nejednakim kracima (danska forma), c) vaga sa nejednakim kracima (rimска forma)

Za instrumente sa nejednakim kracima balans je postignut kada je:

$$G_1 l_1 = G_2 l_2 , \quad (17.13)$$

odakle je:

$$G_2 = G_1 l_1 / l_2 = k l_1 . \quad (17.14)$$

Ravnoteža se postiže dodavanjem poznate mase (danska forma vase, slika 17.6b) ili promenom dužine kraka na kom je ovešena poznata masa (rimска forma vase, slika 17.6c).

Akcelerometarski senzori sile. Merenje sile pomoću akceleracije a poznate mase m retko se primjenjuje, mada postoji veliki izbor akcelerometara. Razlog je što sila obično deluje na neko telo koje nije slobodno, i ne može da se kreće, pa nema ni ubrzanja. Senzori akceleracije primjenjuju se u tehniči vibracija za merenje dinamičkih sila koje deluju na vibrirajuće mase.

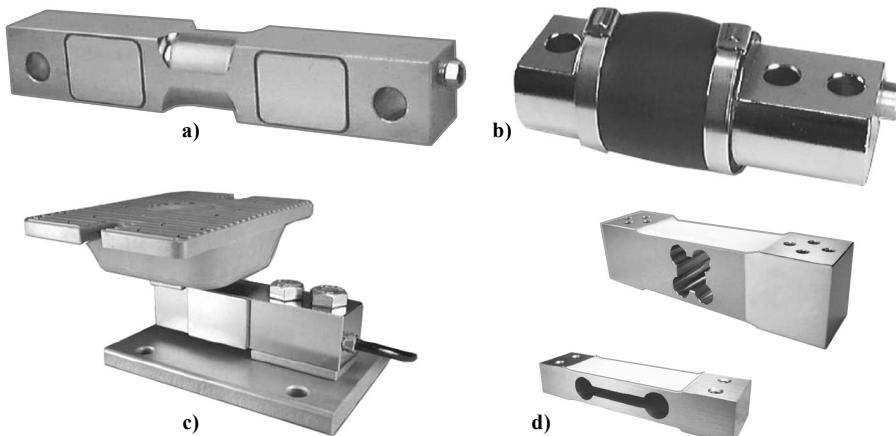
Elastični senzori imaju mehanički elastični element čija je deformacija, tj. promena dužine, proporcionalna sili koja na njega deluje. Deformacija elementa opisuje se diferencijalnom jednačinom drugog reda:

$$F = m \ddot{x} + B \dot{x} + Cx . \quad (17.15)$$

U stacionarnom stanju je:

$$F = Cx . \quad (17.16)$$

Konstanta krutosti ovde se tretira kao koeficijent proporcionalnosti. Najjednostavniji deformacioni element za merenje sile je opruga, a upotrebljavaju se i elementi u obliku prstena, rama, dvostrukog prstena, cilindra, prizme, konzole i drugi (slika 17.7). Pomoću elastičnih senzora može da se meri deformacija, pomeraj, pritisak ili sila. Sila se meri u opsegu $0\text{--}10^7\text{ N}$, a tačnost i opseg instrumenta zavise od elastičnog elementa i senzora koji detektuje nastalu deformaciju. Opruga omogućava merne opsege $0,1\text{--}10\text{ kN}$ i malu tačnost, a prsten omogućava merne opsege od 2 kN do 2 MN i tačnost $\pm 0,2\text{--}0,5\%$. Elastični senzori sile najčešće se i nazivaju prema načinu merenja deformacije: elektromagnetični (induktivni, transformatorski, sa LVDT-prevaračem), kapacitivni, otpornički (sa ugljenim otpornikom, sa tenzoelementima, poluprovodnički sa $p-n$ prelazom, potenciometarski), magnetoelastični (aktivni, sa promenljivim permeabilitetom, anizotropski), rezonantni (sa strunom), te kompenzacioni. Na slici 17.8 prikazane su principijelne izvedbe navedenih elastičnih senzora sile, a u tabeli 17.1 njihove tehničke karakteristike.



Slika 17.7. Elastični elementi za merenje sile: a) cilindrični, b) sa smicanjem, c) za izradu vaga, d) specijalni elementi sa višestrukim prstenovima

Magnetoelastični senzori rade na principu obrnutog magnetostriktijskog efekta, koji predstavlja promenu stanja magnetisanog materijala pod uticajem mehaničkih naprezanja. Kao materijal u gradnji magnetoelastičnih senzora upotrebljavaju se: legure železa i nikla sa sadržajem nikla $50\text{--}70\%$, legure železa i silicija sa $2\text{--}4\%$ silicija, te specijalni materijali kao što su legure železa i aluminijuma. Po načinu rada razlikuju se aktivni, parametarski i anizotropski senzori.

Kod aktivnih magnetoelastičnih senzora elastični element je stalni magnet sa navojima n . Mehaničko naprezanje σ koje nastaje delovanjem merene sile F uzrokuje promenu magnetne indukcije za iznos:

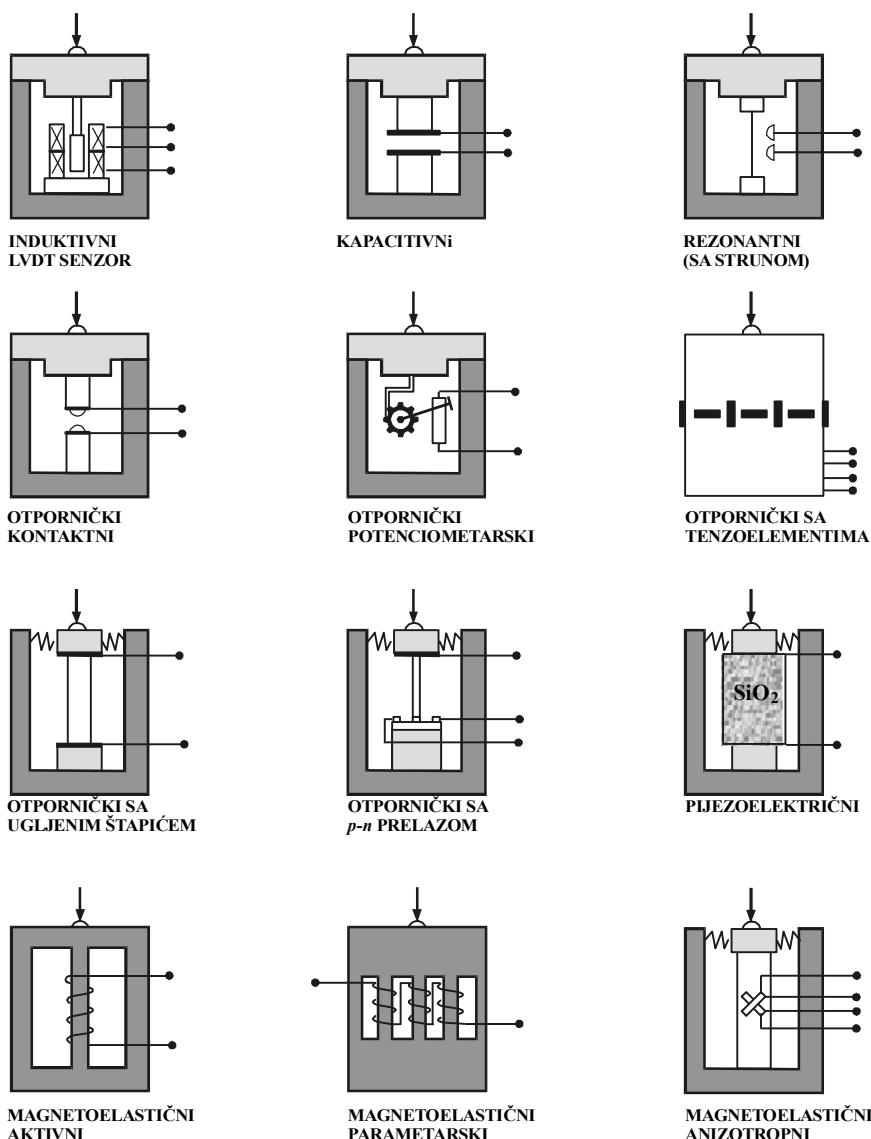
$$\Delta B = f(\sigma) \approx a_B \sigma , \quad (17.17)$$

pa se u namotajima indukuje napon:

$$U = -n a_B \frac{1}{S} \frac{dF}{dt} = k \frac{dF}{dt} . \quad (17.18)$$

KARAKTERISTIKA TIP ELASTIČNOG SENZORA	OPSEG MERENE SILE	OPSEG DEFORMACIJE ELASTIČNOG ELEMENTA mm	PROMENA PARAMETRA DETEKTORA DEFORMACIJE %	TEMPERATURNI DRIFT NULE %	TAČNOST %	DOBRE OSOBINE	LOŠE OSOBINE
INDUKTIVNI LVDT-SENZORI	0,01 N - 10 MN	0,05-0,5	Induktivnost 5-20	0,02-0,05	0,1-1	jednostavnost pouzdanost	otežano povećanje tačnosti
KAPACITIVNI	0,01 N - 10 MN	0,05-0,5	Kapacitivnost 5-20	0,01-0,05	0,1-1	neosetljivost na magnetna polja	visoka frekvencija napona napajanja
REZONANTNI (SA STRUNOM)	0,1 kN - 5 MN	0,1-0,25	Frekvencija 10-100	0,005-0,02	0,03-0,1	neosetljivost na šumove	nelinearna karakteristika, složenost
OTPORNIČKI KONTAKTNI	10 N - 1 MN	0,2-1	Otpor ∞	-	-	jeftin, neosetljiv na šum	prekidnost merenja, prelazni otpor kontakta
OTPORNIČKI POTENCIOMETARSKI	0,5 kN - 5 MN	0,5-2	Otpor <100	0,02-0,05	0,25-0,5	jednostavnost konstrukcije	ograničen vek, loša dinamika
OTPORNIČKI SA TENZOELEMENTIMA	0,01 N - 10 MN	0,02-1	Otpor 0,1-10	0,001-0,004	0,01-2	univerzalna primena	relativno skupe merne šeme
OTPORNIČKI SA UGLJENIM ŠTAPIĆEM	1 N - 10 MN	0,05-0,2	Otpor <100	2-30	0,1-0,5	jednostavnost konstrukcije	samo za indukciju
OTPORNIČKI SA $p-n$ PRELAZOM	1-100mN	0,001	Otpor 10-100	2-20	0,5-2	za male sile, dobra dinamika	kvazistacionarna stat. karakteristika
PIJEZOELEKTRIČNI	1 kN - 0,5 MN	0,005-0,05	Električni naboj	-	0,01-1	dobra dinamika	kvazistacionarna statička karakteristika
MEGNETOELASTIČNI AKTIVNI	1 kN - 5 MN	0,005-0,05	Magnetna indukcija	-	1-5	kompaktnost, dobra dinamika	mala tačnost, kvazistacionarnost
MAGNETOELASTIČNI PARAMETARSKI	1 kN - 5 MN	0,02-0,1	Magnetna permeabilnost 20-50	0,02-0,05	1-5	velika izlazna snaga	mala tačnost, osetljivost na preopterećenje
MAGNETOELASTIČNI ANIZOTROPNI	0,3 kN - 1 MN	0,02-0,2	Meduinduktivnost 10-20	0,003-0,05	0,05-2	velika izlazna snaga, tačnost	tehnološki problemi za veliku tačnost

Tabela 17.1. Uporedni pregled tehničkih karakteristika elastičnih senzora sile



Slika 17.8. Pregled elastičnih senzora sile

Parametarski magnetoelastični senzori imaju konstantno magnetno polje, ali se magnetna permeabilnost elastičnog elementa menja zbog delovanja sile. Po načinu rada i principima gradnje ne razlikuju se od induktivnih senzora sa promenljivim magnetnim permeabilitetom. U tehničkoj praksi ovi senzori odavno se upotrebljavaju za merenje dinamičkih sila. Iz jednačine (17.18) vidi se da je statička karakteristika kvazistacionarna.

Kod anizotropskih magnetoelastičnih senzora elastični element je napravljen tako da se slika magnetskog polja pomera u prostoru pod delovanjem sile. Element

ima dva navoja: pobudni, koji služi za stvaranje magnetnog polja, i izlazni, na kojem se dobija izlazni napon. Promena induktivnosti pobudnog navoja zbog deformacije relativno je mala, ali promena međuinduktivnosti može biti velika. To zavisi od uzajamne orijentacije magnetnog polja i polja mehaničkih naprezanja, pa se orijentacija magnetnog polja određuje kada nema naprezanja. U tehničkoj praksi najviše je primena anizotropskih magnetoclastičnih senzora sile sa uglom između polja od 45° , 90° i 0° .

17.4. SENZORI MOMENTA

Moment je izvedena mehanička veličina koja predstavlja proizvod sile F i njenog rastojanja l do referentne ose:

$$M = F \cdot l = I \cdot \alpha \quad [\text{Nm}] , \quad (17.19)$$

gde je:

$$I = \sum m r^2 \quad (17.20)$$

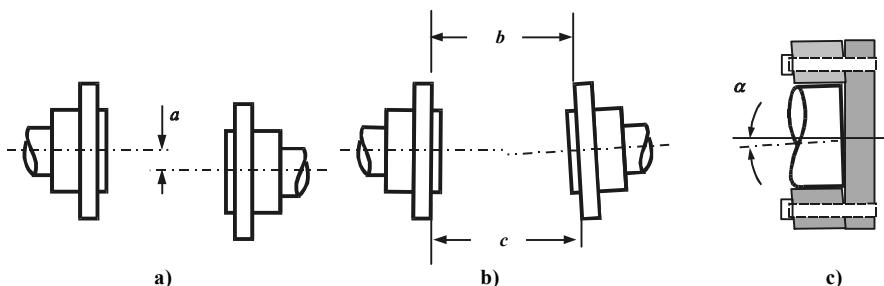
moment inercije tijela kojim se telo opire ugaonom ubrzaju α . Masa m odnosi se na jednu česticu tela koja rotira na rastojanju r od ose tela.

Merenje momenta je od posebnog značaja za obrtne električne mašine. Snaga P [W] koju motor sa ugaonom brzinom ω [rad/s] pomoću osovine prenosi na opterećenje je:

$$P = M \omega . \quad (17.21)$$

Problemi koji se javljaju prilikom merenja sile prisutni su i kod merenja momenta. Specifičnosti nastaju zbog tehničke nemogućnosti da se krajevi osovine koja prenosi moment idealno postave u ležište (slika 17.9). Parametri nepravilnosti spoja osovine i ležišta su:

- paralelno odstupanje a ; maksimalno dozvoljene vrednosti su $0,8 - 1,2$ mm
- ugaono odstupanje $b-c$; maksimalno dozvoljene vrednosti su $0,3 - 0,8$ mm

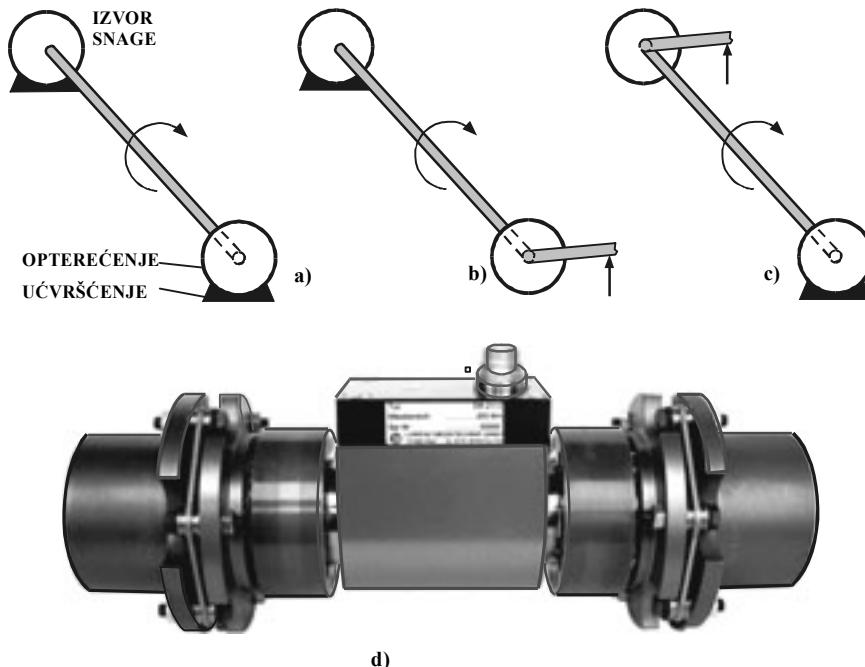


Slika 17.9. Nepravilnosti u ležištu osovine: a) paralelno odstupanje a , b) ugaono odstupanje $b-c$, ugaono odstupanje α

- ugaono odstupanje α u odnosu na nepokretno ležište; maksimalno dozvoljene vrednosti su $10 - 15^\circ$.

Slika 17.9 ilustruje navedena odstupanja, koja, inače, važe za određeno aksijalno pomeranje ležišta, ugaonu brzinu osovine i specificiranu količinu maziva.

Dinamometarski metod merenja momenta zasniva se na merenju pomoću sile reakcije u ležajevima. Snaga se prenosi od izvora do opterećenja pomoću osovine, zbog čega osovina trpi torziju (slika 17.10a). Snaga (moment) koja se prenosi od izvora do opterećenja može se meriti na strani izvora ili na strani opterećenja, a moment se računa kao proizvod sile F i rastojanja L (slika 17.10b i 17.10c).

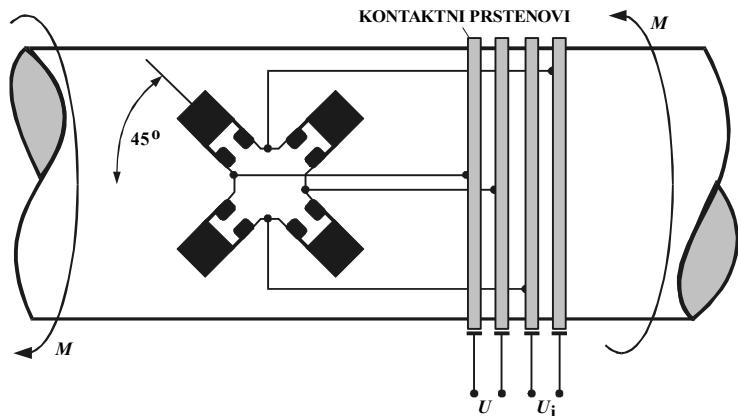


Slika 17.10. Dinamometarski princip merenja momenta: a) prenos snage pomoću osovine, b) merenje sile na strani opterećenja, c) merenje sile na strani izvora, d) merni sistem

Merenje momenta pomoću torzionog naprezanja. Torzionalno naprezanje τ osovine proporcionalno je momentu, odnosno:

$$M = \tau I , \quad (17.22)$$

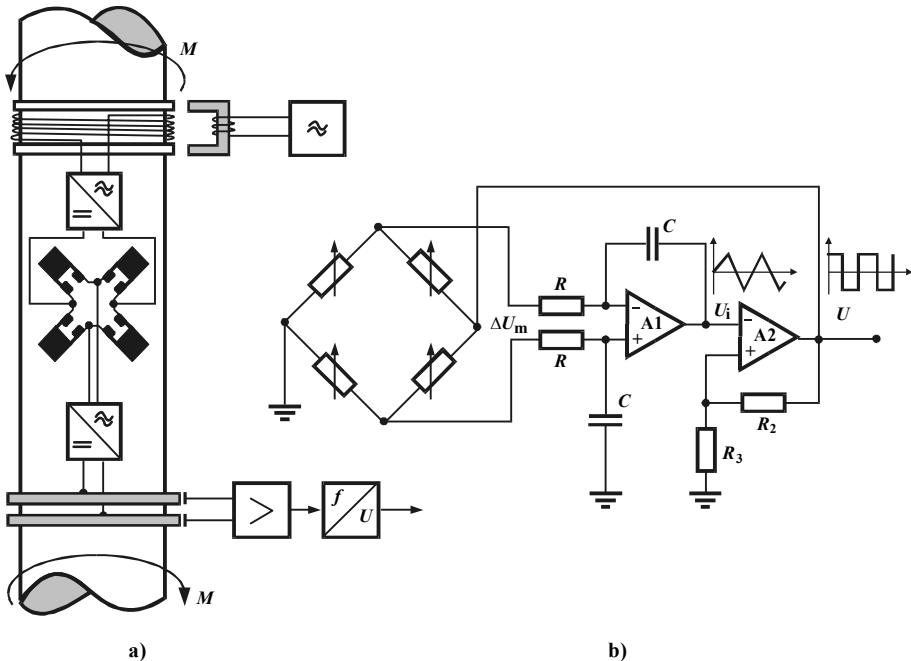
gde je $I = \pi r^3 / 2$ moment inercije osovine poluprečnika r . Za merenje torzionog naprezanja primenjuju se tenzoelementi. Elementi se postavljaju u pravcu najvećeg naprezanja, tj. pod uglom od 45° u odnosu na osu osovine (slika 17.11).



Slika 17.11. Senzor momenta sa tenzoelementima i kontaktnim prstenovima

Potrebljena su četiri tenzoelementa, koji formiraju puni most. Na taj način postiže se najveća osetljivost, te najbolja temperaturna kompenzacija i eliminacija uticaja progiba na tačnost merenja. Tipična tačnost ovakvih tenziometara je $\pm 1\text{--}2\%$. Praktični problemi prisutni su kod realizacije spoja mernog mosta i mernog uređaja. Klasično rešenje je pomoću kontaktnih prstenova. Prelazni otpor kontakata i termoelektromotorna sila, koja nastaje zbog zagrejavanja kontakata, smanjuju tačnost torziometra. Ovi problemi uspešno se rešavaju kod beskontaktnih senzora.

Beskontaktni senzori momenta grade se na principu merenja torzionog naprezanja uz pomoć tenzootporničkih elemenata (slika 17.12a). Induktivni pretvarač

Slika 17.12. Beskontaktni senzor momenta sa tenzoelementima: a) principijelna šema,
b) pretvarač napona u frekvencu

u obliku obrtnog transformatora služi za beskontaktno napajanje mosta. Sekundar transformatora spojen je na most preko ispravljača. Proporcionalno merenom momentu na mernoj dijagonali mosta dobija se istosmerni napon ΔU_m , koji je priključen na pretvarač napona u frekvenciju f . U/f -pretvarač napravljen je na bazi integratora u diferencijalnom spoju i komparatora (slika 17.12b). Izlazni napon iz integratora je linearno rastući signal:

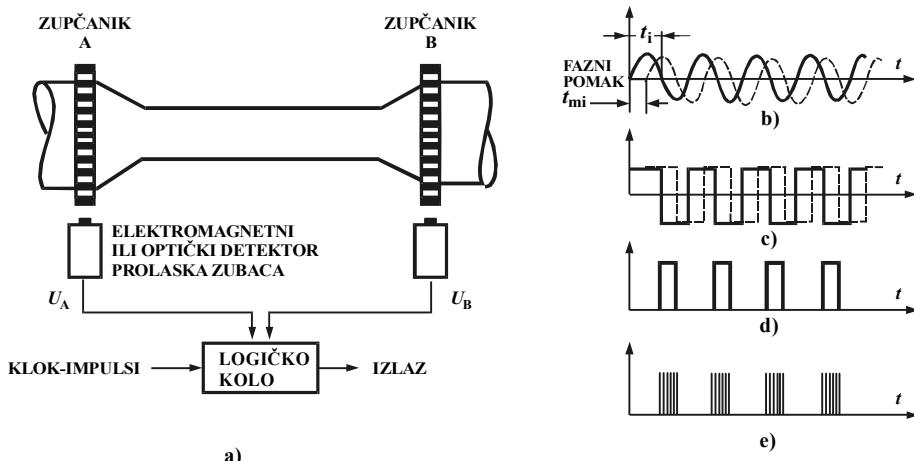
$$U_i = \frac{1}{RC} \int \Delta U_m dt = \frac{\Delta U_m}{RC} \cdot t, \quad (17.23)$$

koji se na komparatoru poredi sa referentnim naponom U_r . Kada je $U_i > U_r$, izlazni napon U iz U/f -pretvarača menja polaritet. Napon U istovremeno je signal povratne sprege, pa će, sledstveno tome, polaritet promeniti i napon mosta ΔU_m i referentni napon komparatora U_r . Integriranje se u nastupajućem poluperiodu vrši sa suprotnim znakom, te se tako iz integratora formira pilasti napon. Pile su strmije što je napon ΔU_m veći. Na izlazu komparatora generiše se niz četvrtki, čija frekvencija iznosi 5–15 kHz i proporcionalna je naponu mosta ΔU_m , odnosno merenom momentu:

$$f = \frac{\Delta U_m}{4RC} \cdot \frac{R_2 + R_3}{R_3 U} = k M. \quad (17.24)$$

Frekventno modulisani signal sa ulaza U/f -pretvarača ide na kapacitivni kolektor ili obrtni transformator. Za frekventnu demodulaciju potreban je f/U pretvarač. On se obično pravi kao generator impulsa konstantne širine (monostabilni multivibrator), kojem se u seriji dodaje niskopropusni filter.

Beskontaktni senzor momenta na bazi tenzootporničkih elemenata primenjuje se za merenje momenta u opsegu 10 Nm do 50 kNm. Tipična tačnost je $\pm 0,1\%$, a osjetljivost 1–100 mV na 1 V napajanja mosta pri maksimalnoj vrednosti momenta. U kombinaciji sa senzorom ugaone brzine može se ostvariti višefunkcionalni merni uredaj, koji na svome izlazu daje informacije o brzini ω , momentu M i snazi $P = \omega M$.



Slika 17.13. Digitalni senzor momenta: a) princip rada, b) valni oblik signala iz senzora brzine, c) izlaz iz detektora nule, d) sled impuls-a proporcionalan razlici faza, e) sled klok-impulsa

Digitalni senzori momenta su beskontaktnog tipa. Fizikalni princip gradnje ovih senzora je proporcionalnost ugaonog uvrтанja osovine (torzionog ugla) sa momentom koji se prenosi. Osetilni element je kalibrirana torziona osovina. Ona je jednim krajem priključena na stranu motora, a drugim na potrošač. Na mestima priključenja postavljeni su zupčanici A i B (slika 17.13a). Delovanjem momenta dolazi do uvrtanja osovine i razlike u položaju zupčanika za iznos torzionog ugla.

Pomeranje zubaca detektuje se elektromagnetskim ili optičkim senzorima ugaone brzine. U prvom slučaju izlazni signali U_A i U_B imaju isti valni oblik, ali zbog relativne pomerenosti zupčanika, između njih postoji fazni pomeraj proporcionalan momentu (slika 17.13b). Pomoću detektora nule valni oblici napona U_A i U_B pretvaraju se u sled pravougaonih impulsa (slika 17.13c). Logičko kolo prima ova dva signala i na svome izlazu daje novi sled impulsa sa frekvencijom proporcionalnoj razlici faza, odnosno merenom momentu (slika 17.13d). Radi povećanja tačnosti na ulaz logičkog kola iz referentnog klok-oscilatora dovode se impulsi visoke frekvencije, koje kolo propušta na izlaz u toku vremena t_{mi} (slika 17.13e). Brojanjem ovih impulsa u određenom vremenu računa se srednja vrednost momenta. Računanjem odnosa t_{mi}/t_i u toku svakog perioda dobija se tranzijentna vrednost momenta na intervalu, koji je određen razmakom između zubaca. Tačnost digitalnih senzora momenta je $\pm 0,1\%$ pri rasponu ugaone brzine $0\text{--}120\,000\text{ ob/min}$. Izlazni signal je kodiran u BCD-kodu, a signal može biti i analogni (naponski ili strujni).

Povezivanje sa računrom ostvaruje se preko standardnog komunikacionog interfejsa, na primer RS232. Na tržištu postoje raznovrsni datalogeri razvijeni za prikupljanje podataka o merenoj sili/momentu, kao i posebni programi za obradu tih rezultata. Na slici 17.14 prikazan je digitalni uređaj koji služi kao displej i jedinica za podešavanje nule, kalibraciju u odnosu na tabelirane referentne vrednosti, proračun i korekciju greške, prikaz komponenti duž i oko osa u odabranim jedinicama. Na displej može da se priključi više senzora i da se prati njihov rad u multipleksiranom režimu.



Slika 17.14. Povezivanje senzora sile i momenta sa mikroprocesorskim displejom

PITANJA I ZADACI

- 1) Senzor sile sa oprugom (dinamometar) kalibriran je pomoću standardne mase na određenom lokalitetu. Da li će merenje tim dinamometrom na lokalitetu sa drugačjom konstantom gravitacije biti tačno?
- 2) Pijezokristal relativne dielektrične konstante $\epsilon_r = 5$ ima oblik diska poluprečnika $r = 1$ cm, debljinu $d = 1$ mm i naponsku osjetljivost na delovanje sile $S_u = 0,475$ V/N. Pijezokristal je kablom kapacitivnosti $C_p = 20$ pF priključen na pojačavač pojačanja $A_u = 50$, ulaznom otpornošću $R_p = 20$ MΩ u paraleli sa kapacitivnošću $C_p = 50$ pF. Kolika je amplituda sile koja na izlazu pojačavača daje izlazni napon $U_i = 0,5$ V?

Rešenje: $C_s = \epsilon_r S / d = 13,9$ pF, $C = C_s + C_k + C_p = 83,9$ pF,

Prema jednačini (12.11) je: $U_i = A_u S_u \frac{T\omega}{\sqrt{1 + (\omega T)^2}} F$ ($T = CR_p = 1,678 \cdot 10^{-3}$ s, $\omega = 2\pi f = 628,3$ rad/s), odakle sledi $F = 24,9$ N.

- 3) Objasniti načine beskontaktnog merenja momenta.
- 4) Sastaviti principijelu strukturu višefunkcionalnog senzora koji na svom izlazu daje informacije o trenutnoj ugaonoj brzini, momentu i snazi na osovini.
- 5) Objasniti principe gradnje senzora sile na primeru tenzootporničkog senzora.
- 6) Pri brzini od 900 ob/min na osovini motora prečnika 2 cm stvara se torzionalno naprezanje 2434 N/cm². Izračunati snagu koja se prenosi na opterećenje.
Rešenje: $P = \omega M = \omega \tau I = (2\pi n / 60) \tau (d^3 \pi / 16) = 3600$ Nm.
- 7) Pomoću prstena kao elastičnog senzora i LVDT-senzora pomeraja napraviti funkcionalnu šemu senzora sile.

LITERATURA

1. *Techn. note on Torque Transducers T1 and T2*, HBM-HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GMBH, Darmstadt
2. *Tech. note od digital torque measurement*, ONO SOKKI, Japan
3. E. Baumann: *Izmerenie sil' električeskimi metodami*, prevod sa nemačkog, Mir, Moskva, 1978.
4. H.H. Woodson, J.R. Melcher: *Electromechanical dynamics*, John Wiley&Sons Inc., New York, 1969.
5. A. Lenk: *Električeskie sistemy*, prevod sa nemačkog, Mir, Moskva, 1978.
6. J.D. Lenk: *Handbook of instrumentation*, Prentice Hall Inc, Enlewood Cliffs, New Jersey, 1980.
7. *Principi rada senzora sile i momenta*: www.messring.com, www.lorenz-messtechnik.de, www.ttloadcells.com
8. *Tehnička dokumentacija proizvodača*: www.mark-10.com, www.onosokki.com, www.sensors.co.uk,

18

SENZORI PRITISKA

18.1. FIZIKALNA OSNOVA

Definicija. Kada se kontinuum nalazi u kontaktu sa nekom graničnom površinom, tada okomito na nju deluje rezultanta svih unutrašnjih sila između čestica kontinuuma. Skalar koji se dobija kao odnos sile F [N] po jedinici površine S [m^2]:

$$p = F/S, \quad (18.1)$$

zove se pritisak.

Pored prethodne definicije koja proizilazi iz mehanike, postoje i druge definicije. Prema teoriji fluida, pritisak je lokalno svojstvo fluida i zavisi od visine stuba h [m] fluida iznad date lokacije i gustine fluida ρ [kg/m^3], odnosno:

$$p = \rho gh. \quad (18.2)$$

Pritisak se može definisati i pomoću kinetičke teorije gasova kao mera totalne prosečne kinetičke energije E [J=Nm] translatornog kretanja N molekula gasa u volumenu V [m^3] na temperaturi T [K]:

$$p = \frac{2}{3} NkT/V, \quad (18.3)$$

gde je $k = 1,380\,658 \cdot 10^{-23}$ J/K Bolcmanova konstanta.

Konačno, pritisak se može definisati pomoću drugog zakona termodinamike, tj. na osnovu nepovratnog termodinamičkog procesa kao odnos:

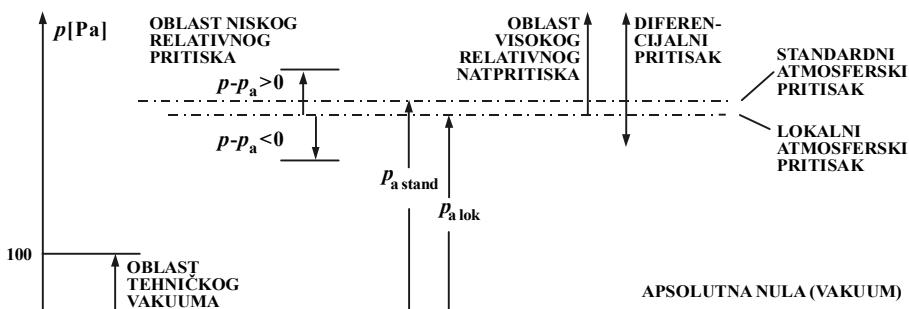
$$p = \frac{\delta W + \delta f}{dV}, \quad (18.4)$$

u kome je unutrašnja toplota nastala zbog trenja f u vezi sa učinjenim radom W .

Jedinica za pritisak. Bez obzira na koji način se pritisak definiše, jedinica za pritisak Pa (Paskal) dobija se kada sila od 1 N ravnomerno deluje na površinu od $1\ m^2$, tj. $1\ Pa = 1\ N/1\ m^2$. Ovo je mala jedinica za praktična tehnička merenja. Veće jedinice dobijaju se pomoću dopuštenih decimalnih višekratnika. Zakon o mernim jedinicama i merilima izuzetno dopušta jedinicu 1 bar = 10^5 Pa = 0,1 MPa, koja je izvan sistema SI. U literaturi i u praksi susreću se još uvek neke stare jedinice, čiji je pregled dat u dodatku 3.

Područje i opseg merenja pritiska. Pritisak se meri u rasponu $0 - 10^{10}$ Pa. Razlikuju se četiri merna područja, sa opsezima koji zavise od područja (slika 18.1):

- Područje apsolutnog pritiska: razlika između pritiska u specificiranoj tački fluida i pritiska apsolutne nule, koji ima vakuum. Opseg niskog apsolutnog pritiska (tehnički vakuum) meri se u opsegu $10^{-10} - 100$ Pa.
- Područje atmosferskog (barometarskog) pritiska: standardna vrednost $p_{a\text{stand}}$ odgovara visini stupca žive od 760 mm, na nivou morske površine, pri temperaturi od 0°C , gustini žive $\rho_z = 13595,1 \text{ kg/m}^3$, standardnoj gravitaciji $g = 9,90665 \text{ m/s}^2$ ($p_{a\text{stand}} = 101325 \text{ Pa} = 1,01325 \text{ bar} = 1013,25 \text{ mbar}$).
- Područje diferencijalnog pritiska: razlika između dva pritiska $\Delta p = p_1 - p_2$.
- Područje relativnog pritiska, kao poseban slučaj diferencijalnog, označava da je jedan pritisak atmosferski. Razlikuje se područje malih relativnih pritisaka u odnosu na lokalni atmosferski (potpritisak $p - p_a < 0$ i natpritisak $p - p_a > 0$ u opsegu $0 - 2500 \text{ Pa}$) i područje visokog relativnog pritiska (natpritisaka) u opsegu $0 - 10^{10} \text{ Pa}$.



Slika 18.1. Oblasti tehničkog merenja pritiska

Pritisak, mehanička deformacija i mehaničko naprezanje. Mehanička deformacija je promena oblika i volumena tela pod delovanjem vanjskog opterećenja, odnosno sile. Vanjska sila nastoji da razdvoji ili približi pojedine čestice tela, čemu se telo suprotstavlja unutrašnjim silama koje postoje između njegovih čestica. Unutrašnja sila podeljena sa površinom na kojoj deluje predstavlja naprezanje i izražava se u paskalima. Naprezanje je, dakle, unutrašnji pritisak. Merenja naprezanja i pritiska zato imaju mnogo sličnosti.

Mehanička deformacija i mehaničko naprezanje izučavaju se u teoriji elastičnih tela i nauci o čvrstoći. U opštem slučaju postoji šest komponenata naprezanja (tri normalne i tri tangencijalne) i šest komponenata deformacije (tri linearne i tri rotacione). Za njihovo određivanje moguće je postaviti 12 jednačina, ali se do rešenja teško dolazi za proizvoljni oblik tela i proizvoljno opterećenje. Zato merne metode imaju veliki značaj u analizi deformacija i naprezanja.

Sa porastom vanjske sile rastu naprezanje i deformacija. Veza između naprezanja σ i deformacije ε u opštem slučaju je nelinearna:

$$\sigma = f(\varepsilon), \quad (18.5)$$

i zavisi od svojstva elastičnog tela, tzv. deformabilnosti. Relacija (18.5) određuje se eksperimentalno, tako što se ispituje rastezanje, sabijanje ili smicanje standardizovanih uzoraka. Ustanovljeno je da za sve vrste materijala postoji područje direktnе proporcionalnosti između naprezanja i deformacije, što je poznato kao Hukov zakon:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (18.6)$$

gde je E Jangov modul elastičnosti posmatranog materijala, [N/m²].

Normalne komponente naprezanja σ_1 , σ_2 i σ_3 u homogenom izotropnom materijalu moguće je odrediti merenjem deformacija ε_1 , ε_2 i ε_3 :

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)] / E \\ \varepsilon_2 &= [\sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3)] / E \\ \varepsilon_3 &= [\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)] / E, \end{aligned} \quad (18.7)$$

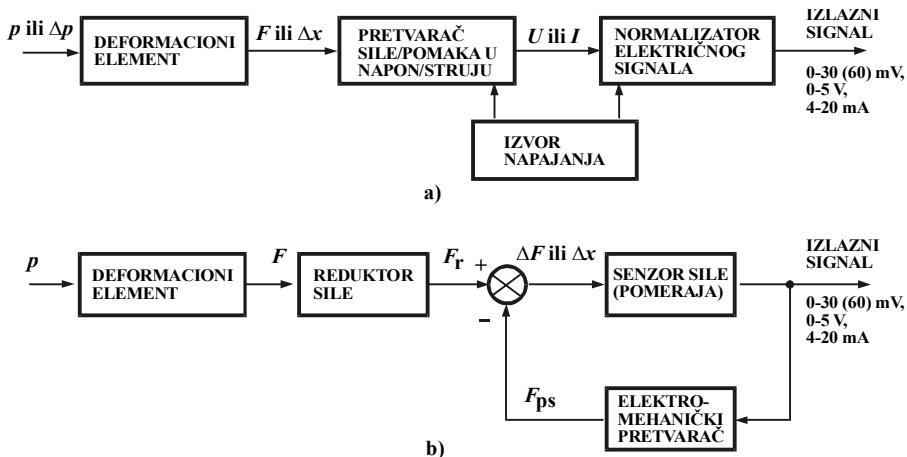
gde je μ Poasonov koeficijent, u kojem je uzet u obzir uticaj naprezanja duž dve ose na naprezanje duž treće. Istezanje duž jedne ose biće praćeno sabijanjem duž ostale dve ose, pa zato znak minus u jednačinama (18.7). Kao deformacioni elementi u senzorima se najviše primenjuju ravne ploče i membrane. Naprezanje je u tom slučaju ravansko, jer se naprezanje σ_3 može zanemariti. Na osnovu izmerenih deformacija ε_1 i ε_2 i poznate vrednosti modula elastičnosti E mogu se odrediti normalne komponente dvoosnog naprezanja kao rešenje jednačina (18.7):

$$\sigma_1 = \frac{E(\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2)}{1 - \mu^2} \quad \sigma_2 = \frac{E(\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1)}{1 - \mu^2}. \quad (18.8)$$

18.2. PRINCIPI GRADNJE SENZORA PRITISKA

Struktura. Senzori pritiska su direktnog ili kompenzacionog tipa (slika 18.2). Zajednički element u oba slučaja je primarni osetilni element koji pretvara pritisak p ili razliku pritiska Δp u silu F . To je elastični element, koji pod delovanjem sile F trpi deformaciju – pomak Δx .

Kod direktnih senzora sila ili pomak pretvaraju se u narednom bloku u električni izlazni signal: milivoltni, pojačani naponski ili strujni 4 – 20 mA. Senzori sa milivoltnim izlazom (tipično 0 – 30 mV) su malih dimenzija, kola za kondicioniranje signala su van senzora, a moguća je direktna primena gotovih uređaja namenjenih za obradu i očitanje signala sa senzora sile i naprezanja. Senzori sa pojačanim naponskim izlaznim signalom imaju ugraden instrumentacioni pojačavač koji daje



Slika 18.2. Struktura senzora pritiska: a) direktna, b) kompenzaciona

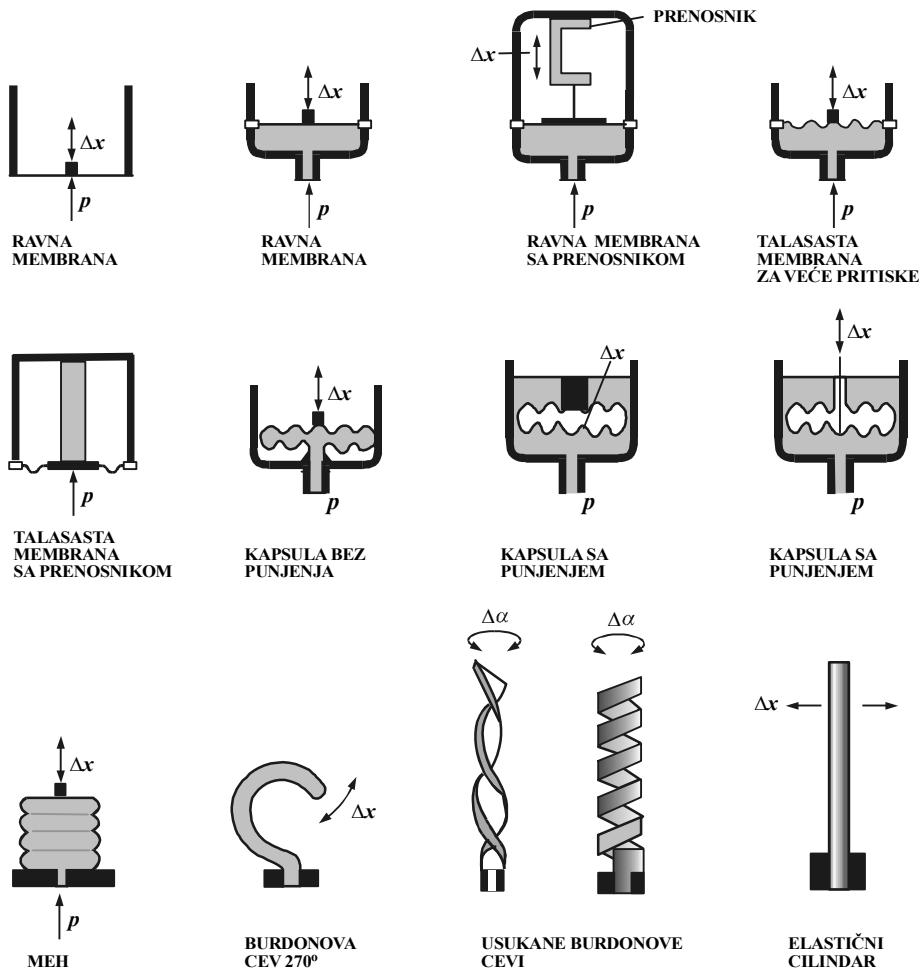
napon $0-5 \text{ V}$ kompatibilan sa upravljačkim i računarskim interfejsom. Senzori sa standarnim strujnim izlazom $4-20 \text{ mA}$ pogodni su za industrijske uslove, jer je takav signal imun na smetnje i omogućava prenos na daljinu bez degradacije.

Kompenzacioni senzori su složeniji, ali imaju bolju tačnost nego direktni. Deo strukture sa negativnom povratnom spregom koja stoji iza elastičnog elementa je kompenzacioni senzor sile. Ukoliko sila elastičnog elementa prevaziđa vrednosti sile koje se mogu ostvariti pretvaračem I/F u povratnoj spregi, tada je potreban mehanički reduktor sile. Reduktor sile je poluga, koja istovremeno služi i kao komparator. Rezultat komparacije redukovane sile F_r i sile povratne sprege F_{ps} je pomak poluge Δx i on se detektuje najčešće induktivnim senzorom pomeraja. Povratna sprega realizuje se kao elektromehanički konvertor.

Elastični element. Od njegove tačnosti zavisi tačnost celog uređaja. U praksi se najviše primenjuju membrane, cevi i mehovi. Membrane su pogodne za merenje pritiska od najnižih pa do najviših vrednosti, cevi se primenjuju za merenje relativnog natpritiska $0-1 \text{ bar}$ pa do $10\,000 \text{ bar}$, a mehovi za manje relativne pritiske. Njihovi mnogobrojni oblici, koji se susreću u praksi, nastali su zbog prilagođavanja opsegu i uslovima merenja pritiska (slika 18.3). Elastični elementi prave se od posebnih materijala kao što su berilijseva bronza (legura od bakra, tantal, titana i specijalnih čelika) i konstantan (legura bakra, nikla i mangana).

Najpoznatiji manometar (instrument za merenje pritiska) ima deformacioni element u obliku Burdonove cevi. To je posebno profilisana cev, savijena u luk, na jednom kraju zatvorena, a učvršćena na drugom. Posebnim kinematskim vezama pomeranje slobodnog kraja prenosi se u ugaoni pomak indikacione kazaljke ili se pomoću senzora pomeraja pretvara u električni signal. Tačnost statičke karakteristike pritisak-pomeraj vrha Burdonove cevi je $\pm 1-5\%$, a u najboljem slučaju do $\pm 0,6\%$.

Membrana kao deformacioni element u senzoru pritiska. Za ove namene primenjuju se kružne membrane učvršćene po celom obodu. Delovanjem pritiska p membrana se deformiše u kalotu. U nauci o čvrstoći (otpornosti materijala) izведен je izraz za progib membrane pod dejstvom pritiska p :



Slika 18.3. Tipični deformacioni elementi kod senzora pritiska

$$y(r) = \frac{3p}{16} \frac{1-\mu^2}{Eb^3} (R^2 - r^2)^2, \quad (18.9)$$

gde su: p pritisak [Pa], R poluprečnik membrane [mm], r rastojanje od centra membrane [mm], b debljina membrane [mm], μ Poasonov koeficijent kojim se uzima u obzir da prilikom pomeranja membrane u smeru y dolazi do njenog istezanja u smeru r , te E modul elastičnosti materijala od kojeg je napravljena membrana [Pa].

Najveći progib je u centru membrane ($r=0$), odnosno:

$$y_c = y(0) = \frac{3p}{16} \frac{1-\mu^2}{Eb^3} R^4 = kp. \quad (18.10)$$

U području linearnih deformacija membrane linearnost statičke karakteristike progib – pritisak može se ostvariti do $\pm 3\%$.

Analiza deformisane membrane pokazuje da naprezanje u svakoj tački ima radikalnu i tangencijalnu komponentu, koje su međusobno okomite i iznose:

$$\sigma_r(r) = \frac{3R^2\mu p}{8b^2} \left[1 + \frac{1}{\mu} - \left(1 + \frac{3}{\mu} \right) \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (18.11)$$

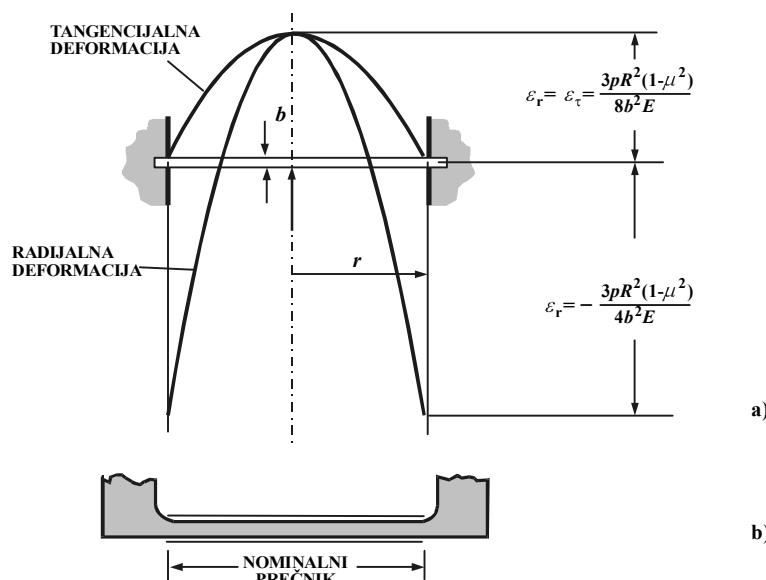
$$\sigma_\tau(r) = \frac{3R^2\mu p}{8b^2} \left[1 + \frac{1}{\mu} - \left(3 + \frac{1}{\mu} \right) \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]. \quad (18.12)$$

Uvrštavanjem ovih relacija u jednačine (18.7), za slučaj dvoosnog naprezanja dobijaju se radikalna i tangencijalna komponenta deformacije membrane u funkciji rastojanja r od centra:

$$\varepsilon_r(r) = \frac{3R^2p}{8b^2E} \left[1 - 3 \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] (1 - \mu^2) \quad (18.13)$$

$$\varepsilon_\tau(r) = \frac{3R^2p}{8b^2E} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] (1 - \mu^2). \quad (18.14)$$

Radikalna i tangencijalna deformacija koje se javljaju kao rezultat delovanja pritiska p na membranu prikazane su na slici 18.4. U centru membrane, $r=0$, deformacije su istog znaka i vrednosti:



Slika 18.4. Membrana za senzor pritiska: a) raspored radikalne i tangencijalne deformacije za učvršćenu membranu, b) ravna membrana sa smanjenim radikalnim naprezanjem

$$\varepsilon_r(0) = \varepsilon_t(0) = \frac{3R^2p}{8b^2E} (1 - \mu^2). \quad (18.15)$$

Na obodu je tangencijalna komponenta jednaka nuli, a radikalna ima dvostruko veću vrednost nego u centru i, osim toga, suprotnog je znaka:

$$\varepsilon_t(R) = 0 \quad \varepsilon_r(R) = -2\varepsilon_r(0). \quad (18.16)$$

Neželjeno radikalno naprezanje po obodu ravne membrane može se smanjiti tako što se membrana i ležište specijalnim postupkom prave iz jednog komada materijala (slika 18.4b).

Prirodna frekvencija membrane je parametar koji karakteriše njena dinamička svojstva. Za merenja promenljivog pritiska dovoljno je poznavati osnovnu prirodnu frekvenciju membrane, koja odgovara oscilacijama bez čvorova po kružnici i bez čvorova po prečniku:

$$\omega_r = \frac{2,95b}{R^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}. \quad (18.17)$$

gde je ρ gustina materijala od kojeg je napravljena membrana. Umesto prirodne kružne frekvencije ω_r [rad/s], u katalogima se obično navodi vrednost rezonantne frekvencije $f_r = \omega_r/2\pi$, čije su vrednosti 1–100 kHz.

18.3. TEHNIKA SENZORA PRITISKA

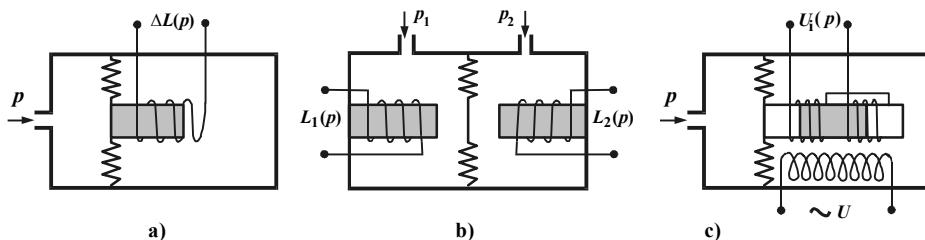
Većina električnih senzora ima primarni element u obliku membrane, meha ili Burdonove cevi. Od karakteristika primarnog elementa zavise merni opseg, prirodna frekvencija i osjetljivost senzora. Deformacija elemenata, koja nastaje usled delovanja pritiska (diferencijalnog pritiska), pretvara se dalje u električni izlazni signal. Na osnovu toga razlikuju se elektromagnetični, kapacitivni, otpornički, pijeoelektrični i optoelektronski senzori.

Dobre osobine savremenih senzora pritiska su njihove male dimenzije, brz odziv, visoka linearnost, mali histerezis, neosjetljivost na preopterećenje, mehaničke udare i vibracije, te primenljivost u širokom temperaturnom području.

18.3.1. Elektromagnetni senzori pritiska

Detekcija deformacije primarnog elementa ovih senzora ostvaruje se pomoću elektromagnetičnih senzora pomeraja. Najviše se primenjuje induktivni detektor sa relativnim pomerajem jezgra i jednim navojem (slika 18.5a). Promena induktivnosti pretvara se u električni signal pomoću mosne šeme ili pomoću oscilatora. Induktivni senzor diferencijalnog pritiska pravi se sa dva identična navoja, između kojih se pomera metalna membrana, čime se menja otpor magnetnog kola (slika 18.5b). Na slici 18.5c prikazana je varijanta sa linearnim varijabilnim diferencijalnim transformatorom LVDT.

Praktične poteškoće u primeni ovih senzora nastaju zbog otežane temperaturne kompenzacije. Zavisnost permeabilitea od temperature, naime, samo ponekad je moguće odstraniti adekvatnim izborom temperaturnih karakteristika materijala od kojih su napravljeni navoje i jezgro senzora. Bliskost magnetskih objekata i polja nepovoljno se odražava na rad senzora. Pored ovoga, loše osobine su: isključivo naizmenično napajanje sa frekvencijom 0,05–30 kHz, potreba da se mosna šema balansira otporničkim i induktivnim elementima, velike dimenzije, mali frekventni opseg (50–1000 Hz), te pojava grešaka zbog trenja između jezgra i vodica.



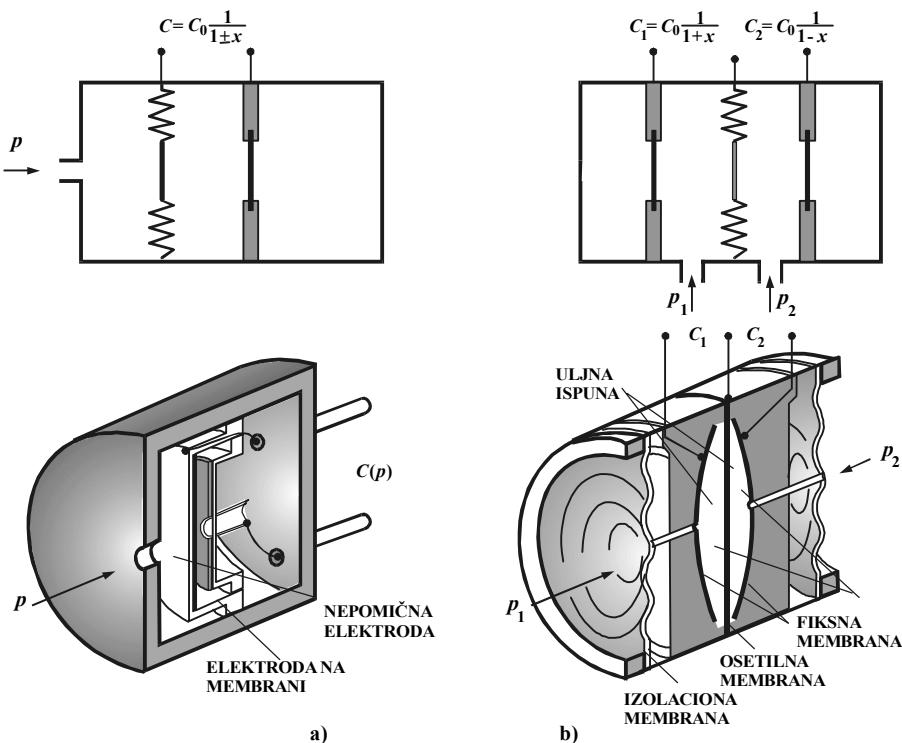
Slika 18.5. Elektromagnetični senzori pritiska: a) prosti induktivni, b) induktivni diferencijalni, c) LVDT-senzor pritiska

Dobre osobine su: mogućnost statičkih i dinamičkih merenja, visok odnos signal/šum, kontinualna rezolucija, visoka vrednost izlaza, izlazni signal amplitudno modulisan. Merni opseg je od 1000 Pa do 10^8 Pa, tipična tačnost $\pm 5\%$, histerezis $\pm 0,2\%$, dozvoljeno preopterećenje i do šest puta veće od maksimalne vrednosti.

18.3.2. Kapacitivni senzori pritiska

Suština rada ovih senzora je da se metalna membrana upotrebljava kao pokretna elektroda kondenzatora. Ovo su najbolji senzori za male opsege od 100 Pa, ali se mere i veliki pritisci do 10^8 Pa. Tačnost je $\pm 0,25\text{--}0,05\%$. Loše osobine kapacitivnih senzora pritiska su: kapacitet i pomeranje priključnih kablova utiču na izobličenje izlaznog signala, visoka izlazna impedansa mora se uravnotežiti aktivno i reaktivno, osetljivost na promenu temperature, potrebitno oklapanje spojnih kablova. Dobre osobine su: linearnost, stabilnost i ponovljivost, visoka frekventna propusnost, jednostavnost izrade, pristupačna cena, mogućnost merenja statičkih i dinamičkih promena, minimalna masa membrane, mala zapremina, te kontinualna rezolucija.

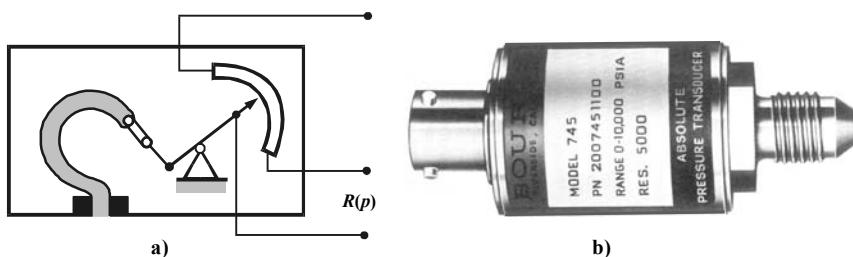
Na slici 18.6a prikazana je principijelna realizacija kapacitivnog senzora apsolutnog pritiska: sa jedne strane membrane je priključak za mereni pritisak, a sa druge strane je izolovana komora sa referentnim vakuuumom. Na slici 18.6b je senzor diferencijalnog pritiska koji ima po jedan priključak na svakoj strani membrane. Kod senzora relativnog pritiska jedan priključak je otvoren prema atmosferi. Promena kapaciteta u zavisnosti od pritiska najčešće se detektuje pomoću mosta koji daje amplitudno modulisani izlazni signal, što je razmatrano u poglavljiju o kapacitivnim senzorima. U tom slučaju neophodna je demodulacija da bi se dobio jednosmerni signal i obavila temperaturna kompenzacija, te podešavanje nule i pojačanja. Veća rezolucija merenja dobija se priključivanjem kapacitivnog senzora na oscilator RL ili LC, koji daje frekventno modulisan izlazni signal.



Slika 18.6. Principijelne i industrijske realizacije senzora pritiska: a) senzor apsolutnog pritiska, b) senzor diferencijalnog ili relativnog pritiska

18.3.3. Potenciometarski senzor pritiska

Deformacija elastičnog elementa može se detektovati pomoću potenciometra (slika 18.7a). Osnovne prednosti ovih senzora su: visoka vrednost izlaza (0-100% napona napajanja), za prenos na daljinu nije potrebno pojačavanje ili impedantno prilagodavanje izlaza, pristupačna cena, jednostavnost ugradnje, te mogućnost istosmernog i naizmeničnog napajanja. Loše osobine su: velike dimenzije, pojавa šuma zbog habanja, sila za pomeranje klizača potenciometra relativno velika zbog trenja i mala frekventna propusnost. Ovi senzori primenjuju se za opsege od 30 kPa do 3 MPa, pa sve do 100 MPa. Tipična tačnost je $\pm 1\%$ (u boljem slučaju do $\pm 0,25\%$), rezolucija $\pm 0,2\%$, histerezis $\pm 0,5\%$ i temperaturna greške $\pm 0,25\%$.



Slika 18.7. Potenciometarski senzor pritiska sa Burdonovom cevi: a) konstrukcija, b) izgled

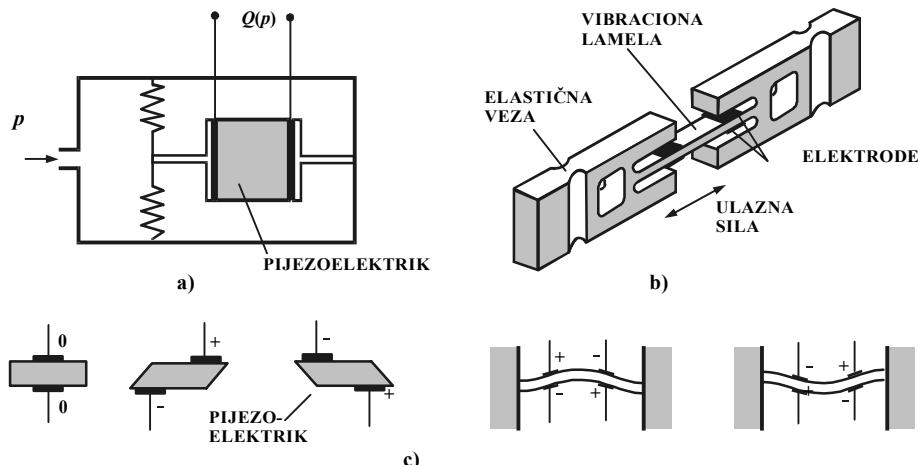
18.3.4. Pijezoelektrični senzori pritiska

Kod jednostavnijih pijezoelektričnih senzora pritiska sila preko deformacionog elementa deluje na pijezoelektrik, na kome se javlja električni naboј (slika 18.8a). Pomoću pojačavača naboјa dobija se izlazni signal, proporcionalan merenom pritisku. Složenije konstrukcije imaju pijezoelektrik u formi mehaničkog oscilatora, čija se rezonantna frekvencija menja u skladu sa merenom silom, odnosno pritiskom. Jedan od mogućih oblika rezonatora prikazan je na slici 18.8b. Bitan zahtev je da oscilirajuća gredica bude napravljena od jedinstvenog komada pijezoelektrika i da izolirajućom masom bude odvojena od kućišta. Pobudivanje gredice na oscilovanje s rezonantnom frekvencijom ostvaruje se pomoću posebnog oscilatora. Odziv gredice na ovu pobudu prikazan je na slici 18.8c. Istezanjem gredice povećava se rezonantna frekvencija, a sabijanjem se smanjuje. Mereni pritisak i frekvenciju oscilovanja povezuju relacija

$$p = A \left(1 - \frac{f}{f_0}\right) - B \left(1 - \frac{f}{f_0}\right)^2, \quad (18.18)$$

gde su f_0 rezonantna frekvencija pri $p=0$, f rezonantna frekvencija pri merenom pritisku p , te A i B kalibracione konstante, koje zavise od geometrije i vrste pijezoelektrika.

Loše osobine pijezoelektričnih senzora pritiska su: visoka temperaturna osjetljivost, uticaj dužine kablova na izlaz, osjetljivost na poprečne oscilacije, visoka izlazna impedansa i nemogućnost statičkih merenja. Dobre osobine su: male dimenzije, kompaktnost i visokofrekventna propusnost sa zanemarljivim faznim pomakom.



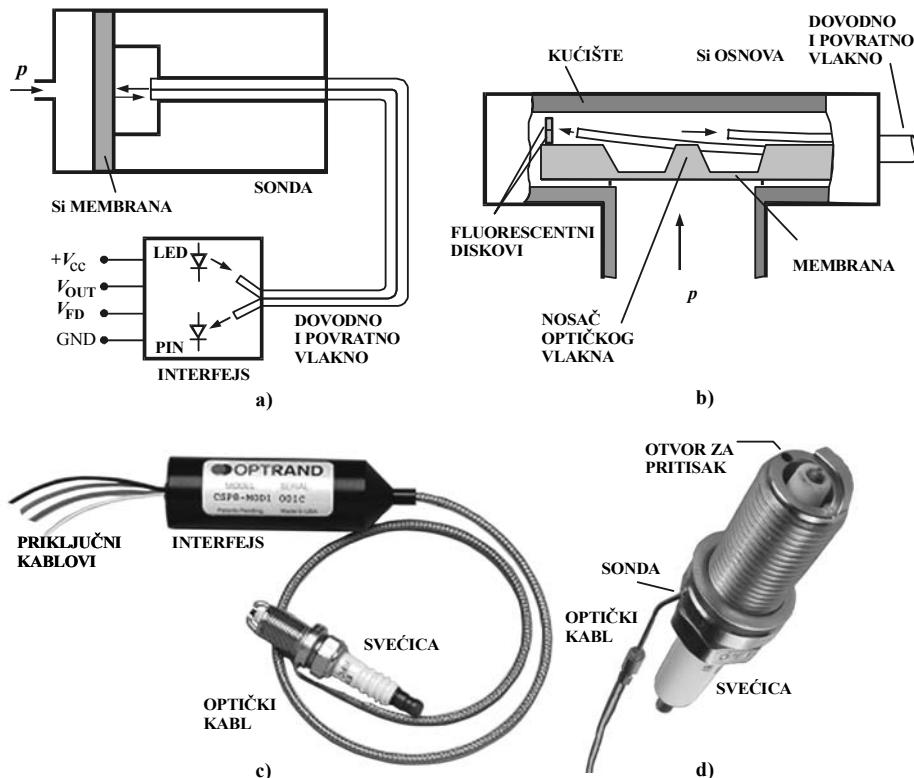
Slika 18.8. Pijezoelektrični senzor pritiska: a) standardna izvedba, b) pijezoelektrik kao rezonator, c) odziv pijezoelektrične gredice na pritisak

18.3.5. Optoelektronski senzori pritiska

Deformacijom elastičnog elementa moduliše se intenzitet svetla koje pada na fotoprijemnik. Najčešće je IRLED-dioda izvor svetlosti a PIN fotodioda ili fotopotenciometar prijemnik. Osnovne prednosti ovih senzora su jednostavnost, visok izlaz, te mogućnost statičkih i dinamičkih merenja. Nedostaci su: ograničen

temperaturni opseg, nestabilnost statičke karakteristike sa starenjem, mogućnost praćenja samo velikih deformacija i mala frekventna propusnost.

Značajna poboljšanja dobijaju se u kombinaciji sa optičkim vlaknima. Nagrizanjem silicijumskog vafera pomoću kalijumove baze može se dobiti membrana debljine do $10 \mu\text{m}$ i prečnika manjeg od 1 mm , a progib membrane prati se senzorom pomeraja na bazi optičkog vlakna (slika 18.9a). Na ovom principu napravljen je veliki broj senzora pritiska izvanrednih karakteristika: rad na temperaturi do 400°C , neosetljivost na EMI smetnje i uticaj korozije, primenljivost u eksplozivnim prostorima, male dimenzije (vanski prečnik do 1 mm), merno područje od $0 - 7 \text{ bar}$ do $0 - 200 \text{ bar}$, linearnost $\pm 0,25\%$, frekventno područje od $0,01 \text{ Hz}$ do 30 kHz . Na slici 18.9c i 18.9d prikazana je konstrukcija takvog senzora namenjenog za merenje pritiska u SUS motorima i način njegovog priključivanja na svećicu.



Slika 18.9. Fiberoptički senzor: a) sa detektorom pomeraja, b) sa slabljenjem fluorescencije
c) senzor za praćenje pulsacija pritiska u SUS motoru, d) senzor na svećici

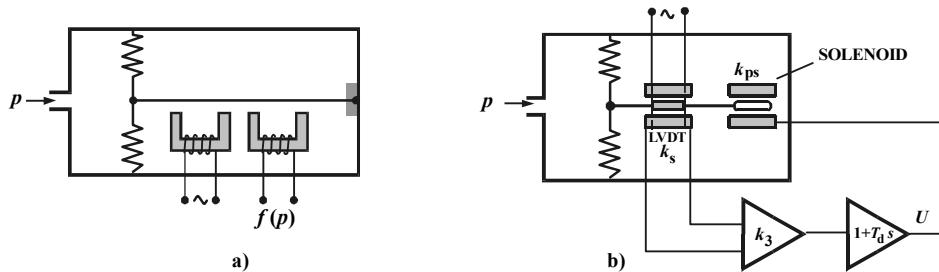
Optoelektronski senzori pritiska zbog elegantne mikromehanike i jednostavnih elektronskih kola za priključivanje sa mikroprocesorom imaju veliku perspektivu. Kombinacijom ovih osobina sa prednostima koje imaju optička vlakna dobijaju se atraktivni minijaturni senzori sa izvanrednim osobinama. Odličan senzor napravljen je sa multimodnim optičkim vlaknom za merenje slabljenja fluorescencije u staklu dopiranom neodijumom (slika 18.9b). Dovodnim optičkim vlaknom pobuduje se fluorescencija čija se amplituda menja pomeranjem specijalno profilisane silicijumske

membrane, na koju je naslonjeno dovodno optičko vlakno. Modulacija fluorescencije detektuje se povratnim optičkim vlaknom. Dobre osobine ovih senzora su visoka tačnost i pouzdanost, te mali histerezis.

18.3.6. Senzori sa strunom

Senzori sa strunom imaju zategnutu volframovu žicu koja je jednim krajem pričvršćena za deformacioni element, a drugim krajem za kućište. Senzor se pravi tako da porast pritiska dovodi do smanjenja zategnutosti žice, odnosno do smanjenja rezonantne frekvencije oscilovanja žice, kao što se vidi iz jednačine (15.18). Na slici 18.10a prikazana je konstrukcija sa elektromagnetom za pobudivanje oscilacija i elektrodinamičkim indupcionim senzorom za detekciju oscilacija. Kao rezonatni element ponekad se koristi šuplji tankostijeni cilindar ili oscilirajuća membrana.

Loše osobine struna-senzora su nestabilnost i osetljivost na mehaničke udare, vibraciju i temperaturu, te relativno velika nelinearnost i histerezis. Visokofrekventno modulisani izlaz senzora može se prenositi na velike udaljenosti bez gubitaka, pa se zato može upotrebiti prijemni instrument sa velikom tačnošću.



Slika 18.10. Klasični senzori pritiska: a) sa strunom (oscilujućom žicom), b) LVD-senzor pritiska sa povratnom spregom

18.3.7. Senzori sa kompenzacijom sile

Kompenzacioni senzori proizvode silu povratne sprege, kojom vraćaju deformacioni element u položaj koji je zauzimao pre nego što je počela da deluje merena sila (pritisak). Za vraćanje senzora u početni položaj služi servomotor, smešten u povratnoj sprezi. Servomotor je solenoidni aktuator ili elektromehanički pretvarač. Ovakvi senzori pritiska ponekad se nazivaju servomanometri. Tipična izvedba sastoji se od deformacionog elementa na koji je pričvršćena metalna šipka (slika 18.10b). Pomeranje šipke detektuje se LVDT-senzorom. Kada je pritisak jednak zadatom, izlazni signal podesi se na nulu. Sa porastom pritiska, napon LVDT-senzora raste. Njegovim pojačanjem dobija se izlazni signal. Izlaz je istovremeno i signal povratne sprege koji se vodi na solenoid. Pobudivanjem namotaja solenoida naposkim signalom sa izlaza senzora, magnetno polje koje se stvara unutar namotaja proporcionalno povlači jezgro postavljeno na šipci. Solenoid proizvodi silu \$F_{ps}=k_{ps}U\$, koja skoro u potpunosti kompenzira delovanje pritiska. U toku prelaznog procesa ulaznu silu \$F_{ul}\$ uravnovežuju sila povratne sprege \$F_{ps}\$ i sila inercije \$F_{in}\$ pokretnih delova senzora mase \$m\$:

$$P(s)S = [ms^2 + k_a k_s k_{ps} (1 + T_d s)] X(s) . \quad (18.19)$$

Pomeraj i napona su vezni: \$U(s) = k_a k_s (1 + \tau_d s)\$, pa je prenosna funkcija:

$$U(s) = \frac{S k_a k_s (1 + T_d s)}{ms^2 + k_a k_s k_{ps} (1 + T_d s)} P(s), \quad (18.20)$$

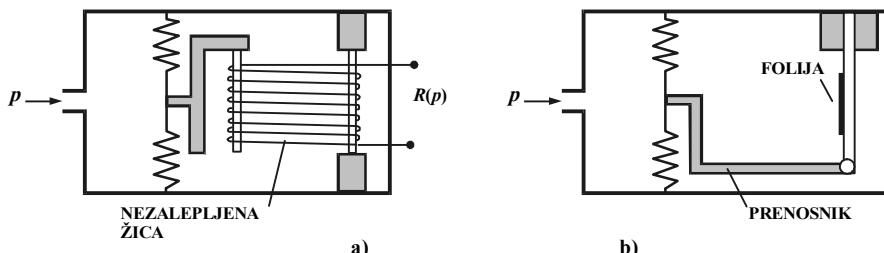
gde su: k_a koeficijent pojačanja pojačavača [V/V], k_{ps} koeficijent pojačanja solenoida [N/V], k_s koeficijent prenosa LVDT-senzora [V/m], $(1 + T_d s)$ kompleksni koeficijent pojačanja [V/V] diferencijatora, koji svojim faznim prednjačenjem omogućava senzoru potrebnu dinamiku, S površina membrane [m^2], te x pomeraj šipke [m].

Iz prenosne funkcije (18.25) senzora pritiska sa negativnom povratnom spregom vidi se da je koeficijent statičkog prenosa jednak S/k_{ps} . Tačnost statičkog prenosa S/k_{ps} je velika jer su površina membrane S i koeficijent prenosa servomotora k_{ps} praktično invarijantni u odnosu na vanjske uticaje, posebno temperaturu. Pored dobre stabilnosti, prednosti ovih senzora su: visok izlazni signal, velika tačnost, visoka rezolucija, te mogućnost merenja statičkih i dinamičkih pritisaka. Nedostaci su velika osetljivost na ubrzanje i mehaničke udare, složenost izrade i veća cena. Senzori pritiska kompenzacionog tipa sve manje se proizvode jer je njihova visoka tačnost dostignuta i premašena znatno jednostavnijim senzorima direktnog tipa.

18.4. TENZOMETARSKI SENZORI PRITISKA

18.4.1. Tenzoelement

Tehnologija. Tenzoelement (tenzometar, tenzootpornik, rastezna traka, merna traka, strain gage) je pasivni otpornički senzor mehaničke deformacije. Njegov rad se zasniva na činjenici da se otpor električnog provodnika menja kada je taj provodnik izložen elastičnoj deformaciji. Efekat je otkrio Tomson (Lord Kelvin) 1856, a u praktične svrhe prvi su ga primenili Ruge i Simens. Tenzoelement je prvenstveno namenjen merenju površinskih deformacija, kao i posrednom merenju drugih veličina koje mogu izazvati deformaciju. Tako se tenzocimenti primenjuju u gradnji senzora: pritiska, sile, momenta, ubrzanja, vibracije, nivoa i dr.



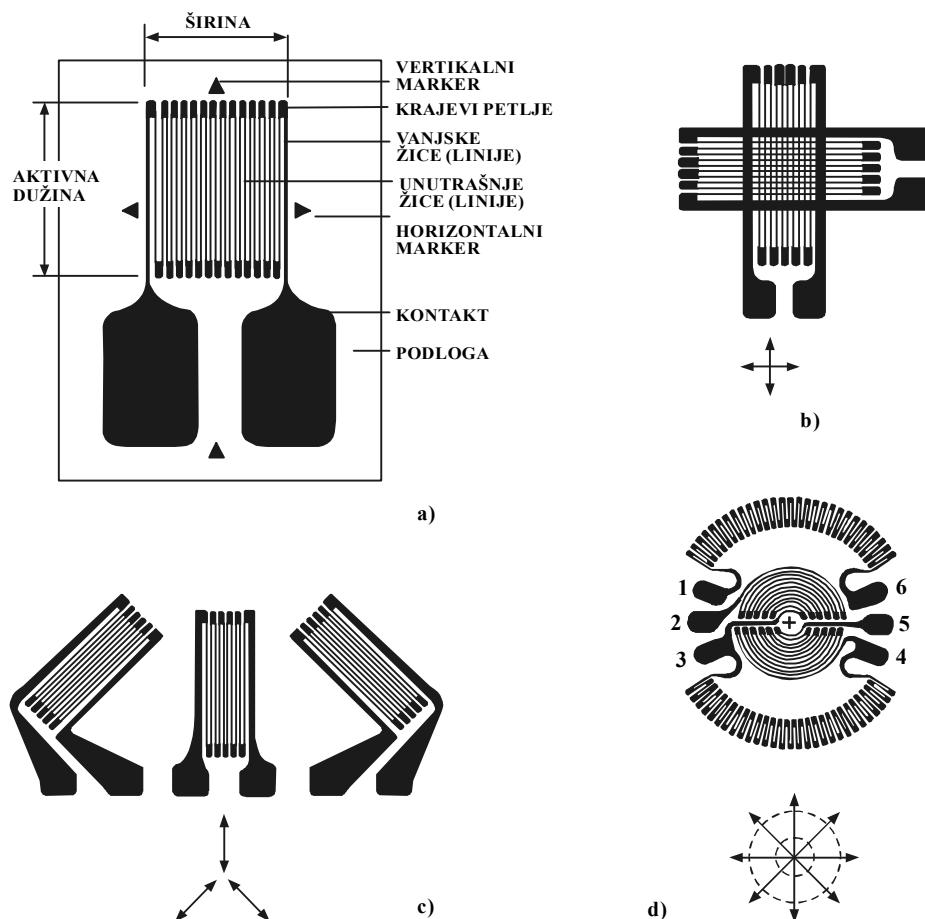
Slika 18.11. Senzor pritiska: a) senzor pritiska sa slobodnom žicom,
b) senzor sa lepljenom trakom/folijom

Prema načinu izrade, razlikuju se četiri tipa tenzoelementa:

- 1) Slobodna ili nezalepljena žica (*unbonded wire*) koja je upeta na krajevima na odgovarajućem skeletu. Za izradu se uzima žica od konstantana debljine 0,025–0,02 mm i dužine 2–4 cm. Sa pomeranjem pomičnog dela

skeleta dolazi do istezanja ili sabijanja žice (slika 18.11a). Proporcionalno nastaloj deformaciji menja se otpor žice, što se može detektovati odgovarajućim Vitstonovim mostom.

- 2) Metalni ili poluprovodnički meandar u obliku folije, koja je čitavom dužinom zapepljena na deformacionu površinu (*bonded wire/foil*). Ovaj tip tenzoelementa najviše je zastupljen u tehnici senzora (slika 18.11b).
- 3) Tankoslojni metalni otpornik (*thin film*) trajno deponovan na deformacionoj površini.
- 4) Poluprovodnički otpornik unesen difuzionim postupkom u deformacioni element od silicijuma. Takav tenzoelement naziva se pijezorezistivni senzor.



Slika 18.12. Tipični oblici folijskog tenzoelementa sa naznakom pravca u kojem je osetljiv na deformaciju: a) linearna folija, b) folija za uzdužno-poprečnu deformaciju, c) folija sa tri elementa, d) membranska folija - rozeta

Tenzoelementi u obliku folije u tehnici senzora najviše se primenjuju. Oblici otporničkog meandra prilagođeni su pravcima u kojima se meri deformacija (slika 18.12). Žica od koje se pravi otpornik ima debljinu 0,003–0,01 mm, veliki specifični otpor i mali temperaturni koeficijent otpora. Na tržištu su prisutni tenzoelementi sa nominalnim otporom 120, 300, 350, 600 i 1 000 Ω . Veći otpor poželjan je da bi se smanjio uticaj otpora priključnih vodova na tačnost merenja.

Otpornički materijal nanesen je na traku od plastičnog materijala koja se lepi na mesto merenja deformacije. Tri faktora su bitna za tačnost merenja:

- priprema deformacione površine za lepljenje folije (mehaničko čišćenje, odstranjivanje nečistoće, hrapavljenje u zavisnosti od veličine deformacije, hemijska neutralizacija kako bi se sprečio uticaj na hemijski sastav lepila)
- izbor lepila (leplilo treba da ima mehaničke i termičke osobine što sličnije materijalu čija se deformacija meri, jer samo takvo leplilo prenosi deformaciju sa merne površine na foliju bez smanjivanja, tj. puzanja)
- kvalitet podloge (materijal podloge treba da ispunjava iste zahteve u pogledu mehaničkih osobina kao i leplilo, te da je dobar izolator).

18.4.2. Principi rada tenzoelementa

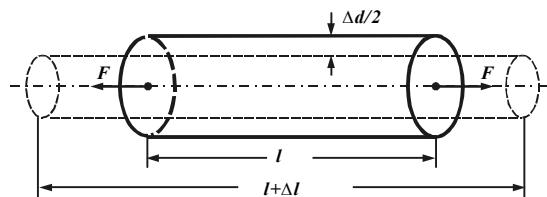
Promena otpornosti. Osnovne karakteristike tenzootporničkih senzora mogu se izvesti proučavanjem žičanog otpornika dužine l i prečnika d (slika 18.13). U nенapregnutom stanju vrednost otpora računa se prema poznatoj formuli:

$$R = \rho l / S, \quad (18.21)$$

gde je ρ specifična otpornost materijala od kojeg je napravljen otpornik [$\Omega \cdot \text{m}$]. U opštem slučaju, sve veličine u jednačini (18.21) zavise od naprezanja, odnosno $R = R(\sigma)$, $l = l(\sigma)$, $\rho = \rho(\sigma)$, i $S = S(\sigma)$. Ukupna promena otpora usled sabijanja ili istezanja otpornika može se izračunati diferenciranjem (18.21) po σ :

$$\begin{aligned} \frac{dR}{d\sigma} &= \frac{\partial R}{\partial l} \cdot \frac{dl}{d\sigma} + \frac{\partial R}{\partial S} \cdot \frac{dS}{d\sigma} + \frac{\partial R}{\partial \rho} \cdot \frac{d\rho}{d\sigma} = \\ &= \frac{\rho}{S} \cdot \frac{dl}{d\sigma} - \frac{\rho l}{S^2} \cdot \frac{dS}{d\sigma} + \frac{l}{S} \cdot \frac{d\rho}{d\sigma}. \end{aligned} \quad (18.22)$$

Deleći ovu jednačinu sa R i zamenjujući diferencijale odgovarajućim prirastima, dobija se da je relativna promena otpora:



Slika 18.13. Žičani otpornik pod delovanjem sile istezanja

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho}, \quad (18.23)$$

zavisna od: a) relativne promene dužine žice $\Delta l/l$, b) relativne promene površine poprečnog preseka žice $\Delta S/S$ i c) relativne promene specifičnog otpora žice $\Delta \rho/\rho$.

Relativna promena površine poprečnog preseka žice $\Delta S/S$ može se izraziti pomoću odgovarajuće promene prečnika:

$$\Delta S/S = 2 \Delta d/d. \quad (18.24)$$

Uzdužna (aksijalna) deformacija $\varepsilon = \Delta l/l$ praćena je istovremeno poprečnom (transverzalnom) deformacijom $\tau = \Delta d/d$, pri čemu izduženju žice odgovara smanjenje prečnika i obrnuto – sabijanju žice odgovara povećanje njenog prečnika, odnosno:

$$\tau = -\mu \varepsilon \quad \text{ili} \quad \Delta d/d = -\mu \Delta l/l. \quad (18.25)$$

gde je μ Poasonov koeficijent.

Kombinujući jednačine (18.23)–(18.25), za posmatrani cilindrični otpornik relativna promena otpora zbog delujućeg naprezanja je:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} \left(1 + 2\mu + \frac{\Delta \rho/\rho}{\Delta l/l} \right) = \frac{\Delta l}{l} K, \quad (18.26)$$

odakle je ukupna promena otpora:

$$\Delta R = K \varepsilon R. \quad (18.27)$$

Iako je deformacija $\varepsilon = \Delta l/l$ bezdimenzionalna, u tenzometrijskoj tehnici ona se izražava jedinicom m/m, koja se naziva strain (strelj). Budući da su realne deformacije male, u upotrebi su njeni dekadni multipli (izvan sistema SI) milistrain=mm/m i mikrostrain= μ m/m.

Faktor osjetljivosti. Konstanta proporcionalnosti K je ukupna deformaciona osjetljivost tenzoclementa na deformaciju ili faktor osjetljivosti (*gage factor*). To je bezdimenzionalna veličina jer predstavlja odnos relativne promene otpora i relativne deformacije: $K = (\Delta R/R)/(\Delta l/l)$. Izraz za osjetljivost K sastoji se od dva dela. Prvi deo, $1 + 2\mu$ predstavlja promenu geometrije žice. U opštem slučaju, Poasonov koeficijent μ je pozitivan i ima vrednost u intervalu $0 < \mu < 0,5$. Za metale je $0,24 < \mu < 0,4$, a najčešće je $\mu \approx 0,3$. Drugi deo, $(\Delta \rho/\rho)/(\Delta l/l)$, predstavlja promenu otpora zbog deformacije unutrašnje strukture materijala pod delovanjem vanjskog opterećenja i opisuje se pijezoelektrootpornim efektom. Sam izraz $(\Delta \rho/\rho)/(\Delta l/l)$ naziva se koeficijent pijezorezistencije i označava se sa m . Kod poluprovodnika je promena specifičnog otpora izraženija od promene geometrije, pa je $m \gg (1 + 2\mu)$. Tako se dobija da je osjetljivost:

$$K = 1 + 2\mu + m. \quad (18.28)$$

U tabeli 18.1 dati su osnovni podaci za najčešće upotrebljavane materijale u proizvodnji tenzotpornika. Tabela uključuje četiri vrste materijala: čist metal (platina), legure (konstantan, nikl-hrom), provodni fluid (živa) i poluprovodnik (silicijum).

KARAKTERISTIKA	TEMERATURNI KOEFICIJENTI OTPORA	TEMERATURNI KOEFICIJENT EKSPANZIJE	MODUL ELASTIČNOSTI	KOEFICIJENT OSETLJIVOSTI FOLIJE	MAKSIMALNA DEFORMACIJA FOLIJE	PROMENA OTPORA FOLIJE
MATERIJAL	α_R $10^{-3}/^{\circ}\text{C}$	α_{ER} $10^{-6} \text{m/m } ^{\circ}\text{C}$	E 10^{10} Pa	K	$\Delta l / l$	$\Delta R / R$
PLATINA	3, 8	9	15	6	0, 0023	0, 014
KONSTANTAN	(-0, 2)–(+0, 2)	14, 8	17	2, 05	0, 0024	0, 005
NIKL-HROM	0, 4	13, 2	19	2, 5	0, 0036	0, 009
ŽIVA	0, 9	30		2		
SILICIJUM	7	5, 4	19	170	0, 0033	0, 5

Tabela 18.1. Karakteristike tipičnih materijala od kojih se prave tenzoelementi

18.4.3. Drift nule i drift osetljivosti

Kompenzacija temperaturnog drifta nule. Prethodna razmatranja izvedena su pod pretpostavkom da je promena otpora tenzoelementa proporcionalna merenom naprezanju i da sve druge veličine nemaju uticaja na tu promenu. U realnim merenjima naročito je jak uticaj temperature, pa se u tenzoelementu javljaju dodatne deformacije. Pod uticajem temperature menja se otpor i dolazi do ekspanzije tenzoelementa. U slučaju promene otpora temperaturna greška manifestuje se kao drift nule, a ekspanzija tenzoelementa manifestuje se kao drift osetljivosti.

Na normalnoj temperaturi za napregnuti tenzoelement je $\Delta R/R = K\varepsilon R$, a ako se temperatura promeni za ΔT , za isti tenzoelement biće $\Delta R \approx K\varepsilon R(1 + \alpha_R \Delta T)$. Vrednost $RK\varepsilon\alpha_R \Delta T$ je temperaturni drift nule, koji je moguće kompenzovati serijskim ili paralelnim priključivanjem temperaturno osetljivog otpornika R_k . Uslov kompenzacije kod serijskog priključivanja prikazuje jednačina:

$$RK\varepsilon\alpha_R \Delta T + R_k K\varepsilon\alpha_{R_k} \Delta T = 0, \quad (18.29)$$

odakle proizilazi da kompenzacioni otpornik treba odabratи tako da je njegova nominalna vrednost na referentnoj temperaturi:

$$R_k = -\alpha_R R / \alpha_{R_k}. \quad (18.30)$$

Temperaturni koeficijent serijski priključenog kompenzacionog otpornika, treba da je negativan. Ukupni otpor temperaturno invarijantnog tenzoelementa tada je:

$$R + R_k = R(1 - \alpha_R / \alpha_{R_k}). \quad (18.31)$$

Ukoliko se kompenzacija temperaturnog drifta nule realizuje paralelnim priključivanjem, tada se na sličan način kao u prethodnom slučaju može izvesti da je provodnost kompenzirajućeg otpornika:

$$G_k = -\alpha_R G / \alpha_{R_k} , \quad (18.32)$$

a ukupna provodnost temperaturno invarijantnog tenzoelementa:

$$G + G_k = G(1 - \alpha_R / \alpha_{R_k}) . \quad (18.33)$$

Temperaturna kompenzacija drifta osetljivosti. Pri istovremenom delovanju naprezanja i temperature koeficijent osetljivosti K nije konstantan. Tada je promena otpora nelinearna:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{T_{ref}}{T} a\varepsilon + \left(\frac{T_{ref}}{T} \right)^2 b\varepsilon + \dots , \quad (18.34)$$

gde su a i b konstante, a T_{ref}/T odnos referentne i aktuelne vrednosti temperature. Osetljivost K koju deklariše proizvodač moguće je dobiti samo polazeći od stanja koje odgovara nultom naprezanju $\varepsilon = 0$ na referentnoj temperaturi T_{ref} . Temperaturni drift osetljivosti posebno je prisutan kod poluprovodničkih tenzoelemenata. Na primer, kod silicijumskog senzora p -tipa K se menja u intervalu 110–180, a kod n -tipa u intervalu od –90 do –140.

Tenzoelement i podloga na koju je zapepljen nejednak se deformišu zbog temperature. Na osnovu razlike između koeficijenta linearne ekspanzije materijala tenzoelementa α_{ER} i koeficijenta linearne ekspanzije materijala podloge α_{EP} , može se izračunati efektivna deformacija tenzoelementa usled temperature:

$$\Delta l/l = \Delta T(\alpha_{EP} - \alpha_{ER}) . \quad (18.35)$$

Ova deformacija rezultuje relativnom promenom otpora tenzoelementa:

$$\Delta R/R = K\Delta l/l = K\Delta T(\alpha_{EP} - \alpha_{ER}) . \quad (18.36)$$

Ukupna promena otpora zbog delovanja temperature je suma termootpornog i termoeckspanzionog efekta:

$$\begin{aligned} \Delta R/R &= \Delta T\alpha_R + K\Delta T(\alpha_{EP} - \alpha_{ER}) = \\ &= \Delta T[K(\alpha_{EP} - \alpha_{ER}) + \alpha_R] , \end{aligned} \quad (18.37)$$

gde K ima nominalnu vrednost, tj. $K = K(T_{ref})$. Temperaturna kompenzacija drifta osetljivosti biće ostvarena ako je izraz u uglatoj zagradi jednak nuli, odnosno ako je temperaturni koeficijent otpora tenzoelementa:

$$\alpha_R = K(\alpha_{ER} - \alpha_{EP}) . \quad (18.38)$$

Tenzoelementi koji ispunjavaju uslov (18.38) imaju svojstvo samokompenzacije. Na tržištu postoje takvi tenzoelementi, namenjeni za lepljenje na podlogu

od materijala koji se najčešće primenjuju u praksi. Samokompenzacija se ostvaruje u širokom temperaturnom opsegu od (-20°C do $+200^{\circ}\text{C}$). Na kraju, treba istaći da zbog toga što temperaturni koeficijenti otpora i ekspanzije nelinearno zavise od temperature, ostaje izvesna temperaturna greška $\pm(0,5\text{ - }2)10^{-6}(\text{m/m})/\text{ }^{\circ}\text{C}$.

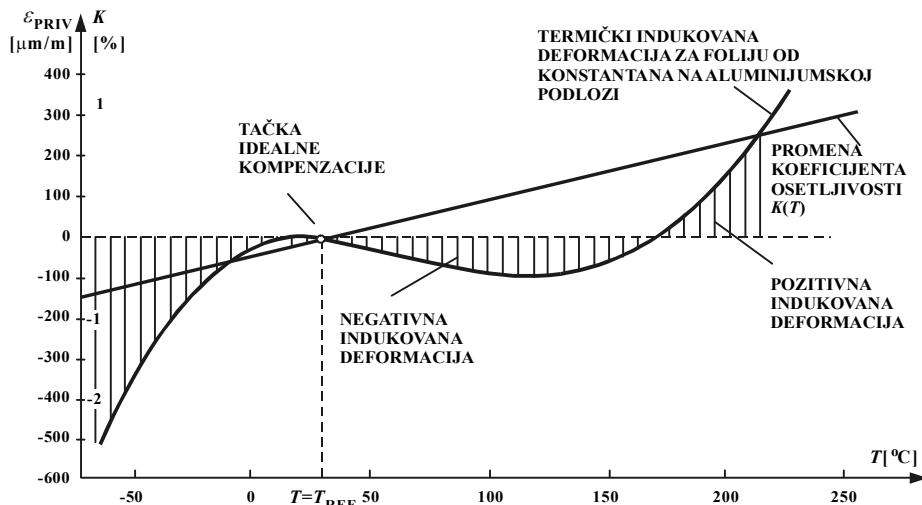
Idealna samokompenzacija moguća je samo na referentnoj temperaturi. Temperaturna greška zbog nepotpune kompenzacije na drugim vrednostima temperature izražava se kao ekvivalentna deformacija, koja se naziva prividna deformacija:

$$\Delta R/R = K\varepsilon_{\text{priv}}. \quad (18.39)$$

Ukupna promena otpora $\Delta R/R$ na radnoj temperaturi $T \neq T_{\text{ref}}$ određena je jednačinom (18.35), tako da se $\varepsilon_{\text{priv}}$ može izračunati na sledeći način:

$$\varepsilon_{\text{priv}} = \Delta T(\alpha_{\text{EP}} - \alpha_{\text{ER}} + \alpha_R/K). \quad (18.40)$$

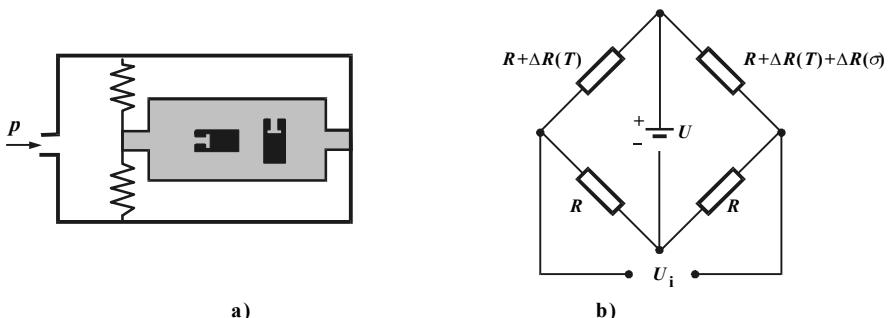
Proizvođači tenzometara uz svako pakovanje daju dijagram na osnovu kojeg se može odrediti vrednost prividne deformacije i korigovati tačnost merenja. Na dijagramu je uvek jasno istaknuto od kojeg materijala treba da je podloga na kojoj se lepi deklarirani tenzometar (slika 18.14).



Slika 18.14. Tipični dijagram deformacije

Tehnika temperaturne kompenzacije pomoću pasivnog tenzoelementa. Promena otpora tenzoelementa detektuje se Vitstonovim mostom, koji se može efikasno aranžirati i za temperaturnu kompenzaciju. U jednoj grani mosta je merni (aktivni) tenzoelement i na njega deluju naprezanja i temperatura. U susednoj grani mosta je kompenzacioni (pasivni, slepi) tenzoelement, koji treba da ispunjava sledeća tri uslova:

- da je istih karakteristika kao i merni tenzoelement, tj. da je iz istog pakovanja;

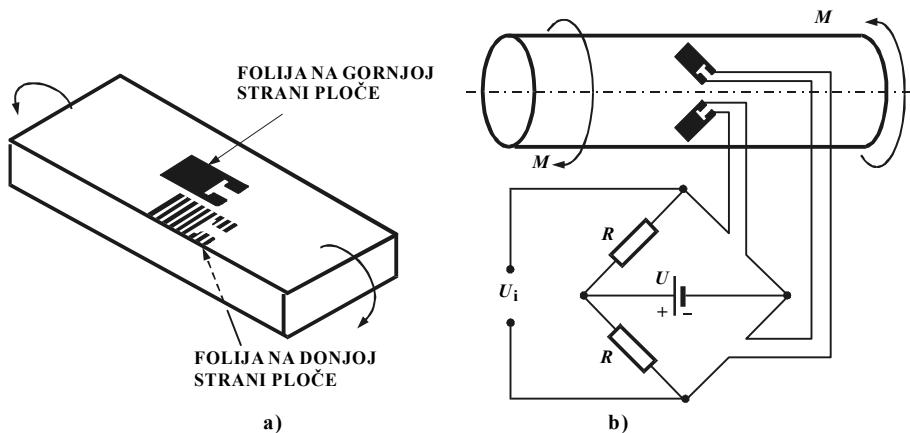


Slika 18.15. Temperaturna kompenzacija pomoću pasivnog tenzoelementa: a) tehniku kompenzacije, b) šema spajanja mernog mosta

- da je zlepšen na podlogu od istog materijala od kojeg je napravljen deformacioni element;
- da je zlepšen na mestu bez naprezanja, ali na kome je ista temperatura kao i na deformacionom elementu.

Ove uslove je relativno lako ispuniti. Najjednostavnije je kompenzacioni tenzoelement zlepiti okomito na pravac merenog naprezanja (slika 18.15a). U tom slučaju kompenzacioni tenzoelement je neosetljiv na mereno naprezanje i reaguje samo na temperaturne promene, što je u skladu sa eliminacijom aditivne smetnje metodom strukturne redundanse. Merni i kompenzacioni tenzoelement su jednakih karakteristika i priključeni su susednim granama mosta (slika 18.15b), pa se temperaturna promena otpora neće odraziti na balansiranje mosta. Izlaz je direktno srazmeran jedino naprezanju:

$$U_i = \frac{R}{R + [R + \Delta R(T)]} U - \frac{R}{R + [R + \Delta R(\sigma) + \Delta R(T)]} U \approx \frac{\Delta R(\sigma)}{R} \cdot \frac{U}{4}. \quad (18.41)$$



Slika 18.16. Tehnika kompenzacije sa aktivnim tenzoelementima

Opisana tehnika kompenzacije pojednostavljuje se kada je i dodatni tenzoelement aktivan. U praktičnim merenjima često je moguće odrediti dve bliske tačke na deformacionom elementu, dakle, na istoj temperaturi, za koje je odnos naprezanja a priori poznat. Posebno su pogodne tačke sa istim naprezanjem po iznosu, a suprotnim po predznaku (slika 18.16). Sa aktivnim tenzoelementima u susednim granama izlaz mosta ne zavisi od temperature u mernim tačkama.

18.4.4. Merni mostovi sa tenzoelementima

Merni most sa tenzoelementima. Za detekciju tenzootpora upotrebljava se nebalansirani Vitstonov most. Izlazni napon mosta proporcionalan je merenoj deformaciji. Tri su osnovne konfiguracije Vitstonovog mosta sa tenzootpornicima: četvrtinski most, polumost i puni most.

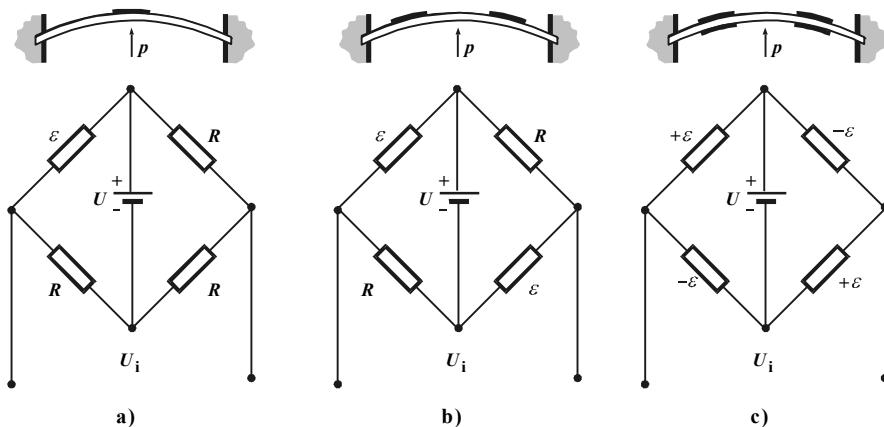
Četvrtinski most ima tenzoelement samo u jednoj grani mosta (slika 18.17a). Ovaj aranžman primenjuje se kod jednoosnog istezanja ili sabijanja. U nenapregnutom stanju izlaz mosta jednak je nuli. Kada dođe do istezanja ili sabijanja, tenzootpornik imaće otpor $R + \Delta R$, dok će ostali otpori ostati nepromenjeni. Izlazni napon tada će biti:

$$U_i = \left(\frac{1}{2} - \frac{R}{2R + \Delta R} \right) U = \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} U. \quad (18.42)$$

Kako je ranije pokazano, $\Delta R = K\varepsilon R$, pa prethodna jednačina za izlazni napon četvrtinskog mosta postaje:

$$U_i = \frac{K\varepsilon}{4 + 2K\varepsilon} U. \quad (18.43)$$

Uočava se da je izlazni napon nelinearan sa naprezanjem. Za male promene je $2\Delta R \ll 4R$ i izlaz je približno linearan: $U_i = \Delta R \cdot U / 4R = K\varepsilon U / 4$.



Slika 18.17. Tipični merni mostovi sa tenzoelementima: a) četvrtinski most, b) polumost, c) puni most

Polumost se može formirati na više načina, a jedan je prikazan na slici 18.17b. Ovaj aranžman sastoji se od dva tenzotpornika sa jednakim naprezanjima po iznosu i predznaku. Tenzotpornici su priključeni na suprotne grane mosta. Izlazni napon je takođe nelinearan i približno je dvostruko veći nego kod četvrtinskog mosta:

$$U_i = \frac{\Delta R}{2R + \Delta R} U = \frac{K\varepsilon}{2 + K\varepsilon} U \approx K\varepsilon U/2. \quad (18.44)$$

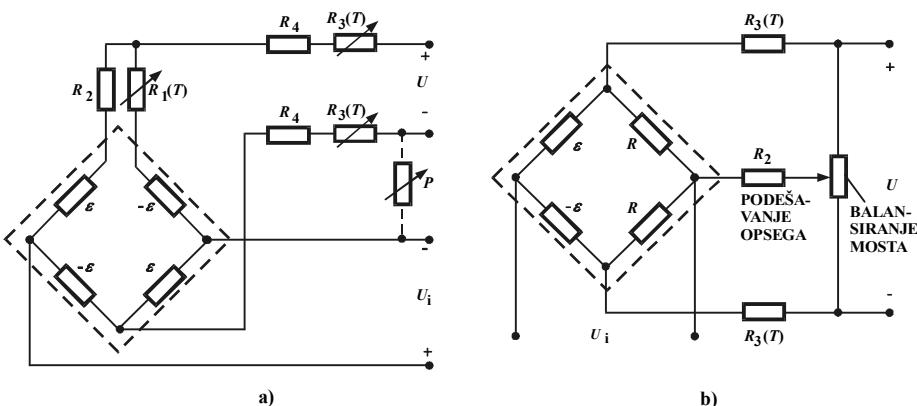
Puni most ima u sve četiri grane aktivni senzor (slika 18.17c). Senzori su upareni i postavljeni na mestima sa jednakim naprezanjima po iznosu, a suprotnim po predznaku. Izlazni signal je direktno proporcionalan merenoj deformaciji:

$$U_i = \frac{\Delta R U}{R} = K U \varepsilon, \quad (18.45)$$

i približno je dvostruko veći nego kod polumosta, odnosno četiri puta veći nego kod četvrtinskog mosta. Za sva tri razmotrena mosta, prikazana na slici 18.18, simbolički je prikazana njihova primena u gradnji senzora pritiska sa membranom kao deformacionim elementom. U stvarnosti, tenzoelementi su zatepljeni na istoj strani membrane, na rastojanju $r = R\sqrt{6}/3$ od centra, gde su tangencijalna i radikalna deformacija, prema jednačinama (18.12) i (18.13), jednakе, ali suprotnog znaka. Na primer, za puni most dva tenzoelementa lepe se u smeru tangencijalne, a dva u smeru radikalne deformacije, čemu odgovara promena otpora tenzoelementa $R + \Delta R$, odnosno $R - \Delta R$.

Merni most sa eksternom temperaturnom kompenzacijom. Analiza je pokazala da temperatura bitno utiče na tačnost rada tenzoelementa. Razlika u temperaturnoj ekspanziji između tenzoelementa i deformacione podloge značajno se redukuje pomoću opisanih metoda. Preostale greške kompenziraju se električnim putem (slika 18.18a). Tenzoelementi su konfigurisani u puni most, a dodatni otpornici imaju sledeću ulogu:

- Otpornik $R_1 = R_1(T)$ je temperaturno osjetljivi otpornik; služi za temperaturnu kompenzaciju drifta nule senzora.

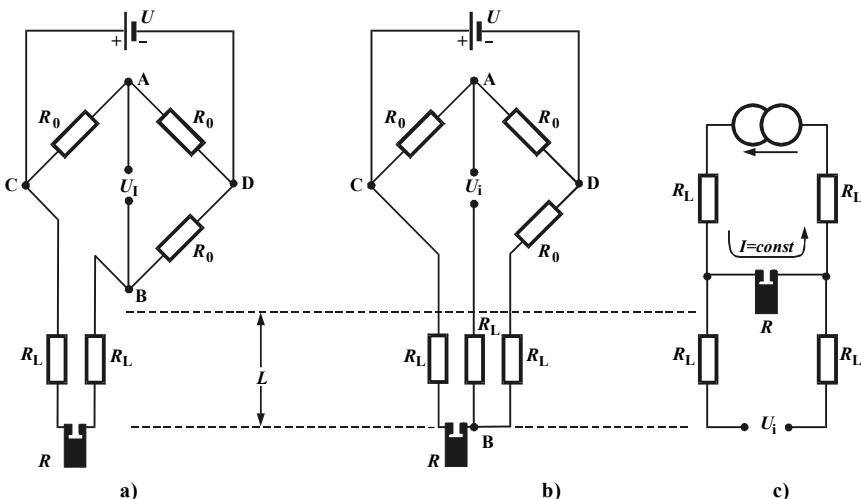


Slika 18.18. Mosne šeme sa kompenzacijom: a) puni most, b) polumost

- Otpornik R_2 ; služi za podešavanje ofseta nule usled neuparenosti tenzotopornika u mostu. Podešavanje se provodi pri referentnoj temperaturi i nominalnoj vrednosti naprezanja, koje je najčešće jednako nuli. (Otpornici R_1 i R_2 mogu zameniti mesta.)
- Otpornik $R_3 = R_3(T)$ je temperaturno osetljivi otpornik: služi za kompenzaciju temperaturnog drifta osetljivosti. (U zavisnosti od karaktera drifta osetljivosti upotrebljava se otpornik $R_3(T)$ sa pozitivnim ili negativnim temperaturnim koeficijentom otpora. Kakav je temperaturni koeficijent potreban ustanavljava se testom.)
- Otpornik R_4 ; služi za podešavanje potrebne osetljivosti, tako da se na izlazu dobije odgovarajući opseg napona.
- Potenciometar P služi za eksternu kalibraciju. tj. pomoću njega se izlazni napon može izbaždarići u jedinicama relativne deformacije. (Kada se P priključi paralelno tenzootporku nominalne vrednosti R , promena otpora ΔR u toj grani je $\Delta R = (R - RP)/(R + P)$. Za $P \gg R$ dobija se $\Delta R/R \approx R/P$. Promena izlaznog napona zbog priključivanja P meri se i pridružuje promeni tenzotpora $\Delta R/R$, odnosno naprezanju $K\varepsilon$.)

Postoje i složenije šeme od razmotrene. Na slici 18.18b prikazana je šema sa paralelnim balansiranjem polomosta.

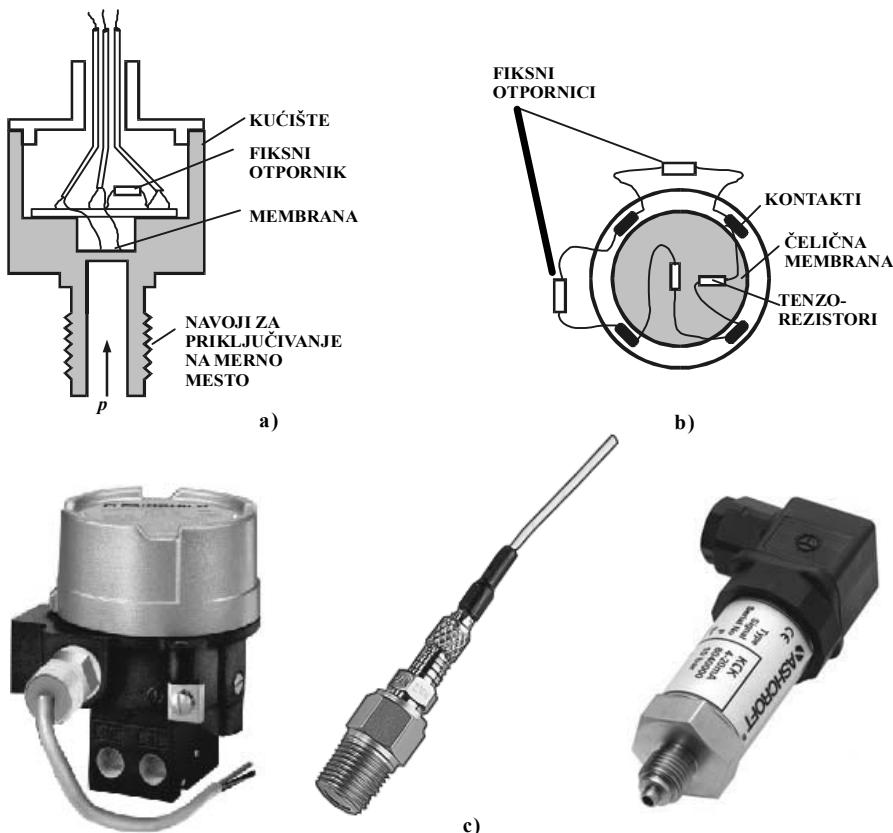
Uticaj priključnih vodova. Tenzoelement je zapečaćen na deformacionu podlogu i priključnim vodovima pripojen u odgovarajuću konfiguraciju mernog mosta. Otpor priključnih vodova povećava vrednost merenog otpora, što se lako koriguje za nominalni režim rada. Međutim, promena otpora priključnih kablova usled delovanja temperature ometa da se prati promena merenog otpora. O ovom uticaju mora se voditi računa čim je otpor vodova $R_v > 0,1\%R$ i može se korigovati.



Slika 18.19. Prikličivanje tenzoelementa u merni most: a) dvožično, b) trožično, c) četvorozično

Sa aspekta tačnosti dvožično spajanje tenzoelementa u most je nepovoljno, jer se otpor kablova i njegov prirast usled temperature u celosti dodaje na mereni otpor. (slika 18.19a). Trožično spajanje raspodeljuje otpor kablova na dve susedne grane mosta, čime se anulira njihov efekat na izlaz (slika 18.19b). Velike mogućnosti u pogledu tačnosti merenja dobijaju se priključivanjem tenzoelementa na izvor konstantne struje, do $1 \mu\text{A}$. Pad napona meri se pomoću kvalitetnog voltmetra ili naponskog detektora, pri čemu otpor priključenih kablova ne utiče merenje jer se kroz voltmeter ne zatvara strujno kolo (slika 18.19c).

Gradnja senzora pritiska sa tenzootpornicima. Senzori pritiska na bazi tenzootpornika najčešće se prave sa membranom kao deformacionim elementom, te dva ili četiri tenzootpornika, koji čine polomost ili puni most. Za poluosno spajanje potrebna su dva dodatna fiksna otpornika radi kompletiranja mosta. Membrana sa tenzootpornicima i kompenzacijonim otpornicama smeštena je u cilindričnom kućištu, koje štiti senzor od temperaturnih, hemijskih, mehaničkih i drugih uticaja okoline (slika 18.20). Razlikuju se konstrukcije za merenje apsolutnog pritiska, diferencijalnog pritiska i relativnog pritiska. U kućištu se, pored toga, nalazi pojačavač, a kod specijalnih izvedbi naponsko-frekventni pretvarač ili naponsko-strujni pretvarač.



Slika 18.20. Senzor pritiska sa tenzoelementima: a) presek senzora, b) membrana sa tenzootpornicima i fiksnim otpornicama za formiranje mosta, c) izgled industrijskih senzora

Izlazni napon mosne šeme proporcionalan je naponu napajanja U i merenom pritisku p . Odstupanja od linearnosti najčešće delom nastaju zbog nesavršenosti membrane i mehaničkih prenosnika sile, zatim zbog puzanja lepila i delovanja temperature, te zbog nepravilno odabranih mesta na kojima su zapepljeni tenzoelementi.

Tipične karakteristike tenzootporičkih senzora pritiska date su u tabeli 18.2. Pored ovih karakteristika, bitni su i sledeći podaci:

- napon napajanja 5–15V (preferira se istosmerni napon jer nisu potrebna kola za modulaciju i demodulaciju kao kod naizmeničnog napajanja, a manji broja elektronskih elemenata daje i bolje pokazatelje pouzdanosti)
- izlazni signal 10–30mV (obično je to 1–3mV po jednom voltu napajanja); 1–15kHz ako je izlaz frekventno modulisan; 4–20mA ako je izlaz strujni
- izlazna impedansa 100–1 000 Ω
- ulazna impedansa 100–1 000 Ω (ulazna i izlazna ne moraju biti jednake)
- otpor izolacije 100–500M Ω za metalne tenzootporike, 1 000–5 000M Ω za poluprovodničke tenzootporike
- dozvoljeno prekoračenje opsega bez uticaja na deklarisane vrednosti tehničkih karakteristika 1,5–2 opsega
- razarajuće prekoračenje 4–10 opsega
- temperaturni radni interval od –20 °C do +80 °C
- lučište od nerđajućeg čelika
- težina 10–300g.

KARAK-TERISTIKA	TIPI SENZORA	OBICIĆNI (KOMERCIJALNI)	STANDARDNI (SREDNJI)	SPECIJALNI (SKUPI)
KLASA TAČNOSTI	1 0,6 (0,5)	0,4 0,25 0,16 0,1	0,06 (0,05) 0,04 0,025 0,016	
NELINEARNOST %	0,5 – 1	0,1 – 0,25	0,05 – 0,1	
OBNOVLJIVOST %	0,25 – 0,1	0,05 – 0,1	0,025 – 0,1	
DRIFT NULE %/10 °C	0,025 – 0,05	0,025 – 0,5	0,01 – 0,025	
DRIFT OSETLJIVOSTI %/10 °C	0,025 – 0,5	0,025 – 0,5	0,01 – 0,025	

Tabela 18.2. Tipične karakteristike tenzootporičkih senzora pritiska

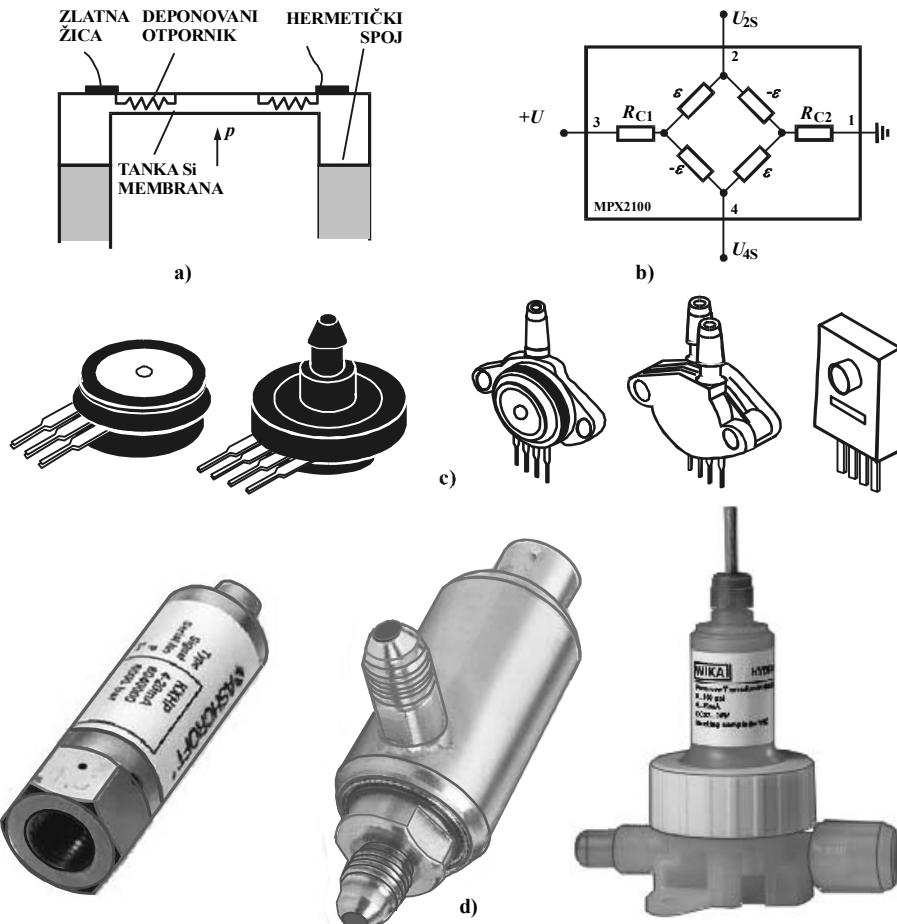
18.5. POLUPROVODNIČKI SENZORI PRITISKA

18.5.1. Poluprovodničke merne trake i pijezorezistivni senzori

Poluprovodničke merne trake prave se na bazi poluprovodničkih otpornika, u obliku folije ili tankog filma, koji se lepe ili naparivanjem nanose na metalnu membranu. Ovakvi tenzootpornici imaju izrazito nelinearnu promenu otpora sa deformacijom:

$$\frac{\Delta R}{R} = A \varepsilon + B \varepsilon^2, \quad (18.46)$$

gde su A i B konstante. Dobra linearnost postiže se samo u donjem delu opsega. Tako, na primer, u delu 0–0,1 opsega linearnost je $\pm 0,75\%$. U poređenju sa metalima, kod poluprovodnika je jako izražen pijezootpornički efekat. Zahvaljujući tome poluprovodnički tenzootpornici imaju faktor osetljivosti K oko 100 puta veći



Slika 18.21. Pijezootpornički senzor pritiska: a) izrada membrane, b) senzorski čip, c) minijaturni senzori u plastičnim kućištima, d) senzori za procesnu industriju

nego tenzotpornici od metala. Njihov izlazni signal je relativno veliki, pa su elektronska kola za prilagođavanje signala jednostavnija, a zbog malih dimenzija moguće ih je inkorporirati u minijaturne instrumente.

Pijezorezistivni senzori su poluprovodnički otpornici vakuumski deponovani u silicijumsku membranu ili u ukleštenu polugu (slika 18.21a). Membrana je kvadratnog ili kružnog oblika, veličine do 1 mm i debljine 10–20 μm. Difundirani otpor je tako integriran sa elastičnim elementom i idealno prati njegovu deformaciju. Nema nestabilnosti zbog puzanja lepila i termoelastičnog naprezanja, koji su, inače, prisutni kod lepljenih folija. Silicijum se pokazao kao izvanredan materijal za gradnju elastičnih elemenata, jer u širokom intervalu naprezanja ima linearnu deformaciju. Membrana od silicijuma praktično se može oštetići jedino kidanjem. Za silicijum *p*-tipa sećenim u pravcu glavnih osa tipična vrednost elastorezistivnog faktora je 100–170. Njegova tačna vrednost, kao i njegove temperaturne varijacije, zavise od stepena dopiranja primesa.

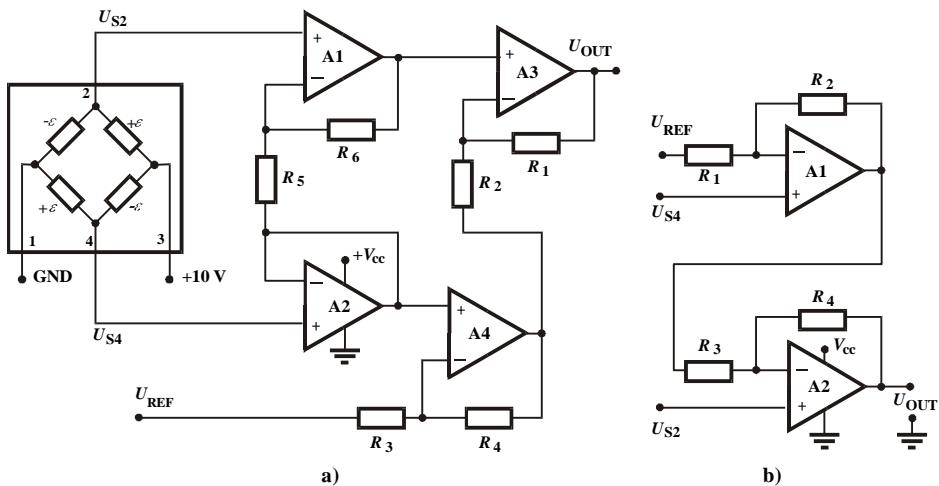
Na silicijumsku membranu deponuju se četiri otpornika, tako što se silicijum dopira primesama *p*-tipa. Membrana se formira hemijskim nagrizanjem silicijumske ploče na suprotnoj strani od otpornika. Tehnika je primenljiva za merenje apsolutnog, relativnog i diferencijalnog pritiska. Deponovani pijezorezistori formiraju puni most da bi se postigla veća osetljivost diferencijalnog izlaznog napona: $U_i = (\Delta R/R)U$. Na primer, za senzor MPX2100 firme Motorola vrednost otpora je $R = 420 \Omega$, napon napajanja mosta $U = 10 \text{ V}$ i $\Delta R = 1,8 \Omega$, $U_i = 40 \text{ mV}$, kompenzacioni otpori $R_{C1} = R_{C2} = 680 \Omega$. Međutim, procesom deponovanja ne mogu se napraviti istovetni pijezorezistori, pa zato uvek postoji ofset nule, koji se menja sa temperaturom i ne može se sasvim kompenzovati otpornicima R_{C1} i R_{C2} (slika 18.21b).

18.5.2. Merne šeme sa poluprovodničkim senzorima

Merne šeme za pijezorezistivne senzore pritiska baziraju se na primeni raznovrsnih varijacija instrumentacionog pojačavača. Pomoću njih sa lakoćom se postiže pretvaranje diferencijalnog napona od nekoliko desetina milivolti na izlazu mosta u jednostrani 0–5 V (*differential to single-ended*), koji je pogodan za priključivanje na A/D konvertor. Bazični instrumentacioni pojačavač (slika 9.11) daje potrebno pojačanje 100–250, ali ne može da savlada ofset nule mosta. Konfiguracija instrumentacionog pojačavača sa četvrtim operacionim pojačavačem (slika 16.33) dobro potiskuje ofset nule kao i ofset samog pojačavača. Međutim, u šemi je više otpornika čije vrednosti moraju biti uparene da se ne bi narušila sposobnost potiskivanja zajedničke jednosmerne komponente na ulazu, odnosno da se ne bi smanjio faktor potiskivanja CMRR.

Modifikovana šema instrumentacionog pojačavača na slici 18.22a namenski je razvijena za pijezorezistivne senzore. U odnosu na klasične šeme, ovde je jedan par otpornika manje i faktora potiskivanja CMRR je stabilniji. Izlazni napon je:

$$U_{\text{OUT}} = \left[U_{2S} \left(1 + \frac{R_6}{R_5} \right) - U_{4S} \frac{R_6}{R_5} \right] \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) + U_{4S} \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) \left(-\frac{R_1}{R_2} \right) + U_{\text{REF}} \frac{R_4}{R_3} \frac{R_1}{R_2}. \quad (18.47)$$



Slika 18.22. Specijalni pojačavači za senzore pritiska: a) uprošćena verzija standardnog instrumentacionog pojačavača, b) konstrukcija sa dva operaciona pojačavača

pojačavača. Međutim, u šemi je više otpornika čije vrednosti moraju biti uparene da se ne bi narušila sposobnost potiskivanja zajedničke jednosmerne komponente na ulazu, odnosno da se ne bi smanjio faktor potiskivanja CMRR.

Modifikovana šema instrumentacionog pojačavača na slici 18.22a namenski je razvijena za pijeozrezistivne senzore. U odnosu na klasične šeme, ovde je jedan par otpornika manje i faktor potiskivanja CMRR je stabilniji. Izlazni napon je:

$$(18.47)$$

Ako su odnos otpornika odabere tako da je $R_4/R_3 = R_2/R_1$, za izlaz se dobija:

$$U_{\text{OUT}} = (U_{2S} - U_{4S}) \left(1 + \frac{R_6}{R_5} \right) \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) + U_{\text{REF}}. \quad (18.48)$$

Potrebno pojačanje diferencijalnog ulaznog napona postiže se izborom odnosa R_6/R_5 , koji je mnogo veći od jedinice, tako da je na kraju izlazni napon:

$$U_{\text{OUT}} = \frac{R_6}{R_5} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) (U_{2S} - U_{4S}) + U_{\text{REF}}. \quad (18.49)$$

Za praktičnu primenu veoma je interesantna šema sa samo dva operaciona pojačavača (slika 18.22b), ali je u potpunosti realizovana funkcija instrumentacionog pojačavača: veliko pojačanje i veliki faktor potiskivanja CMRR. Izlazni napon za ovaj jednostavni sklop je:

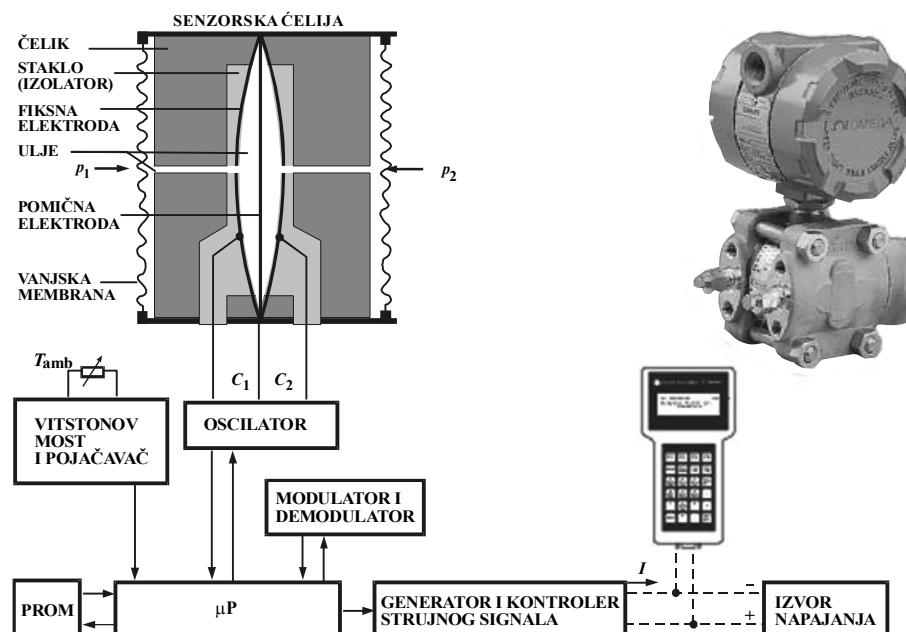
$$U_{\text{OUT}} = U_{4S} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \left(-\frac{R_4}{R_3} \right) + U_{2S} \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) + U_{\text{REF}} \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3}. \quad (18.50)$$

18.6. DIGITALNI SENZORI PRITISKA

18.6.1. Inteligentni kapacitivni senzor pritiska

Povezanost sa mikroprocesorom proširuje funkcionalne mogućnosti senzora. Adaptivnost programa i sposobnost obrade merne informacije, označava se inteligencijom senzora. Jedan od prvih inteligentnih senzora za industrijsku upotrebu napravljen je na bazi diferencijalnog kapacitivnog senzora malih pomeraja. (slika 18.23). Pokretna elektroda služi kao osetilna membrana, a postavljena je u središtu senzorske ćelije čiji metalizirani bočni zidovi predstavljaju fiksne elektrode. Razlika pritisaka koji deluju sa leve i desne strane senzora preko vanjskih membrana prenosi se do pokretnе elektrode pomoću posebnog ulja, koje ispunjava senzorsku ćeliju. Time se obezbeđuje izolacija i otpornost senzorske membrane na koroziju. Pomeranje senzorske membrane odražava se kao varijacija kapaciteta između pokretnе i fiksnih elektroda. Ako je jedna prijemna membrana izložena atmosferskom pritisku, senzor meri relativni pritisak. Za merenje vakuma jedna prijemna membrana je zavarena za kućište, a odgovarajuća komora je ispunjena uljem i vakuumski zapečaćena. Kondenzatori su spojeni na elektronski oscilator pomoću kojeg se generiše strujni izlazni signal 4 – 20 mA. Mikroprocesorska baziranost oscilatora omogućava:

- visoku tačnost (do $\pm 0,2\%$ opsega, a u boljem slučaju do $\pm 0,1\%$ opsega);
- temperaturnu kompenzaciju (temperaturni drift nule $\pm 0,1 - 0,01\% /^{\circ}\text{C}$, ukupni temperaturni drift nule i osetljivosti $\pm 0,15 - 0,015\% /^{\circ}\text{C}$);
- podešavanje linearne ili korenske statičke karakteristike;



Slika 18.23. Inteligentni kapacitivni senzor pritiska

- indikacija izlaznog signala u miliamperima, jedinicama pritiska ili u процентима punog opsega.

Funkcionalna konfiguracija ostvaruje se izmenom programabilne memorije PROM. Ako postoji odgovarajući interfejs, konfigurisanje se postiže pomoću procesnog računara ili PC-računara iz komandne prostorije. Za ove svrhe proizvodači inteligentnih senzora proizvode namenske ručne terminale, koji se priključuju paralelno na vod sa analognim izlaznim signalom, na koji se onda superponira impulsno modulisani signal za konfiguraciju. Ručni terminali imaju displej sa ograničenim brojem karaktera (do 32), RAM-memoriju 8–16 K, EPROM-memoriju 32–128 K, te baterijsko napajanje istosmernim naponom.

18.6.2. Povezivanje sa mikrokontrolerom

Digitalni senzor pritiska sastoji se od poluprovodničkog senzorskog elementa (kapacitivnog ili pijezorezorezistivnog), elektronskih kola za kondicioniranje signala (pojačavač ili komparator), A/D konvertora i mikrokontrolera za završno procesiranje koje treba da minimizira ukupnu grešku merenja zbog varijacija u karakteristikama analognog dela i uticaja temperature. Proizvodači isporučuju senzore pritiska u plastičnom ili metalnom kućištu različitog oblika, zavisno od namene. Najjeftiniji je nekompenzovani senzor koji ima samo poluprovodničke senzorske elemente. Kompenzovani senzor pored monolitne silicijumske membrane sa pijezorezistorima ima tankoslojno kolo sa laserski trimovanim otpornicima i termistorima za podešavanje opsega, ofseta i temperaturnu kompenzaciju.

Za praktičnu primenu važan podatak je rezolucija, tj. najmanji prirast merenog pritiska koji se može detektovati datim senzorom. Tipična rezolucija je 1% punog opsega, što za senzor opsega 10 kPa iznosi 0,1 kPa. Kada se senzor priključuje na A/D konvertor, onda je potrebno znati podatak o rezoluciji ulaznog napona, tj. o najmanjem prirastu napona koji se može konvertovati datim n -bitnim konvertorom. Za 8-bitni konvertor kod koga je visoki referentni napon $V_{REFH} = 5$ V i niski referentni napon $V_{REFL} = 0$ V, rezolucija napona je:

$$\Delta_{VR} = \frac{5 \text{ V}}{255 \text{ koraka}} = 19,6 \text{ mV/korak}. \quad (18.52)$$

Kada se senzor sa rezolucijom 1%PO priključi na ovakav A/D konvertor, onda izlaz senzora treba da ima opseg:

$$V_{OPSEG} = \frac{19,6 \text{ mV}}{0,01} = 1,96 \text{ V}, \quad (18.53)$$

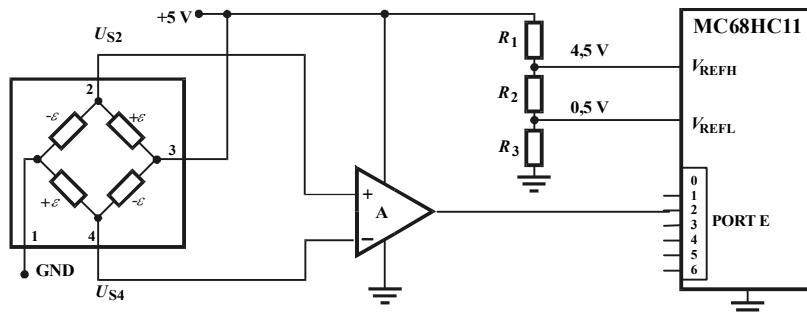
a za senzor rezolucije 0,5%PO, izlazni napon treba da ima opseg $V_{OPSEG} = 3,92$ V.

Zbog tehnologije proizvodnje poluprovodničkih senzora postoji značajna varijacija parametara od jednog do drugog senzora i potrebno je podešavanje nule i pojačanja (osetljivosti). U praksi je uobičajeno da se pri kalibraciji napon ofseta nule podešava približno na 0,5 V, a maksimum izlaza na 4,5 V. Prema tome, dinamičkom opsegu senzora odgovara 4/5 dinamičkog opsega konvertora, odnosno za 8-bitni A/D biće iskorišteno 80% mogućih pozicija (200 od 255). Konačni rezultat je da najbolja rezolucija koja se može postići ovakvim konvertorom iznosi 1/200 ili 0,5%PO.

Povezivanje senzora sa mikrokontrolerom omogućava da se programski koriguju temperaturne varijacije izlaza za svaki pojedini senzor. Moguće je povratnim D/A spregama održavati potrebni nivo ofseta nule i potrebitno pojačanje tako da se iskoristi puni opseg A/D konvertora, tj. svih $2^n - 1$ pozicija.

18.6.3. Direktno povezivanje na mikrokontroler

Pijezorezistivni senzor pritiska prvo se mora spajiti sa odgovarajućim instrumentacionim pojačavačem, a njegov izlaz može se direktno priključiti na A/D ulaz mikrokontrolera. To su ulazi internih A/D konvertora, najčešće 8-bitnih. Za popularni Motorolin mikrokontroler MC68HC11 ovakvi A/D konvertori su na portu E. Na slici 18.24 instrumentacioni pojačavač priključen je na ulaz E2.



Slika 18.24. Direktno povezivanje senzora pritiska na A/D ulaz mikrokontrolera

18.6.4. Priključivanje na eksterni A/D konvertor

Kada je potreban A/D konvertor sa više bita, tada se koristi mikrokontroler koji ima takav A/D konvertor ili se primjenjuje eksterni A/D konvertor. Na slici 18.25 prikazana je realizacija eksternog A/D konvertora sa pretvaranjem napona u vreme. Za takvo pretvaranje koristi se pilasti napon, koji se dobija punjenjem kondenzatora C_1 konstantnom strujom I :

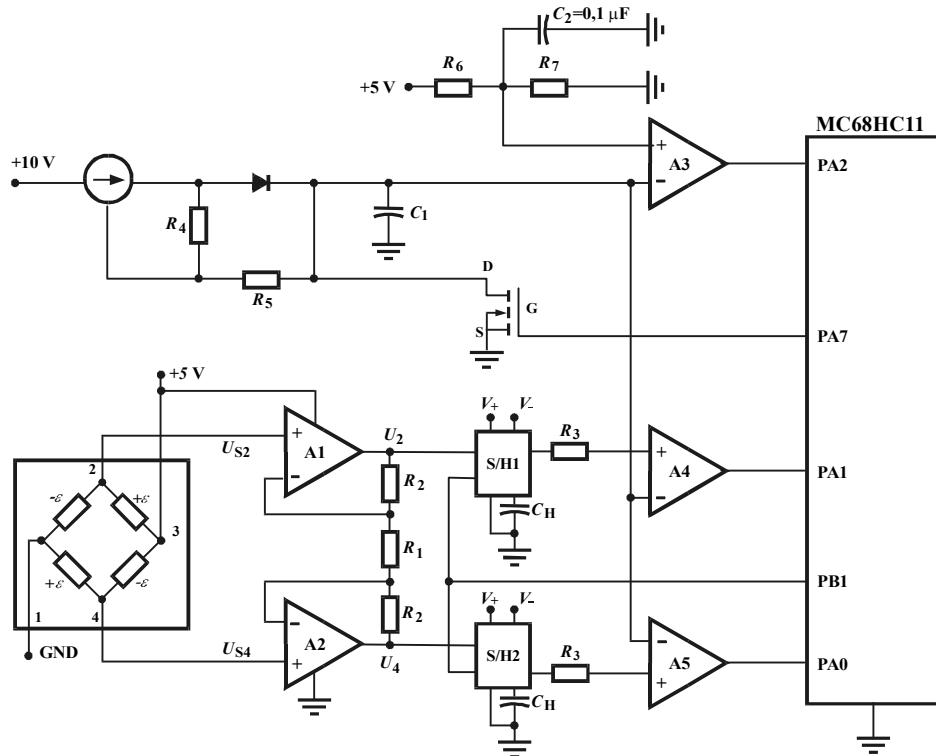
$$U_{C_1}(t) = \frac{1}{C_1} \int_0^t Idt = \frac{I}{C_1} t. \quad (18.54)$$

Na primer, ako se odaberu $I = 470 \mu\text{A}$ i $C_1 = 0,47 \mu\text{F}$, potrebno je 5 ms da pilasti napon poraste od 0 V do 5 V. Početak punjenja inicira se spajanjem C_1 na masu pomoću MOSFET prekidača. Pilasti napon doveden je na invertujuće ulaze komparatora A4 i A5. Na njihovim neinvertujućim ulazima su signali U_2 i U_4 sa senzora. Prvi komparator koji promeni svoj izlaz u nulu daje tajmer start impuls, a drugi komparator daje stop impuls. Vreme između ova dva dogadaja proporcionalno je razlici $U_2 - U_4$, odnosno merenom pritisku p .

Kola A1 i A2 formiraju prednji deo instrumentacionog pojačavača čija je funkcija da potisne zajedničku jednosmernu komponentu U_{CM} na ulazu (jednaku polovini napona napajanja mosta) i pojača razliku napona $U_{S2} - U_{S4}$ sa faktorom $(1+2R_2/R_1)$:

$$U_2 - U_4 = (1 + 2R_2/R_1)(U_{S2} - U_{S4}). \quad (18.55)$$

U toku konverzije iz analognog u digitalni oblik naponi U_2 i U_4 sa intrumentacionog pojačavača uzorkuju se i pamte u S/H kolu (LF198 ili AD1154). Kada je pritisak veći od nule, tada je $U_{S2} > U_{S4}$ i $U_2 > U_4$, pa će napon sa S/H2 kola prekoincidirati sa pilastim naponom nego napon sa S/H1 kola. Zbog toga će prvo PA0 promeniti stanje u nula i uključiti tajmer, pa onda PA1 i isključiti tajmer. U 16-bitnom registru tajmera zapisan je ukupan broj klok impulsa između ova dva dogadaja: $N = T_f C = k(U_2 - U_4)/f_C$. Koficijent $k = 1 \text{ ms/V}$ određen je nagibom pilastog napona, pa će se pri frekvenciji kloka od 2 MHz dobiti $N = 10^3(U_2 - U_4)$, odnosno 1 000 impulsa za 1 V (ili 1 impuls za svaki milivolt razlike $U_2 - U_4$).



Slika 18.25. Povezivanje senzora sa mikrokontrolerom preko eksternog A/D konvertora

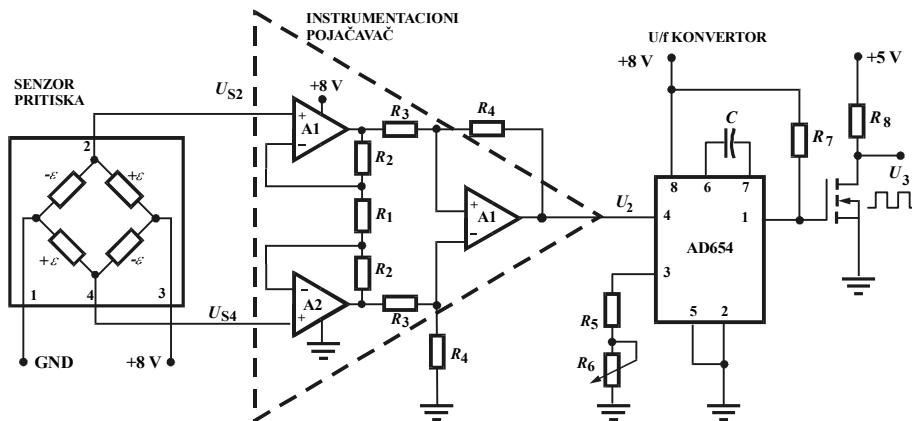
Rezolucija pretvaranja $U_{S2}-U_{S4}$ zavisi od frekvencije klok oscilatora (2 MHz) i linearnosti pilastog napona; za razmatranu šemu rezolucija je 11 bita. Za nultu vrednost pritiska senzorski most je u ravnoteži i izlazni naponi sa senzora su jednaki: $U_{S2} = U_{S4} = U_{CM}$. Naponi U_2 i U_4 su takođe jednaki pa će (praktično) istovremeno doći do koincidencije pilastog napona na oba komparatora A4 i A5. Procesor će izračunati broj klok impulsa za vreme kada su ulazi tajmera PA0 i PA1 promenili svoja stanja na nulu i odrediti nulu za nulti pritisak, za svaki pojedini senzor.

Opisani proces konverzije završava se kada pilasti napon dostigne referentnu vrednost određenu deliteljem R_6 i R_7 (približno 4 V). Tada komparator A3 menja stanje ulaza PA2 u nula i mikrokontroler na izlazu PA7 generiše signal za

uključivanje prekidača, tj. signal za resetovanje. Isti signal prazni kondenzator C_1 u kolima za uzorkovanje i zadršku, i započinje novi ciklus uzorkovanja i zadrške.

18.6.5. Priključivanje preko U/f konvertora

Konvertor napona u frekvenciju često se primjenjuje kao eksterni A/D konvertor kada se koristi mikrokontroler koji ima tajmer, odnosno kaunter. Najpoznatiji V/f konvertor je osmopinski monolitni čip AD654. Sastoјi se od ulaznog pojačavača, preciznog oscilatora i izlaznog stepena sa otvorenim kolektorm. Ulazna otpornost čipa je $250\text{ M}\Omega$, napajanje je jednostrano (od $+5\text{ V}$ do $+36\text{ V}$) ili dvostrano ($\pm 5\text{ V}$ do $\pm 18\text{ V}$), opseg ulaznog napona je od 100 mV do 10 V i zavisi od napona napajanja, a frekvencija četvrtki na izlazu je do 500 kHz .



Slika 18.26. Povezivanje senzora sa mikrokontrolerom preko U/f konvertora

Senzor pritiska priključen je na instrumentacioni pojačavač, koji može biti integrисано monolitno kolo (AD524/LM143) ili je napravljen u skladu sa jednom od prethodnih šema (slika 18.26). Unipolarni jednosmerni napon sa izlaza instrumentacionog pojačavača $U_2 = A_U(U_{S2} - U_{S4})$ vodi se direktno na pin 4 konvertora AD654. Puni opseg ulaznog napona U_2 u čipu se pretvara u struju opsega 1 mA koja upravlja radom strujno-frekventnog pretvarača na bazi astabilnog multivibratora i punjenjem i pražnjenjem eksternog kondenzatora C , sa frekvencijom:

$$f = \frac{U_2}{(10\text{ V})(R_5 + R_6)C} \quad (18.56)$$

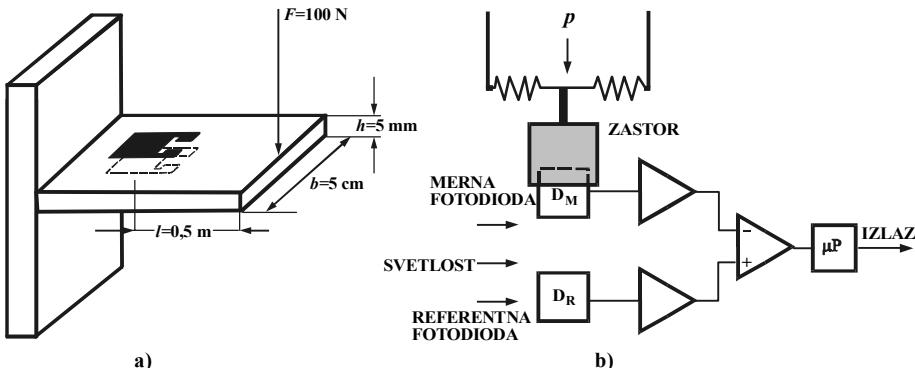
Prilikom projektovanja šeme, prvo se odaberu vrednosti otpornika R_5 i R_6 tako da $U_2/(R_5 + R_6)$ daje 1 mA , a zatim se odabere kondenzator koji daje željenu frekvenciju. Na primer, za $C = 0,01\text{ }\mu\text{F}$ opseg frekvencije je 10 kHz , a za $C = 0,001\text{ }\mu\text{F}$ opseg je 100 kHz . Kada je napon na pinu 1 (otvorenom kolektoru) nula, MOSFET tranzistor ne vodi i na izlazu je napon $U_3 = +5\text{ V}$, a kada je napon na pinu 1 pozitivan, tranzistor vodi i izlaz je nula. Niz četvrtki vodi se na ulaz tajmera mikrokontrolera koji reaguje na usponsku ivicu i uključuje brojač klok impulsa, a pri negativnoj usponskoj ivici isključuje brojač. Izmereni vremenski interval proporcionalan je naponu sa senzora, odnosno merenom pritisku.

PITANJA I ZADACI

- 1) Ako na membranu poluprečnika $R = 8,51 \text{ mm}$ i debljine $b = 0,9529 \text{ mm}$ deluje pritisak $p = 6,89 \text{ MPa}$, odrediti maksimalni progib, rezonantnu frekvenciju i maksimalnu vrednost radijalne deformacije. Materijal od kojeg je napravljena membrana ima gустину $\rho = 7,83 \cdot 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$ i modul elastičnosti $E = 207 \text{ GPa}$.
Rešenje: $y(0) = 0,0348 \text{ mm}$, $f_r = 33102 \text{ Hz}$, $\tau(R) = -1830 \text{ mm/m}$.

- 2) Konzola se često primjenjuje kao deformacioni element u senzorima sile, momenta i pritiska. Na slobodnom kraju aluminijumske konzole ($E_Y = 5,1 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$) deluje sila $F_{\max} = 100 \text{ N}$ (slika 18.27a). Na rastojanju $l = 0,5 \text{ m}$ od hvatišta sile sa gornje i donje strane konzole zatepljene su dve tenzootporničke folije: $R = 200 \Omega$, $K = 2,1$, $I_{\max} = 20 \text{ mA}$. Konfigurisati merni polumost, odrediti napon napajanja U , promenu otpornosti ΔR i izlazni napon U_i .

Rešenje: Polumost je prikazan na slici 18.17b. Napon napajanja: $U = 2RI_{\max} = 8 \text{ V}$. Za konzolu je $M = \sigma W = E_Y \epsilon \cdot \frac{bh^2}{6}$, pri čemu je $M = Fl$, pa je: $\Delta R = KR\epsilon = KR \frac{Fl}{E_Y} \cdot \frac{6}{bh^2} = 0,049 \Omega$. Izlazni napon: $U_i = \frac{\Delta R}{2R} U = 39,5 \text{ mV}$.



Slika 18.27

- 3) Na slici 18.27b prikazan je optoelektronski senzor pritiska. Objasniti njegov način rada. Kako se mogu proširiti funkcionalne mogućnosti senzora?
- 4) Kako nastaje i kako se kompenzira temperaturna greška kod lepljenih tenzootpornika?
- 5) Razmotriti sličnosti i razlike poluprovodničkih tenzootpornika. Objasniti efekat pijezorezistencije. Da li se taj efekat javlja i kod metala?
- 6) Objasniti strukturu direktnih i kompenzacionih senzora.
- 7) U čemu se sastoji načelna prednost kompenzacionih senzora nad direktnim? Kako se nadoknađuje inferiornost direktnih senzora?

LITERATURA

1. *Strain gage selection criteria, procedures, recommandation*, Techn. note TN-132, MICRO MEASUREMENTS, VISHAY INTERTECHNOLOGY, 1976.
2. *Wheatstone bridge nonlinearity*, Techn. note TN-139-2, MICRO-MEASUREMENTS, 1976.
3. *Strain gage temperature effects*, Techn. note TN-128-2, MICRO-MEASUREMENTS, 1976.
4. W. Welkowitz, S. Deutsch: *Biomedical instruments, Theory and design*, Academic press, New York, 1976.
5. M. Popović: *Prilog mjerenu pulsaciju pritiska pomoću pijezometra*, XIII jugoslovenski kongres racionalne i primijenjene mehanike, B4-7, Sarajevo, 1974.
6. G.F. Budenberg: *Current practice in measurement of fluid pressure*, Control & Instrumentation, pp. 33-35, 1971.
7. M. Džoković: *Baždarenje pijezoelektričnih pretvarača pritiska primarnim etalonom visokog pritiska*, Zbornik radova JUREMA 31, 3 svezak, str. 35-39.
8. M.F. Hordeski: *Microprocessor sensor & control systems*, Reston Publishing Company, A Prentice Hall Company, 1985.
9. E.N. Nečiporenko, S.P. Poliško: *Sozdanie vysokotočnyh bystrodejstvujučih zadatčikov davlenija gaza*, Izmeritel'naja tehnika, No. 5/89 (32-35), 1989.
10. V.I.Levcov, A.I. Korolev, T.I. Savostina, V.M. Jakušev: *Shemnaja termokompensacija tenzorezistornych preobrazovatelej davlenija*, Izmeritel'naja tehnika, No.7/88 (22-24), 1988.
11. D. Suvajdžić, B. Šoškić, P.Kesić: *Primjena tenzometrijskih metoda u mjernim pretvaračima pritiska i diferencijalnog pritiska*, Zbornik radova JUREMA 24 (1979), 3. svezak, str. 163-171, Zagreb, 1979.
12. D. Suvajdžić: *Današnje stanje razvoja mjeranja pritiska*, Mjerenje protoka, Škola mjeranja, automatske i kibernetike, knjiga 3, svezak 1, str. 49-55, Zagreb, 1980.
13. M.I.Dajčik, N.I. Prigorovskij, G.H. Huršudov: *Metody i sredstva naturnoj tenzmetrii*, Mašinostroenie, Moskva, 1989.
14. *Pressure and strain measurement handbook and encyclopedia*, Omega Ungineering, Inc, USA, 2002 (www.omega.com).
15. P. Til': *Električeskie izmerenija neelektričeskikh veličin*, prevod sa nemačkog, Energoatomizdat, Moskva, 1987.
16. S.R. Appleby: *Reliability of electronic pressure transmitters*, Statham News, 1987.
17. *Pressure transducers & transmitters*, Application guide, Setra Systems, Inc., Bulletin AGP-201 Rev. 3/84, Massachusetts, 1984.
18. S.Stanković: *Fizičko-tehnička merenja*, Naučna knjiga, Beograd, 1987.
19. Jones' Instruments Technology: *MECHANICAL MEASUREMENTS*, Vol.1, Butterworths, London, 1985.
20. R. Chase: *Europe shows off its sensors technology*, Sensor Review 9(1), pp.41-46, 1989.
21. *LD300 Series Intelligent Pressure Transmitters*, Tech. note, SMAR INTERNATIONAL CORPORATION, Brasil.
22. M.H.Beggans, D.I.Ivanov, S.G.Fu, T.G.Digges, K.R.Farme: *Optical pressure sensor head fabrication using ultra-thin silicon wafer anode bonding*, www.njit.edu/old/MRC/mrepdf/mempaper.pdf, 1998.
23. Fiberoptički senzori pritiska: www.optrand.com
24. M. Berkson: *Understanding and specifying Texas Instruments' capacitive pressure transducers*, Application note AN2-1, Texas Instruments, 1997 (ti.com)
25. *Designing sensor performance specifications for MCU-based systems* (prepared by E.Jacobson and J.Baum), Semiconductor application note AN1556, Motorola, 2000 (www.motorola.com)
26. *Interfacing semiconductor pressure sensors to microcomputers* (prepared by W.Schultz), Semiconductor application note AN1517, Motorola, 2000 (www.motorola.com)
27. Merenje pritiska: www.content.honeywell.com/sensing/prodinfo/pressure/default.asp, www.ti.com, www.servoflo.com/download/brochures.htm, www.paroscientific.com/fiberopticsys
28. *Precision voltage-to-current converter/transmitter XTR110*, Burr/Brown Products from Texas Instruments, 2003 (www.ti.com).

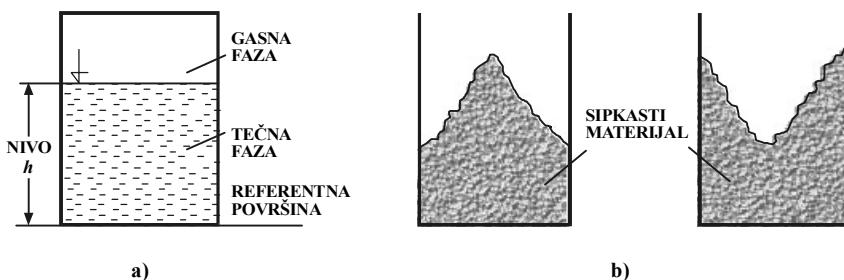
19

SENZORI NIVOA

19.1. KARAKTERISTIKE MERENJA NIVOA

Nivo je visina tečnog ili usitnjenog (sipkastog, praškastog) materijala u posudi. Nivo radnog medijuma je tehnološki parametar, pa je informacija o njemu neophodna za kontrolu rada tehnoloških aparata, a u nizu slučajeva i za upravljanje tehnološkim procesima. U suštini nivo predstavlja graničnu površinu između dve sredine različite gustine u odnosu na neku horizontalnu površinu uzetu kao referentnu. Granična površina je obično između tečne i gasne faze, a ređe između dve tečne faze (slika 19.1a). Senzori za merenje nivoa nazivaju se nivometrima.

Jedinica nivoa. Iz definicije nivoa proizilazi da je merenje nivoa merenje rastojanja, odnosno debljine. Sledstveno tome, nivo se izražava u jedinicama dužine.



Slika 19.1. Nivo: a) nivo tečnosti, b) nivo sipkastih materijala

Merenje nivoa usitnjenog materijala, kao što je ugalj, brašno, žito, cement i drugo, sa tehničkog aspekta značajno se razlikuje od merenja nivoa tečnosti jer nivo takvih materijala najčešće nije horizontalan (slika 19.1b). Za tačno merenje neophodno je poznavanje kretanja materijala, veličine i oblika zrna, načina punjenja i pražnjenja, kao i oblika rezervoara.

Merenje količine (zapremine) tečnog i usitnjenog materijala u rezervoaru vrši se na osnovu informacije o nivou. Zbog promenljivog poprečnog preseka rezervoara zapremina je data integralnom jednačinom:

$$V = \int_0^h S(h) dh. \quad (19.1)$$

Promena poprečnog preseka zavisno od nivoa $S(h)$ poznata je za dati rezervoar. Za uspravne rezervoare je $S(h) = \text{const}$ i zavisnost $V(h)$ je pravac, a za

sferne i horizontalne cilindrične rezervoare $V(h)$ je nelinearna kriva koja mora da se proveri baždarenjem. Digitalni nivometar sa algoritmom (19.1), osim informacije o tekućoj vrednosti nivoa, daje i informaciju o zapremini materijala u rezervoaru.

Opseg. Prema veličini opsega razlikuju se nivometri širokog opsega ($0,5 - 25\text{ m}$), namenjeni za merenje apsolutnog nivoa i količine, i nivometri sa uskim opsegom (od 0 do $\pm 100\text{ mm}$, odnosno od 0 do $\pm 450\text{ mm}$), koji se primenjuju u sistemima automatskog upravljanja.

Metode merenja nivoa mogu se podeliti u dve grupe. U prvu grupu spadaju metode merenja nivoa u odabranim (diskretnim) tačkama, a u drugu grupu spadaju kontinualne metode merenja. Diskrete vrednosti markiraju kritične vrednosti nivoa, kao što su minimalna ili maksimalna vrednost. Senzori koji rade na ovom principu služe za signalizaciju alarma (prepunjjen ili prazan rezervoar). Izbor kontinualnih metoda praćenja nivoa zavisi od vrste medijuma, od toga da li je zatvoreni rezervoar pod natpritiskom ili potpritiskom. U automatizaciji tehničkih procesa najviše se upotrebljavaju senzori na principu plovka ili ronila, zatim hidrostatski, električni, ultrazvučni i radijacioni.

19.2. TEHNIKA SENZORA NIVOA

19.2.1. Senzori na principu plovka

Plovak je loptastog oblika, prečnika $80 - 200\text{ mm}$. Pliva na površini tečnosti čiji se nivo meri. Mehaničkom vezom položaj plovka prenosi se na kazaljku ili senzor ugaonog pomeraja. Plovak je smešten uza zid rezervoara ili u posebnoj komori sa vanjske strane rezervoara (slika 19.2a). Minimalni opseg za ove senzore je od 0 do $\pm 200\text{ mm}$, a tipična tačnost je $\pm 1,5\%$ opsega.

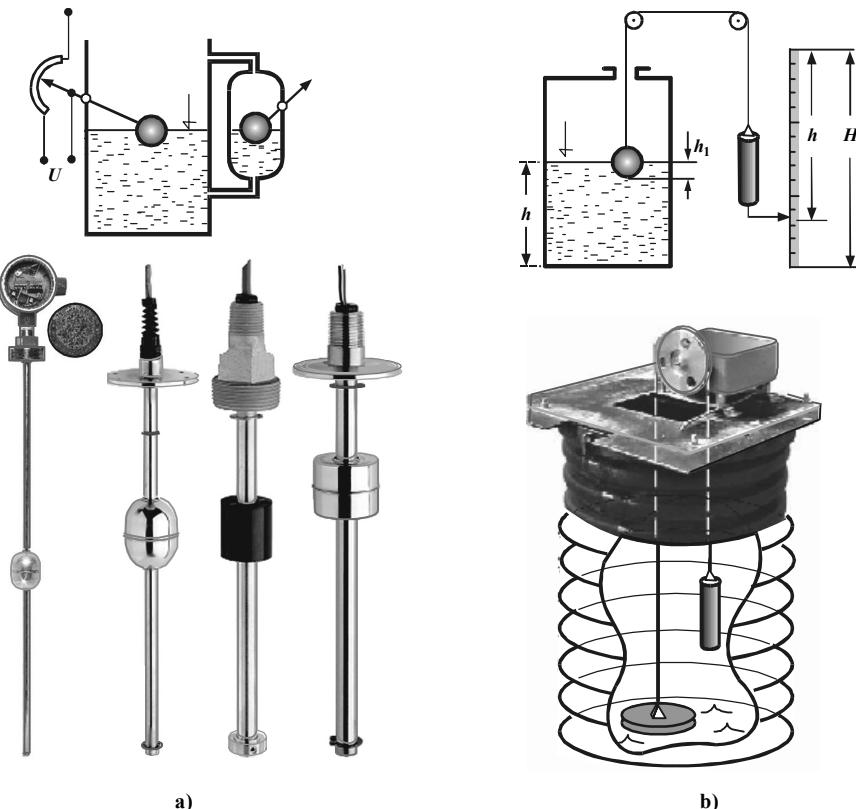
Za veće opsege na plovak se privezuje protuteg (slika 19.2b). Konstrukcioni parametri plovka proračunavaju se tako da se obezbedi ravnotežno stanje na određenoj dubini:

$$F = F_p - Sh_1 \rho_t g, \quad (19.2)$$

gde su F i F_p težine protutega i plovka [N], S površina poprečnog preseka plovka [m^2], h_1 dubina do koje je potopljen plovak [m], ρ_t gustina tečnosti čiji se nivo meri [kg/m^3]. Sa porastom nivoa tečnosti u rezervoaru na plovak deluje dodatna sila uzgona, pa se protuteg kreće naniže sve dok se ponovo uspostavi ravnotežno stanje, definisano uronjenošću plovka na dubinu h_1 . Ova dubina određuje ujedno i minimalnu vrednost merenog nivoa.

Plovak sa trakom. Za merenje nivoa nafte i naftnih derivata primenjuje se nivometar sa plovkom, koji je perforiranom metalnom trakom pričvršćen za oprugu umesto protutega (slika 19.2.c). Vertikalne vodice sprečavaju bočno kretanje plovka. Minimalni merni opseg je $0 - 12\text{ m}$, a rezolucija je do 1 mm .

Prenos informacionog signala na daljinu. Karakteristično je za senzore nivoa sa plovkom da se pomeranje plovka pretvara u linearni ili ugaoni pomeraj. Ovaj pomeraj pretvara se u električni signal, najčešće pomoću potenciometarskog ili kapacitivnog senzora. Za ove namene pogodan je i selsinski sistem, pri čemu je selsin-predajnik spojen sa osovinom prenosnika, a selsin-prijemnik sa osovinom indikacionog instrumenta.



Slika 19.2. Senzori nivoa sa plovkom: a) plovak u rezervoaru i sa vanjske strane rezervoara,
b) plovak sa protutegom

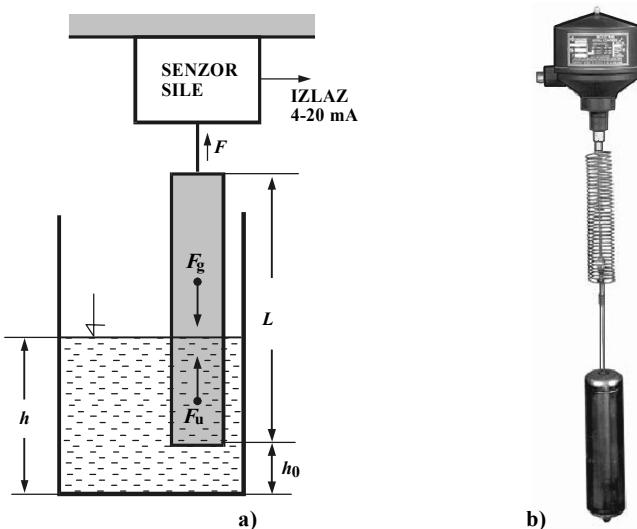
19.2.2. Senzori sa ronilom

Princip rada. Senzori sa ronilom rade na principu sile uzgona, tj. Arhimedovog zakona. Ronilo je obično štap cilindričnog oblika i na gornjem kraju pričvršćeno je za senzor sile. Napravljeno je od materijala gustine ρ , koja je veća nego što je gustina tečnosti ρ_t , ima dužinu L približno jednaku mernom opsegu (slika 19.3). Zbog sile uzgona F_u težina ronila F_g se smanjuje, pa senzor sile detektuje:

$$F = F_g - F_u = \rho g S L - \rho_t g S (h - h_0), \quad (19.3)$$

odakle proizilazi da je mereni nivo proporcionalan sili F :

$$h = \rho L / \rho_t + h_0 - F / \rho_t g S = k_1 - k_2 F. \quad (19.4)$$



Slika 19.3. Senzor nivoa sa ronilom: a) princip rada, b) izgled

Negativni predznak koeficijenta k_2 ukazuje da prilikom porasta nivoa dolazi do smanjivanja detektovane sile F i obrnuto. Maksimalna vrednost sile F je pri $h=h_0$ i tada je $F=F_g$. Da ronilo ne bi dodirivalo dno, potrebno je da bude $h_0 > 0$.

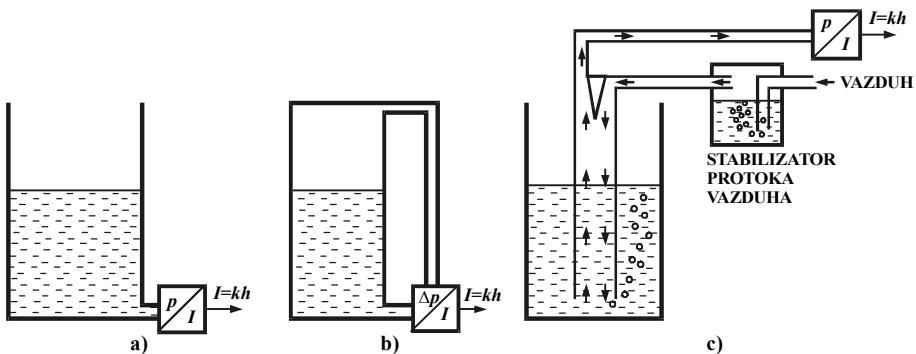
Prenos informacije o nivou na daljinu. Karakteristično je za senzore nivoa sa ronilom da se nivo pretvara u silu, koja se meri odgovarajućim senzorom sile: induktivnim, kapacitivnim ili pijezoelektričnim. Merni opseg senzora nivoa sa ronilom u kombinaciji sa senzorom sile je od 0–0,02 m do 0–16 m, sa tipičnom tačnošću $\pm 1,5\%$. Njihova primena moguća je u za radne medije na temperaturi od -40°C do 400°C i na pritisku do 16 MPa.

19.2.3. Hidrostatski senzori

Princip rada ovih senzora zasniva se na primeni Paskalovog zakona, pomoću kojeg se računa pritisak p u mirnom i homogenom fluidu gustine ρ , na dubini h :

$$p = \rho gh. \quad (19.5)$$

Postoje tri tipa hidrostatskih senzora. Prvi tip realizuje se kao senzor relativnog pritiska koji meri pritisak stuba tečnosti na dnu rezervoara (slika 19.4a). Drugi tip se pravi kao senzor diferencijalnog pritiska, što je pogodno za zatvorene rezervoare kod kojih se iznad tečne faze nalazi gasna faza pod pritiskom (slika 19.4b). Kod trećeg tipa hidrostatičkog senzora ubacuje se vazduh pod pritiskom. Kada se pritisak vazduha izjednači sa hidrostatičkim pritiskom, na dnu rezervoara izlaze mehurići. Višak vazduha odlazi u okolinu, a vazduh u povratnom impulsnom vodu ima pritisak proporcionalan merenom nivou. Na kraju voda postavljen je senzor relativnog pritiska, koji je na ovaj način odvojen od hemijski agresivne tečnosti (slika 19.4c). Postoje konfiguracije i za zatvorene rezervoare pod pritiskom.



Slika 19.4. Hidrostatski senzor: a) hidrostatski senzor nivoa kao senzor relativnog pritiska, b) hidrostatski senzor nivoa kao senzor diferencijalnog pritiska, c) pneumatski tip za otvoreni rezervoar

Osobine hidrostatskih senzora su jednostavnost načina rada, odsustvo pokretnih delova kao kod senzora sa ronilom ili plovkom, te mogućnost primene za otvorene i zatvorene rezervoare sa zapaljivim ili hemijski agresivnim tečnostima. Tipični opsezi su od 0–10 m do 0–70 m, tačnost $\pm 0,15\text{--}1,5\%$ za puni opseg, odnosno $\pm 0,04\text{--}0,4\%$ za 25%-tну promenu opsega merenog nivoa. Dužina impulsnih vodova je do 300 m.

19.2.4. Električni senzori

Kapacitivni senzori nivoa prave se kao pločasti ili cilindrični kondenzatori, između kojih se nalazi tečnost čiji se nivo meri. Tečnost može biti provodna ili neprovodna.

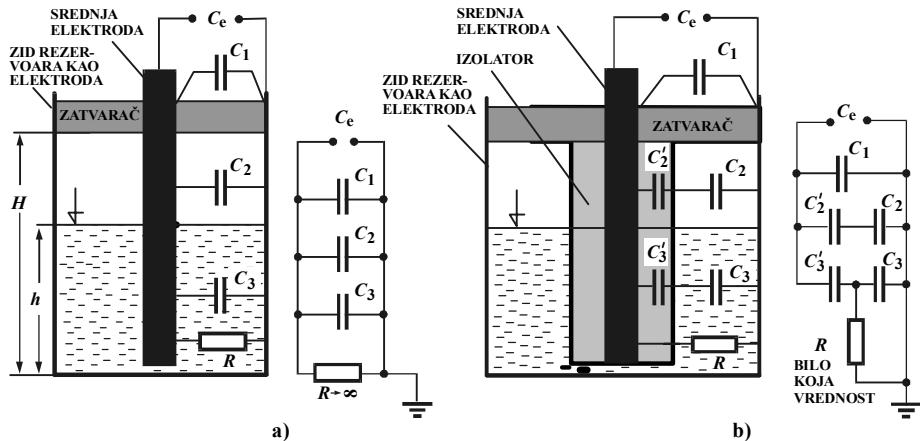
Neprovodne tečnosti imaju specifičnu provodnost manju od 10^{-6} S/cm . Metalne elektrode kapacitivne sonde fiksirane su pomoću zaptivača od izolatorskog materijala i potopljene u tečnost do visine h , a ostatak prostora između elektroda $H-h$ ispunjen je gasnom fazom (slika 19.5). Sonda je najčešće cilindrična (koaksijalna), pri čemu kao vanjska elektroda može da posluži i metalni zid rezervoara. Za neprovodne tečnosti, kao što su nafta i njeni derivati, otpor R između elektroda je beskonačan, pa je ekvivalentni kapacitet:

$$C_e = C_1 + C_2 + C_3 , \quad (19.6)$$

gde su: C_1 kapacitet između elektroda na segmentu gde je između njih izolator zatvarača, C_3 kapacitet između elektroda u tečnoj fazi i C_2 kapacitet u gasnoj fazi. Na osnovu relacije za kapacitet cilindričnog kondenzatora, dobija se da je ekvivalentni kapacitet proporcionalan sa merenim nivoom h :

$$C_e = C_1 + \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_t h}{\ln(D/d)} + \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_g(H-h)}{\ln(D/d)} . \quad (19.7)$$

U proračunima statičke karakteristike (19.7) kapacitivnog senzora za neprovodne tečnosti uzima da je C_1 konstanta i da je dielektrična konstanta ϵ_g gasa ili pare približno jednaka jedinici.



Slika 19.5. Kapacitivni senzori nivoa: a) cilindrični senzor nivoa neprovodnih tečnosti, b) senzor nivoa provodnih tečnosti (srednja elektroda izolovana)

Za merenje nivoa provodnih tečnosti, tj. tečnosti sa specifičnom provodnošću većom od 10^{-4} S/cm, unutrašnja elektroda presvučena je slojem kvalitetnog čvrstog izolacionog materijala, obično plastikom ili teflonom (slika 19.5b). Zbog izolacije otpor tečnosti nema uticaja na merenje i takva sonda primenljiva je za provodne i za neprovodne tečnosti. Ekvivalentni kapacitet proporcionalan je merenom nivou:

$$C_e = C_1 + \frac{C_1 C'_2}{C_1 + C'_2} + \frac{C_1 C'_3}{C_1 + C'_3} = k_3 + k_4 h. \quad (19.8)$$

Praktični problemi nastaju kada se na oblogu unutrašnje elektrode natalože provodljive nečistoće. Sa opadanjem nivoa, vlažni deo elektrode spaja se na masu, pa izlaz ostaje proporcionalan staroj, a ne aktuelnoj vrednosti nivoa. Uzemljenje može da se ostvari i zbog prodora vodene pare na mestu gde je priključen kabl ili zbog kondenzacije.

Tačnost kapacitivnih senzora je $\pm 0,5 - 2,5\%$, opseg im je od $0 - 0,4$ m do $0 - 20$ m, mogućnost primene u radnom mediju na temperaturi do 300°C i pritisku do 10 MPa . Poželjno je da sonda ima što veću promenu kapaciteta na mernom opsegu, a obično je $\Delta C > 10 \text{ pF}$. Kao što se vidi iz jednačina (19.7) i (19.8), kapacitet izolatora (zaptivača) i kapacitet priključnih vodova smanjuju osetljivost. Kao mera dobre konstrukcije senzora uzima se da odnos između maksimalne promene kapaciteta sonde ΔC i kapaciteta C_0 kada je rezervoar prazan bude $0,25 < \Delta C/C_0 < 4$. Zbog temperaturne zavisnosti dielektrične konstante prisutan je temperaturni drift od $0,2$ do $10 \text{ pF}/100^\circ\text{C}$.

Kapacitivni senzori pogodni su i za detekciju kontaktne površine između dve tečnosti, između tečnosti i gasova, te između čvrstih materijala i gasova. U tom slučaju kapacitivna sonda postavlja se horizontalno da bi se postigla što veća promena kapaciteta pri malim promenama nivoa. Ako su elektrode blizu jedna drugoj, senzor radi u prekidačkom režimu. Ovakvi signalizatori nivoa rade sa tačnošću od $\pm 10\text{mm}$. Za kontinualno praćenje pomeranja kontaktne površine, tj. nivoa, jedna elektroda je fiksirana u horizontalnom položaju, a druga elektroda je materijal čiji se

nivo meri. Pri tome materijal mora biti provodan, a takvi se mogu smatrati svi materijali koji imaju sadržaj vlage veći od 15%.

Dobre osobine kapacitivnih senzora su: jednostavnost konstrukcije, odsustvo pokretnih delova, otpornost na koroziju, a loše osobine su zavisnost tačnosti od promena koje utiču na dielektričnu konstantu materijala i pojava provodne obloge na sondi. Na kraju treba istaći da su kapacitivni senzori nivoa skuplji od ranije razmotranih.

Otpornički senzori nivoa primenjuje se za provodne tečnosti, za nivoe do 60 m, sa tačnoću $\pm 20 - 100$ mm. To su jednostavni i relativno jeftini senzori. Najbolji rezultati ovim senzorima postižu se u kontinualnom merenju suvih granulastih materijala u silosima. Otpor između elektroda je nelinearna funkcija nivoa h :

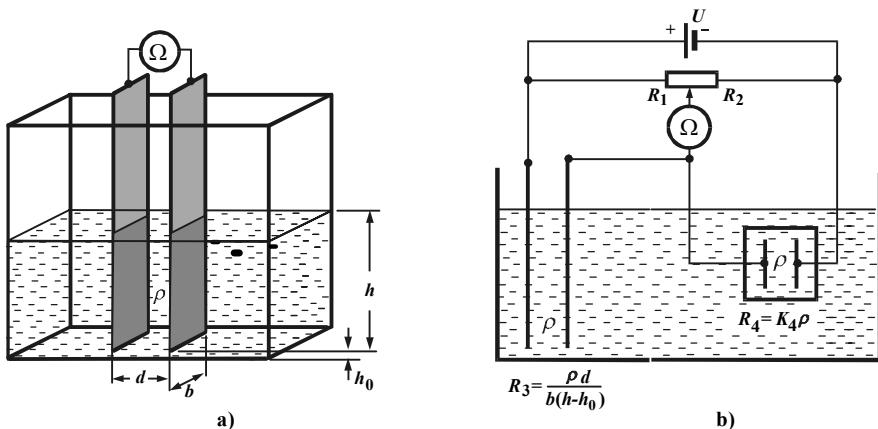
$$R = \rho \frac{d}{S} = \rho \frac{d}{b(h-h_0)}, \quad (19.9)$$

i meri se pomoću ommetra izbaždarenog u jedinicama nivoa (slika 19.6a).

Greške nastaju zbog toga što elektrode imaju izvesnu debjinu pa je njihova efektivna površina veća ($S' > b(h-h_0)$), zbog toga što su elektrode uronjene na visini h_0 od dna, te zbog zavisnosti specifičnog otpora tečnosti od hemijskog sastava i temperature. Eliminacija uticaja temperature i hemijskog sastava može se ostvariti pomoću uravnoteženog mernog mosta koji u susednoj grani ima dve elektrode poznate geometrije, uronjene u iti rezervoar na bilo kom mestu (slika 19.6b). Kada je most u ravnoteži, tada je $R_1 R_4 = R_2 R_3$, a odnos R_2/R_1 je linearan sa nivoom i nezavisan od ρ :

$$\frac{R_2}{R_1} = K_4 \rho \cdot \frac{b(h-h_0)}{\rho d} = K(h-h_0). \quad (19.10)$$

Vidi se da R_2/R_1 ne zavisi od promene ρ , a to znači ni od temperature i hemijskog sastava procesne tečnosti.



Slika 19.6. Otpornički senzor nivoa: a) princip rada, b) kompenzacija smetnji

19.2.5. Rezonantni senzori sa koncentrisanim RLC-parametrima

Princip rada. Rezonantni senzori su specijalni senzori koji rade na principu električne rezonanse. Kao sonda upotrebljava se električno kolo sa koncentrisanim RLC-parametrima, čija rezonantna frekvencija zavisi od konstrukcije i načina uzbude. U početku su to bili senzori sa kapacitivnim i induktivnim elementima, pri čemu se promena njihove impedanse, zavisno od nivoa, odražavala na rezonantnu frekvenciju mernog kola. Nestabilnost kapacitivne, odnosno induktivne sonde smanjuje tačnost i utiče na eksplatacione karakteristike. Očigledno je da se ovaj metod može primeniti za detekciju nivoa različitih medijuma, za detekciju metalnih i nemetalnih predmeta, kao i za praćenje velikog broja fizikalnih veličina čije se delovanje odražava na promenu nekog RLC-parametra.

Drugi pravac razvoja rezonantnih senzora proizilazio je iz tretiranja metalnog rezervoara sa tečnošću kao volumenskog rezonatora, koji može da stupi u rezonansu sa pobudnim elektromagnetskim oscilacijama odredene frekvencije. Geometrija rezervoara i elektromagnetski parametri tečnosti tokom merenja su konstantni. Praktični problemi u primeni nastaju zbog toga što je elektronski deo šeme potrebno prilagodavati izlaznim karakteristikama svakog pojedinog rezervoara-senzora, kao i zbog složenog pobudivanja i izbora tipa oscilacija za različite oblike rezervoara.

RLC-serijski senzor nivoa zasnovan je na promeni rezonantne frekvencije serijskog kola sa koncentrisanim RLC-parametrima (slika 19.7a). Kada se na posmatrano RLC-kolo priključi generator naizmeničnog napona $u(t) = U \sin \omega t$, u kolu će se formirati prinudne oscilacije struje:

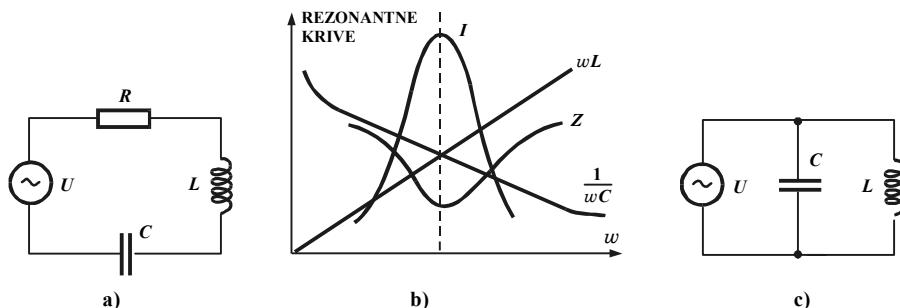
$$i(t) = \frac{1}{R + j(\omega L - 1/\omega C)} U \sin \omega t . \quad (19.11)$$

Maksimalna vrednost struje dobija se pri minimalnoj vrednosti impedanse, tj. kada je ostvaren uslov rezonanse:

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 , \quad (19.12)$$

i tada je frekvencija napona na ulazu u kolo jednaka prirodnoj frekvenciji kola:

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} . \quad (19.13)$$



Slika 19.7. Rezonantni senzor sa koncentrisanim RLC-parametrima: a) RLC-serijski senzor
b) rezonantne krive, c) LC-paralelni senzor

Ova pojava naziva se serijska rezonansa. Što god je aktivni otpor R manji, maksimum struje pri rezonansi postaje veći, a minimum impedanse manji. Za $R=0$ struja pri rezonansi postaje beskonačna, a impedansa $R=0$ (slika 19.7b). Poseban tip rezonarnih senzora su RF senzori koji rade na radio frekvencijama od nekoliko MHz.

LC-paralelni senzor ima izgled kao na slici 19.7c. Ako se na ovo kolo priključi generator harmonijskog signala, pri pojavi rezonanse struja u kolu biće jednaka nuli. Tada su struje u paralelnim granama jednake po iznosu i suprotnih faza, odnosno zadovoljen je uslov paralelne rezonanse:

$$Y = Y_1 + Y_2 = 0, \quad (19.14)$$

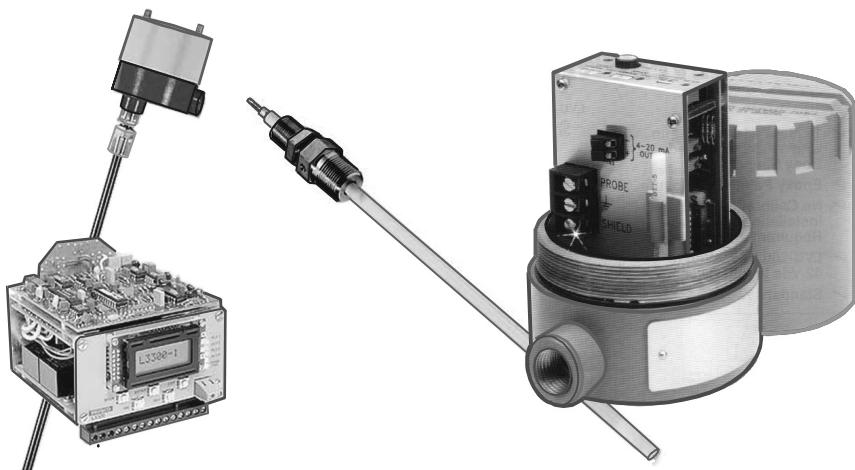
gde je Y admitansa, odnosno susceptansa kola. Uslov rezonanse (19.14) ispunjen je onda kada je frekvencija napona na ulazu jednaka prirodoj frekvenciji LC-kola:

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (19.15)$$

Rezonatni krug senzora može biti i složenija kombinacija RLC-elemenata, pa tada postoji više rezonantnih frekvencija.

Priklučivanje RLC-senzora na detektor rezonanse. Na ulazu senzora priključen je pobudni generator, a na izlazu detektor rezonanse (slika 19.8). Menjanjem frekvencije na generatoru kolo senzora dovodi se u rezonansu. Kada je serijsko RLC-kolo u rezonansi, na elementima L i C dobija se izlazni napon koji je Q puta veći od napona pobudnog generatora. Veličina $Q=X_L/R=X_C/R$ označava se kao dobrota ili faktor kola. Kada je paralelno LC-kolo u rezonansi, struja elemenata L i C veća je Q puta od struje u zajedničkoj (dovodnoj) grani kola.

Senzor nivoa u slučaju rezonantnih električnih kola može biti kondenzator ili kalem. Prisustvo mernog medijuma menja kapacitet C ili induktivnost L , što se odražava na rezonantna svojstva kola.



Slika 19.8. Izgled sonde i interfejsa RF senzora nivoa

19.2.6. Rezonantni senzor kao odsečak dugog voda

Princip rada. Treći tip električnih rezonantnih senzora ima najveći značaj. Primarni element je u obliku odsečka homogenog ili nehomogenog voda čija se rezonantna frekvencija menja u zavisnosti od njegove uronjenosti u tečnost, tj. u zavisnosti od nivoa.

Dugi vod. Dugim vodom smatra se vod čija je dužina $l > \lambda/4$ pri čemu je λ talasna dužina elektromagnetskog vala, koji se prenosi vodom. RLC-parametri dugog voda nisu koncentrisani, već su raspodeljeni: L' , C' , R' i G' predstavljaju induktivnost, kapacitivnost, aktivni otpor i aktivni odvod po jedinici dužine. Na vod je priključen generator visoke kružne učestanosti ω . Promena napona i struje u vodu sa raspodeljenim parametrima u zavisnosti od rastojanja x od kraja voda opisuje se, u opštem slučaju, poznatim jednačinama:

$$U(x) = U_2 \operatorname{ch} \gamma x + I_2 Z_c \operatorname{sh} \gamma x \quad I(x) = \frac{U_2}{Z_c} \operatorname{sh} \gamma x + I_2 Z_c \operatorname{ch} \gamma x, \quad (19.16)$$

gde su:

- U_2 i I_2 amplituda napona i struje na kraju voda ($x = 0$),
- $\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L')/(G' + j\omega C')} = \alpha + j\beta$ konstanta prostiranja (α konstanta prigušenja, β fazna konstanta) i
- $Z_c = \sqrt{(R' + j\omega L')/(G' + j\omega C')}$ karakteristična impedansa voda.

Brzina prostiranja napona kao elektromagnetskog talasa je $v = \omega/\beta$, pri čemu se njegova talasna dužina određuje kao dučina na kojoj se faza promeni za ugao 2π , odnosno: $\lambda = 2\pi/\beta = v/f$.

Vod sa malim gubicima. Za tehniku rezonatnih senzora interesantan je dugi vod sa malim gubicima, odnosno vod u oblasti visoke frekvencije ($f > 3 \text{ MHz}$), gde su $R' \ll \omega L'$ i $G' \ll \omega C'$. Karakteristična impedansa $Z_c = \sqrt{j\omega L'/j\omega C'} = \sqrt{L'/C'}$ je čisto aktivna otpornost nezavisna od učestanosti. Istovremeno je takav vod bez izobličenja jer je $\gamma = \sqrt{(j\omega L')(j\omega C')} = j\omega \sqrt{L'/C'}$, tj. $\alpha = 0$ i $\beta = \omega \sqrt{L'/C'}$.

Pomoću veza između hiperbolnih i trigonometrijskih ($\operatorname{ch} \gamma x = \cos \beta x$ i $\operatorname{sh} \gamma x = j \sin \beta x$) opšte jednačine (19.16) mogu se napisati u sledećem obliku:

$$U(x) = U_2 \cos \beta x + j I_2 Z_c \sin \beta x \quad I(x) = j \frac{U_2}{Z_c} \sin \beta x + I_2 \cos \beta x. \quad (19.17)$$

Vod sa malim gubitkom i kratko spojenim krajem ima napon na kraju voda $U_2(x) = 0$, tako da prethodne jednačine postaju jednostavnije:

$$U(x) = j I_2 Z_c \sin \beta x \quad I(x) = I_2 \cos \beta x. \quad (19.18)$$

Kada se na kratko spojeni vod priključi generator harmonijskog signala visoke frekvencije, od generatora se prostiru direktni talasi prema kraju voda. Na kraju voda nema potrošnje energije i talasi se u celosti odbijaju. Amplitudne odbijenih talasa napona i struje zato su jednake amplitudama direktnih talasa, ali imaju suprotan predznak. Superpozicijom direktnih i odbijenih talasa obrazuje se stojeći talas, odnosno nastaju oscilacije. Njihov karakter zavisi od ulazne impedanse voda.

Impedansa na početku voda kome je kraj kratko spojen računa se iz odnosa napona i struje pri $x = l$:

$$Z_{ul} = jZ_c \operatorname{tg} \beta l. \quad (19.19)$$

Ulagana impedansa kratko spojenog voda bez gubitaka je reaktivna i može da ima bilo koju vrednost od $-\infty$ do $+\infty$. Analiza izraza (19.19) pokazuje da je impedansa pozitivna (induktivna) za $2k\pi/2 < \beta l < (2k+1)\pi/2$, odnosno kada je dužina voda u granicama parnih četvrtina talasne dužine:

$$2k\lambda/4 < l < (2k+1)\lambda/4, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (19.20)$$

Ukupna impedansa je negativna (kapacitivna) za $(2k+1)\pi < \beta l < (2k+2)\pi/2$, tj. kada je dužina voda u granicama parnih četvrtina talasne dužine:

$$(2k+1)\lambda/4 < l < (2k+2)\pi/4. \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (19.21)$$

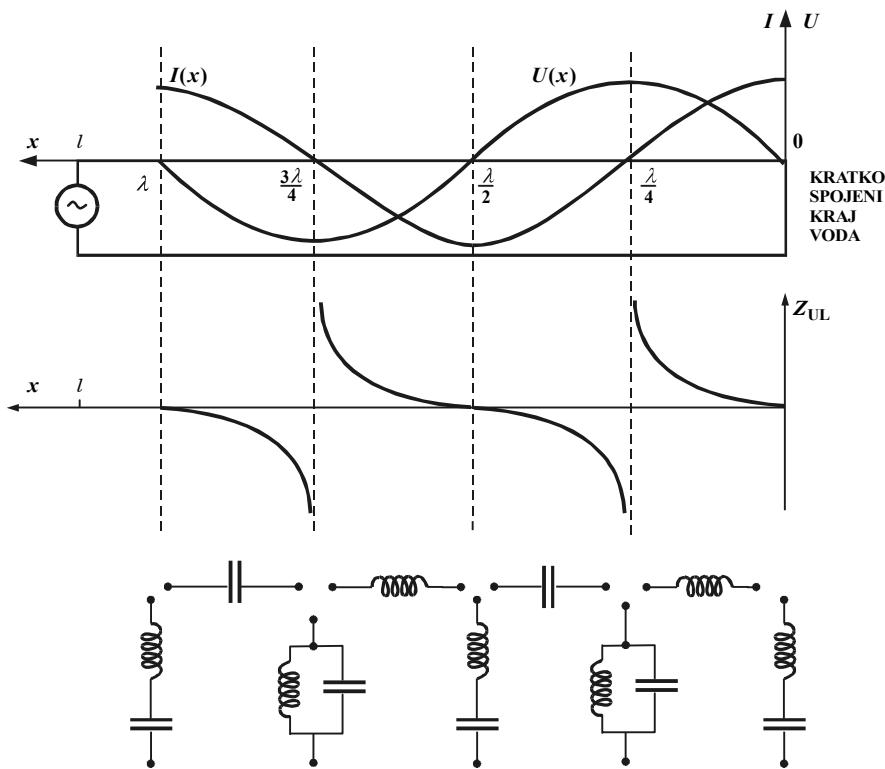
Sa porastom βl , odnosno sa povećanjem dužine voda za $\lambda/4$ uskcesivo se menja karakter ulagane impedanse voda. U tačkama $l = (2k+1)\lambda/4$ napon je maksimalan, a struja ima vrednost nula, pa je ulagana impedansa beskonačna. U tačkama gde je $Z_{ul} = \infty$ odsečak voda može se predstaviti paralelnim rezonantnim kolom, a u tačkama $l = (2k+2)\lambda/4$ gde je $Z_{ul} = 0$ serijskim rezonantnim kolom (slika 19.9). Najmanja dužina voda koja obezbeđuje pojavu paralelne rezonanse je $l_{min} = \lambda/4$, a za serijsku rezonansu minimalna dužina je $\lambda/2$.

Na sličan način može se razmotriti otvoreni vod, tj. vod koji je opterećen beskonačnom impedansom $Z_t = \infty$. Za takav vod ulagana impedansa je $Z_{ul} = -jZ_c \operatorname{ctg} \beta x$.

Četvrtvalni rezonantni senzor. Senzor čija je dužina jednaka parnom broju polovina talasnih dužina označava se kao poluvalni senzor, a senzor čija je dužina jednaka neparnom broju četvrtina talasnih dužina naziva se četvrtvalni senzor. Za merenje nivoa primenjuju se oba senzora. Poluvalni senzor analogan je serijskom rezonantnom kolu, a četvrtvalni je analogan paralelnom rezonantnom kolu.

Četvrtvalni senzor ponaša se kao paralelno rezonantno kolo za beskonačan broj frekvencija. Osnovna frekvencija odgovara prirodoj frekvenciji, određenoj iz uslova rezonanse (19.15). Teoretski posmatrano, tada je $Z_{ul} = \infty$. Rezonantne krive, međutim, slične su kao i kod kola sa koncentrisanim parametrima jer realni vod ima konačnu impedansu pri rezonansi:

$$Z_{ul} = \frac{Z_c}{\alpha l}. \quad (19.22)$$



Slika 19.9. Karakteristike voda kratko spojenog na kraju

Frekventna karakteristika rezonantnog senzora i njeni parametri. U zavisnosti od stepena uronjenosti dugog voda menja se njegova rezonantna frekvencija. Frekventna karakteristika treba da je linearna i invarijantna na delovanje okoline. Rezonantna frekvencija senzora u opštem slučaju je funkcija tipa i konstrukcije voda k , dužine voda l , elektromagnetskih svojstava merenog medijuma (ϵ_2, μ_2) i medijuma koji se nalazi iznad merenog (ϵ_1, μ_1), kapaciteta ulazog kola i priključnih vodova C_{ul} , te merenog nivoa h :

$$\omega_0 = \Psi(k, l, \epsilon_1, \mu_1, \epsilon_2, \mu_2, C_{ul}, h). \quad (19.23)$$

Rezonantna frekvencija senzora uronjenog u provodnu sredinu direktno je proporcionalna sa nivoom, dok je za senzor u neprovodnoj sredini ova promena obrnuto proporcionalna (slika 19.10). Ovo se može pokazati na primeru četvrtvalnog senzora. Brzina prostiranja elektromagnetskog vala u vodu koji se nalazi u vazduhu je $v = \lambda f$. Pri uslovu rezonanse za četvrtvalni senzor je $\lambda = 4l$, tako da se kombinacijom ovih dveju relacija dobija jednačina:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{4l}. \quad (19.24)$$

Ako je četvrtvalni senzor uronjen u provodnu tečnost, njegova dužina prividno se smanjuje na aktivnu dužinu $l-h$ (slika 19.10a). Proporcionalno se mora

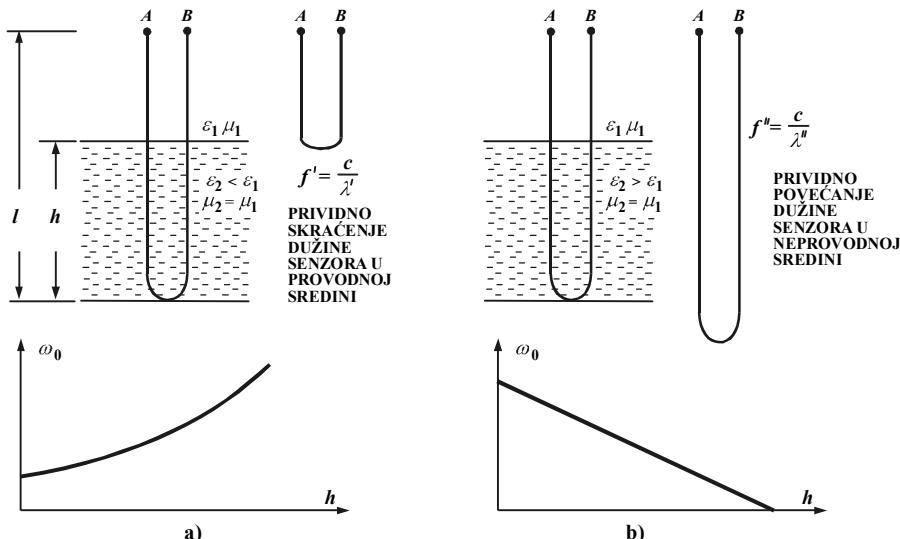
smanjiti talasna dužina λ , odnosno povećati frekvencija f , saglasno jednačini (19.24). U tom slučaju jednačina (19.24) može da se napiše u obliku:

$$f' = \frac{c}{\lambda'} = \frac{c}{4(l-h)} . \quad (19.25)$$

Ako je senzor uronjen u neprovodnu tečnost sa dielektričnom i magnetnom propusnošću većom nego kod vazduha ($\epsilon_2 > \epsilon_1$, $\mu_2 > \mu_1$), valovi se prostiru manjom brzinom $v = c/\sqrt{\epsilon_2\mu_2}$. Zbog toga se dužina senzora prividno produžava (slika 19.10b). Rezonantna frekvencija inverzna je vremenu za koje valovi prođu kroz senzor: $1/f'' = 4(l-h)/v_1 + 4hv_2$, pa jednačina (19.23) sada ima oblik:

$$f'' = \frac{c}{\lambda''} = \frac{c}{4(l-h)\sqrt{\epsilon_1\mu_1} + 4h\sqrt{\epsilon_2\mu_2}} , \quad (19.26)$$

iz koje se vidi da je porast merenog nivoa h praćen smanjivanjem rezonantne frekvencije ($\omega = 2\pi f$). Obično se meri nivo nemagnetne tečnosti iznad koje se nalazi vazduh ($\epsilon_1 = 1$, $\mu_1 = \mu_2 = 1$), pa se prethodna jednačina može pojednostaviti.



Slika 19.10. Promena frekventne karakteristike rezonantnog senzora: a) četvrtvalni senzor u provodnoj tečnosti, b) četvrtvalni senzor u neprovodnoj tečnosti

Kvalitet frekventne karakteristike konkretnog rezonantnog senzora opisuju sledeći parametri:

- Osetljivost izlazne frekvencije na promenu nivoa:

$$S = \Delta\omega/\Delta h , \quad (19.27)$$

koja, u opštem slučaju, zavisi od izbora radne tačke i samo u linearном delu karakteristike ima konstantnu vrednost;

- Opseg prekrivanja frekvencija:

$$O_{\text{pf}} = \frac{|\omega_1 - \omega_2|}{\omega_1} \cdot 100\%, \quad (19.28)$$

gde su ω_1 i ω_2 rezonantne frekvencije senzora u vazduhu i u mernoj sredini (tipične vrednosti su 30 – 80%);

- Linearnost, tj. odstupanje realne frekventne karakteristike od idealne, a definiše se kao odnos nagiba realne karakteristike u radnoj tački i nagiba linearne karakteristike sa istim opsegom prekrivanja frekvencija:

$$l = \frac{\Delta\omega/\Delta h}{(\omega_1 - \omega_2)/l} \cdot 100\% \quad (19.29)$$

(tipične vrednosti 0,6-1%);

- Segment frekventne karakteristike sa povećanom osetljivošću:

$$\Delta\omega = \frac{\Delta\omega_s}{\omega_1 - \omega_2} \cdot 100\% : \quad (19.30)$$

- Koeficijent prenosa, koji se definiše kao odnos napona na izlazu senzora pri rezonansi i naponu generatora:

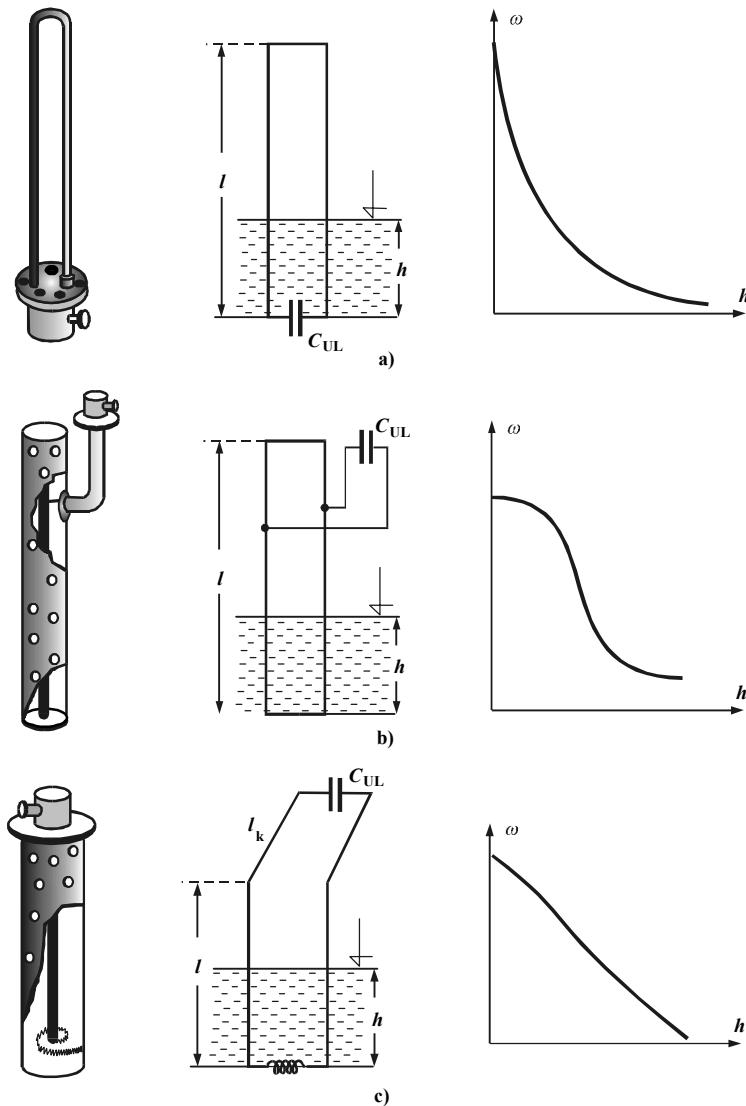
$$K = \frac{U_{\text{izl}}}{U_g}. \quad (19.31)$$

Gradnja rezonantnih senzora nivoa. Ovi senzori prave se od odsečka simetričnog vazdušnog voda, oklopljenog simetričnog voda ili koaksijalnog voda. Konstruktivne osobine i oblik frekventne karakteristike određuju četiri osnovna tipa senzora:

- 1) četvrтvalni kratko spojen na kraju
- 2) četvrтvalni kratko spojen na početku
- 3) poluvalni kratko spojen na kraju
- 4) senzor sa linearizovanom frekventnom karakteristikom.

Električne osobine navedenih senzora malo se razlikuju pri istim uslovima upotrebe, tj. kada su priključeni na istu mernu šemu i kada rade u istoj sredini. Najprostija izvedba je na bazi dvoprovodnog simetričnog voda. Oklopljeni vodovi su složeniji za analizu, ali omogućavaju zaštitu od elektromagnetskih smetnji. Oklop je perforiran da bi se smanjila težina sonde, čak i do 70%. Na slici 19.11 prikazane su karakteristične izvedbe rezonantnih senzora na bazi odsečka dugog voda zajedno sa ekvivalentnim šemama i frekventnim karakteristikama.

Proračun rezonantne frekvencije odsečka dugog voda koji je delimično uronjen u tečnost i koji je kratko spojen na kraju (dnu ili vrhu) zasniva se na



Slika 19.11. Konstrukcija rezonantnih senzora nivoa: a) četvrtvalni senzor na bazi simetričnog voda kratko spojenog na kraju (vrhu), b) poluvalni senzor na bazi oklopljenog koaksijalnog voda kratko spojenog na kraju (vrhu), c) četvrtvalni senzor na bazi oklopljenog koaksijalnog voda sa induktivnim spojem na kraju (dnu) i produžnim kompenzacijonim kablovima

činjenici da je ukupna ulazna impedansa jednaka sumi impedansi potopljenog i nepotopljenog dela, odnosno da je na granici ispunjen uslov:

$$Z_c \operatorname{tg} \beta_1(l-h) = -Z_c \operatorname{tg} \beta_2 h, \quad (19.32)$$

gde su $\beta_1 = \omega/v_1 = 2\pi f \sqrt{\epsilon_1 \mu_1} / c$ i $\beta_2 = \omega/v_2 = 2\pi f \sqrt{\epsilon_2 \mu_2} / c$ fazne konstante prostiranja kroz suvi i mokri (uronjeni) deo senzora. Ako je suvi deo u vazduhu, može se uzeti

da je $\beta_1 = 2\pi f/c$. Za većinu merenih tečnosti je $\mu_2 = 1$, pa je $\beta_2 = \beta_1 \sqrt{\epsilon_2}$. I pored razmotrenih pojednostavljenja, određivanje rešenja jednačine (19.32) analitičkim putem je teško zbog njenog transcendentnog karaktera.

Obično je detektor rezonantne frekvencije smešten neposredno na senzoru. Takav spoj predstavlja kapacitivno opterećenje koje je paralelno priključeno na ulaznu impedansu nepotopljenog dela senzora. To utiče na pojavu nelinearnosti statičke karakteristike. Da bi se dobila linearna karakteristika u širokom opsegu, primenjuju se specijalne modifikacije u konstrukciji senzora. Za četvrtvalni senzor kratko spojen na kraju nelinearni efekti pri malim vrednostima nivoa h koriguju se primenom dužeg priključnog voda, koji povećava C_{ui} . Smanjenje nelinearnih efekata pri velikim vrednostima h , odnosno kada je sonda gotovo cela uronjena u tečnost, postiže se povećanjem induktivnosti kratkog spoja ili uvodenjem korekcionih induktiviteta.

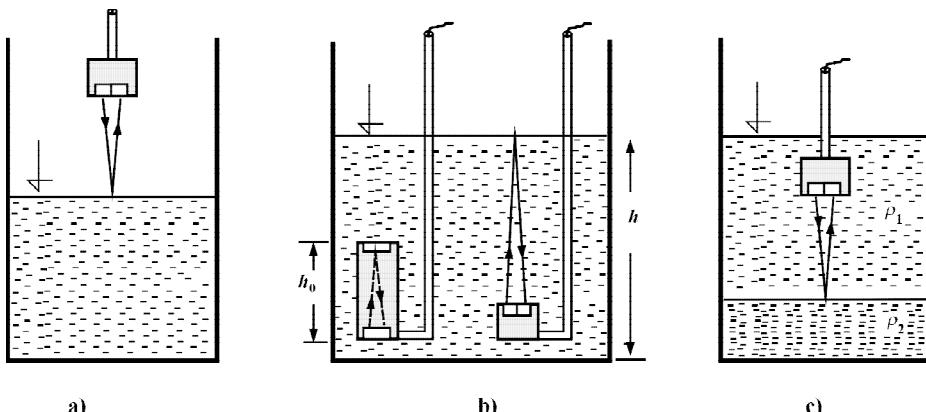
Tipični podaci za sondu na bazi odsečka dugog voda su: merni opseg od 50 – 300 mm pa do 100 – 5 000 mm, tačnost $\pm 0,5$ – 2%, normalni temperaturni uslovi rada od -20°C do $+55^{\circ}\text{C}$, opseg radne frekvencije 3 – 60 MHz, tačnost signalizacije do ± 1 mm u odnosu na definisani nivo signalizacije.

19.2.7. Ultrazvučni senzori nivoa

Odbijanje zvučnih, ultrazvučnih i mikrotalasnih zračenja od razdelne površine između dva fluida efikasno se primenjuje u tehniči merenja nivoa (slika 19.12a). Ovaj način poznat je kao princip sonara: emitovani talas putuje do površine od koje se odbija kao echo signal, a nivo je proporcionalan ukupnom vremenu T za koje talas pređe od izvora do prijemnika zračenja:

$$h = \frac{v}{2} T, \quad (19.33)$$

gde je v brzina zvučnih talasa, zavisna od mernog medijuma i temperature.



Slika 19.12. Ultrazvučni senzor nivoa: a) osnovna izvedba, b) izvedba sa referentnom sondom, c) merenje nivoa razdelne površine dveju tečnosti

Promena brzine v zbog varijacija temperature i pritiska eliminiše se pomoću referentne sonde (slika 19.12b). Kao izvor ultrazvuka uzima se kvarčni ili keramički piezoelement, koji se pobuđuje električnim impulsima frekvencije do 100 kHz. Vreme prelaza u mernom i referentnom kanalu:

$$T_1 = \frac{2h}{v} \quad \text{i} \quad T_{h0} = \frac{2h_0}{v}, \quad (19.34)$$

određuje se sa visokom tačnošću, brojanjem klok impulsa. Merna šema na koju su priključene sonde daje izlaz nezavisan od temperature i pritiska medijuma. Ultrazvučnim senzorom moguće je meriti i udaljenost razdelne površine između dva fluida (slika 19.12c). Osnovne odlike ultrazvučnih senzora (sonara) su: tipični opseg 0–1 m do 1–10 m, tačnost $\pm 0,25\text{--}2,5\%$ opsega, rezolucija 3 mm, izlazni signal 4–20 mA, napon napajanja 16–36 V_{DC}, radna temperatura od -40°C do $+60^{\circ}\text{C}$, pritisak do 20 MPa, kućište plastično ili metalno, moguća je primena za provodne i neprovodne tečnosti, čiste i prljave. Za pravilan rad ultrazvučnih senzora neophodna je mirna površina i odsustvo lažnih signala, refleksa sa bočnih zidova ili sa svoda rezervoara.



Slika 19.13. Izgled ultrazvučnih senzora nivoa

19.2.8. Signalizatori diskretnih vrednosti nivoa

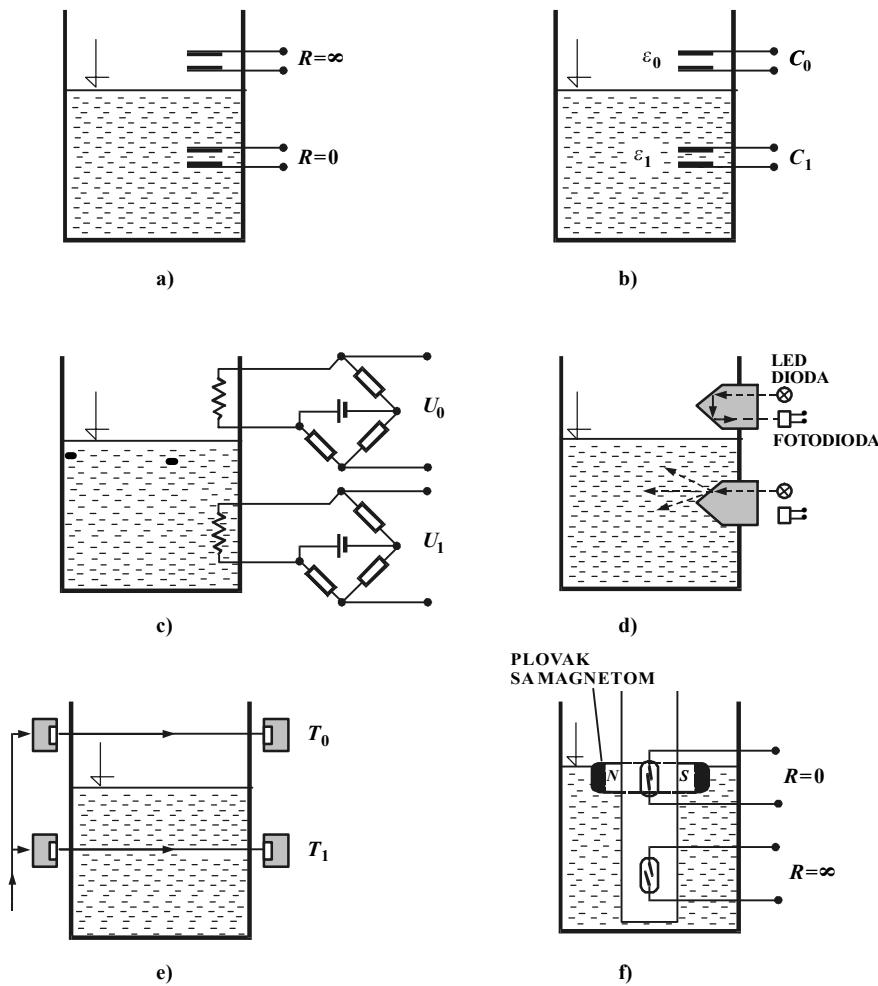
Detekcija diskretnih vrednosti nivoa ima veliki značaj u procesnoj tehnici. Signalizatori diskretnih vrednosti su u suštini prekidači koji detektuju minimalni ili maksimalni nivo u rezervoaru. Sa više signalizatora u nizu povećava se rezolucija, a izlazni signal tada može biti kodiran.

Najjednostavnija izvedba za provodne tečnosti je u obliku kontaktnog otpornika. Prisutnost provodne tečnosti svodi otpor između kontakata na nulu, a kada nivo tečnosti opadne ispod signalizatora, otpor između kontakata postaje beskonačan (slika 19.14a). Za neprovodne tečnosti upotrebljavaju se pločasti kondenzatori umesto

prekidača (slika 19.14b). Disipacija topline sa otpornika kroz koji teče struja je 4–5 puta veća u tečnosti nego u vazduhu, pa je njegova temperatura tada manja. Promenom otpornosti dolazi do razbalansiranja Vitstomovog mosta (slika 19.14c).

Optoelektronski signalizatori su beskontaktni i pogodni su za signalizaciju nivoa zapaljivih i eksplozivnih tečnosti. Optoelektronski signalizatori sastoje se od optičke prizme i optoelektronskog para – LED-diode i fotodiode. Prizma je obradena tako da se zrak iz LED-diode u potpunosti reflektuje do fotodiode kada je prizma u vazduhu. Ako je prizma potopljena u tečnost, svetlost iz LED-diode prelama se i rasipa u tečnost, a samo mali deo dolazi do fotodiode (slika 19.14d).

Ultrazvučni signalizatori pogodni su i za provodne i neprovodne tečnosti. Zvučni otpor između predajnika i prijemnika zvuka u vazduhu je veći nego u tečnosti, pa je vreme preleta kraće (slika 19.14e).



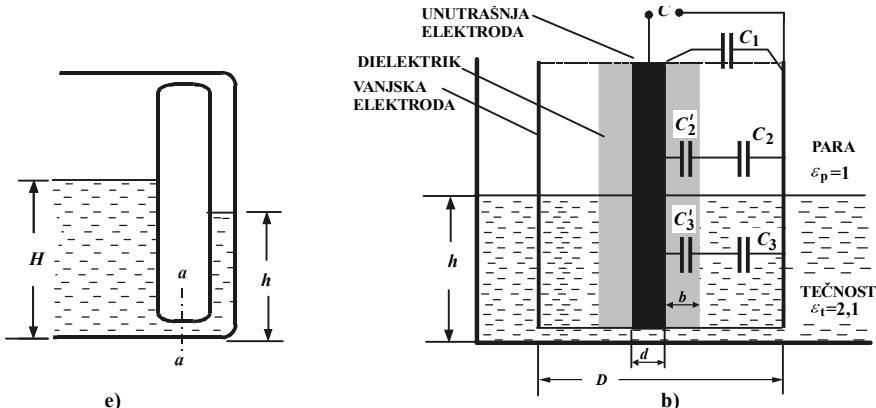
Slika 19.14. Signalizatori diskretnih vrednosti nivoa: a) otpornički, b) kapacitivni, c) termički, d) optoelektronski, e) ultrazvučni, f) magnetni

Za detekciju kritičnih vrednosti nivoa često se primenjuju magnetni senzori na bazi rid-releja (reed-switch), (slika 19.14f). Elastični kontakti releja napravljeni su od feromagnetskog materijala i hermetički zatvoreni u staklenoj kapsuli. Kapsula je fiksirana na definisanom nivou. Kada prstenasti plovak sa stalnim magnetom dostigne taj nivo, elastični kontakti releja se magnetišu i privlače. Konstrukcija signalizatora na bazi rid-releja obezbeđuje visoku pouzdanost, veliki broj preključivanja, te neosetljivost na vibracije i temperaturu okoline. Tačnost preključivanja je $\pm 0,5 - 3\%$ opsega.

PITANJA I ZADACI

- 1) Sistematisovati principe rada detektora diskretnih vrednosti nivoa.
- 2) Nivo vode H u parnom kotlu meri se vodomernim stakлом (slika 19.15a). Pritisak pare u kotlu je $p = 100$ bar, a temperatura vode je $t = 150^\circ\text{C}$. Odrediti nivo vode na vodomernom staklu h kada je stvarni nivo vode u kotlu $H = 0,5$ m. Gustina vode u kotlu na datoј temperaturi je $\rho_{vk} = 691,9 \text{ kg/m}^3$, a u vodomernom staklu je $\rho_{vs} = 922,1 \text{ kg/m}^3$.

Rešenje: $p + \rho_{vk}gH = p + \rho_{vs}gh$, $h = H\rho_{vk}/\rho_{vs} = 0,375 \text{ m}$.



Slika 19.15.

- 3) Odrediti koeficijent osetljivosti $S = \Delta C / \Delta h$ za kapacitivni senzor neprovodne tečnosti ($\epsilon_t = 2,1$) u rezervoaru u kome je maksimalni nivo $H_{max} = 8 \text{ m}$, (slika 19.15b). Iznad tečnosti je njena para ($\epsilon_p = 1$). Kokasijalni senzor dužine $I = 8 \text{ m}$ ima unutrašnju elektrodu prečnika $d = 1,5 \text{ mm}$ na kojoj je sloj dielektrika ($\epsilon_d = 4,2$) debljine $b = 1 \text{ mm}$ i vanjsku cilindričnu elektrodu prečnika $D = 60 \text{ mm}$. Parazitni kapacitet na priključcima senzora je $C_1 = 75 \text{ pF}$.

Rezultat: $C = C_1 + C_2 || C'_2 + C_3 || C'_3$, gde su: $C_2 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_p(I-h)}{\ln \frac{D}{d+2b}}$, $C'_2 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_d(I-h)}{\ln \frac{d+2b}{d}}$, $C_3 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_t h}{\ln \frac{D}{d+2b}}$ i $C'_3 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_t h}{\ln \frac{d+2b}{d}}$; $S = \frac{\Delta C}{\Delta h} = \frac{C(h) - C(0)}{H_{max}} = \frac{3998,4 - 1943,3 \text{ pF}}{8 \text{ m}} = 256,88 \text{ pF/m}$

- 4) Na primeru četvrtvalnog senzora objasniti tipične oblike frekventnih karakteristika pri merenju nivoa provodnih i neprovodnih tečnosti.

LITERATURA

1. E. Humo: *Principi i elementi sistema automatskog upravljanja*, Svjetlost, Sarajevo, 1987.
2. V.A. Viktorov: *Rezonantnyj metod izmerenija urovnja*, Energija, Moskva, 1969.
3. N. Kolaković: *Jedan pristup sintezi mernog pretvarača nivoa na bazi rezonancije*, magistarski rad, Elektronski fakultet u Nišu, Niš, 1982.
4. K.S. Polupljak: *Rezonansnye metody izmerenij*, Energija, Moskva, 1980.
5. D. Suvajdžić: *Fizičko-tehnička mjerenja*, skripta, Elektrotehnički fakultet u Sarajevu, Sarajevo, 1974.
6. *Liquid Level Measurement, Control & Alarms*, Catalog 1990, Uehling Tank-O-Meter, UEHLING INSTRUMENT COMPANY, NY.
7. *Cap-Level II Series*, Level and Material Handling Controls, Catalog 12/86 T/P, BINDICATOR, A Division of Berwind Instrument Group, Hannover.
8. *Liquid Level Switches*, Section 8300, OIL-RATE Corp., Manitowoc.
9. *Liquid Level Gages*, Section 8200, OIL-RATE Corp., Manitowoc.
10. *Instrument Engineer's Handbook*, ed. B.Liptak, Chilton Book Company, Philadelphia, 1969.
11. N.G. Farzane, N.V. Iljasov, A.J. Asim-Zade: *Tehnologičeskie izmerenija i pribory*, Visšaja škola, Moskva, 1989.
12. G.Vass: *The principles of level measurement*, www.sensorsmag.com/articles/1000/55/main.shtml
13. *Konstrukcija i primena senzora nivoa*: www.lesman.com, www.hitechtech.com, www.senix.com

20

SENZORI PROTOKA

20.1. OSNOVI TEHNIKE MERENJA PROTOKA

Protok je količina sipkastog materijala, tečnosti ili gasa koja protekne kroz posmatrani poprečni presek za jedinicu vremena.

Količina se izražava u jedinicama mase ili zapremine, pa se razlikuju:

a) maseni protok: $Q_m = \frac{dm}{dt}$ [kg/s]; (20.1)

b) volumenski protok: $Q_v = \frac{dV}{dt}$ [m³/s]. (20.2)

Egzaktniji je maseni protok jer opisuje stvarnu količinu materije u kretanju. Volumenski protok zavisi od gustine, pritiska i temperature materije, te od lokalne gravitacije. Senzor protoka naziva se protokometrom.

Količina fluida koja je protekla kroz protokometar u vremenskom intervalu $\Delta t = t_2 - t_1$ računa se integriranjem jednačina (20.1) i (20.2), odnosno:

$$m = \int_{t_1}^{t_2} Q_m dt \quad \text{i} \quad V = \int_{t_1}^{t_2} Q_v dt. \quad (20.3)$$

Senzor koji meri i integrira protok naziva se senzor protoka i količine.

Odnos masenog i volumenskog protoka. Protok sipkastog materijala obavezno se izražava kao maseni, a protok tečnosti i gasova obično kao volumenski. Maseni i volumenski protok povezani su relacijom:

$$Q_m = \rho Q_v = \rho \frac{dV}{dt}. \quad (20.4)$$

Jednačina (20.4) predstavlja osnovu volumetrijskih metoda merenja protoka.

Odnos brzine i protoka proizilazi iz principa konzervacije mase, izražene poznatom jednačinom kontinuiteta:

$$Q_m = \rho \int_S v dS, \quad (20.5)$$

gde je v [m/s] srednja brzina u posmatranom poprečnom preseku. Jednačina (20.5) predstavlja osnovu brzinskog (kinematičkog) merenja protoka.

Protok gasova. Merenje protoka gasova zavisi od njihove temperature i pritiska. Zato se protok gasova izražava u odnosu na normalno stanje gase, koje je definisano pritiskom $p_n = 101\,325 \text{ Pa}$ i temperaturom $T_n = 293,15 \text{ K}$, pri relativnoj vlažnosti $\varphi = 0\%$, tako da je:

$$Q_m = \rho Q_v = \rho_n \frac{p T_n}{p_n T_k} Q_v, \quad (20.6)$$

gde se koeficijentom k koriguje neidealnost gasova pri visokim pritiscima.

Protok sipkastog materijala svodi se na merenje težine. U industrijskim procesima sipkasti materijali obično se prenose transportnim trakama, koje se kreću brzinom v . Deo trake (dužine l) služi kao tas ispod kojeg je smešten senzor sile (težine), koji na svom izlazu daje maseni protok:

$$Q_m = mv/l [\text{kg/s}]. \quad (20.7)$$

Konstrukcija i eksploracija senzora protoka i količine zavise od metroloških karakteristika senzora i osobina fluida. Savremeni senzori protoka i količine treba da zadovolje sledeće zahteve:

- Visoka tačnost merenja. U inženjerskim primenama tipična tačnost senzora protoka je $\pm 1\text{--}2\%$, ali je često potrebna i veća tačnost $\pm 0,2\text{--}0,5\%$.
- Visoka pouzdanost. Ovaj zahtev teško je ispuniti jer hemijska agresivnost fluida i nečistoće smanjuju tačnost i vek trajanja senzora.
- Nezavisnost rezultata merenja od gustine fluida. Ovaj zahtev je bitan kod merenja protoka gasova čija gustoća zavisi od temperature i pritiska.
- Brzina odziva. Veća brzina odziva zahteva se kod merenja brzo promenljivog protoka i u sistemima automatske regulacije protoka.
- Korisni merni opseg. Obično se vrednost senzora protoka izražava pomoću odnosa Q_{\max}/Q_{\min} , čije su tipične vrednosti 3–10.
- Vrsta merenog medija. Konstrukcione osobine protokometara zavise od toga da li su namenjeni za sipkaste materijale, tečnosti, gasove ili smeše.
- Opseg merenja. Protok tečnosti meri se u opsegu $10^{-6}\text{--}10^4 \text{ kg/s}$, a gasova u opsegu $10^{-8}\text{--}10^2 \text{ kg/s}$. Obično se merni opseg deli na oblast malog protoka (do $15 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$), oblast srednjeg protoka ($15 \cdot 10^{-4}\text{--}0,5 \text{ m}^3/\text{s}$) te oblast velikih protoka (od $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ pa naviše).
- Vrsta tečenja i tip kanala. Tok fluida je laminaran ili turbulentan, a ostvaruje se u zatvorenim ili otvorenim kanalima.
- Delovanje okoline. Merenje protoka vrši se u širokom rasponu temperature (od -250°C do $+600^\circ\text{C}$).

20.2. SENZORI VOLUMETRIJSKOG PROTOKA

20.2.1. Princip volumetrijskog merenja protoka

Volumetrijsko merenje protoka zasniva se na tretiranju volumena supstance koja protiče kroz posmatrani poprečni presek na osnovu merenja nekog parametra. Merni parametar rezultat je medusobnog delovanja toka fluida i tela postavljenog u tok. Telo može biti fiksirano ili pokretno. Nepokretno telo je tzv. prigušnica, a merni parametar tada je diferencijalni pritisak. Oko 66% svih senzora protoka su ovoga tipa. Kod volumetrijskih senzora brzinskog tipa (elektromagnetski, ultrazvučni, vrtložni, senzori sa Doplerovim efektom) meri se srednja brzina fluida u poprečnom preseku S , a protok Q_v se dobija pomoću jednostavne jednačine: $Q_v = vS$.

20.2.2. Senzori sa prigušnicom

Prigušnica menja odnos potencijalne i kinetičke energije, što uz poznatu geometriju, omogućava da se merenjem diferencijalnog pritiska na prigušnici jednoznačno odredi protok. Najviše se upotrebljava prigušnica u obliku prstena, koji se naziva dijafragma, zaslon ili merna blenda. Drugi oblici prigušnice su sapnica, Venturijeva sapnica i Venturijeva cev (slika 20.1a).

Princip merenja diferencijalnog pritiska ilustrovan je na primeru merne blende (slika 20.1b). Ispred i iza merne blende su otvori za priključivanje diferencijalnog manometra. Optimalni položaj otvora za p_1 je u mirnom toku, a za p_2 na mestu suženja strujnica (vena contracta). U praksi se primenjuju otvori uz samu mernu blendu, izbušeni pod pravim ili oštrim uglom. Na osnovu zakona o očuvanju energije fluida pre i posle merne blende, tj. primenom Bernulijeve jednačine $p + \rho v^2/2 + \rho gh = const$ za presek 1 i presek 2, dobija se da je:

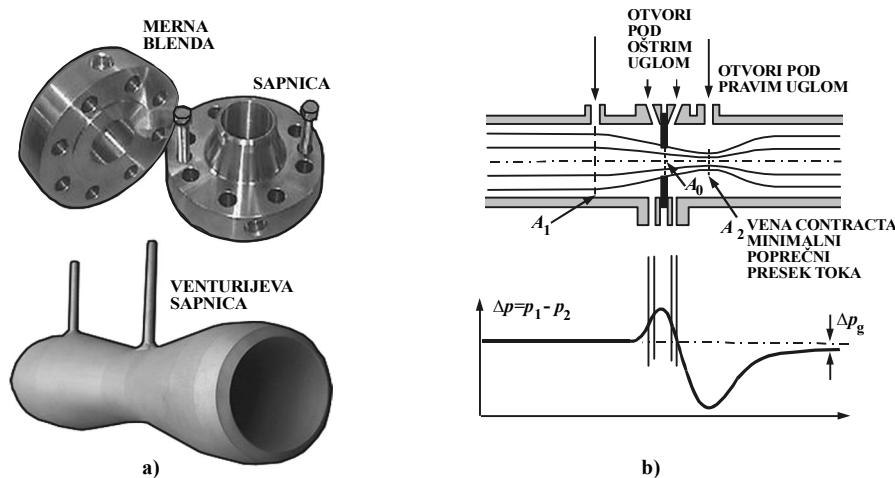
$$Q_v = C \alpha \varepsilon d^2 \sqrt{\Delta p / \rho}, \quad (20.8)$$

gde su:

- $C = \pi\sqrt{2}/4$ bezdimenzionalna konstanta;
- $\alpha = \mu\xi / \sqrt{1 - (A_0/A_1)^2}$ koeficijent protoka;
- $\mu = A_2/A_0$ koeficijent kontrakcije mlaza;
- ξ koeficijent brzine empirijskog karaktera, kojim se koriguje nepodudarnost lokacije otvora za merenje i preseka A_1 i A_2 ;
- ε koeficijent ekspanzije, koji je za nestišljive fluide jedan;
- d unutrašnji prečnik merne blende.

Koeficijent protoka je složena funkcija Rejnoldsovog broja i odnosa $m = A_0/A_1$ i određuje se eksperimentalno. Na osnovu eksperimentalnih rezultata dobijeni su

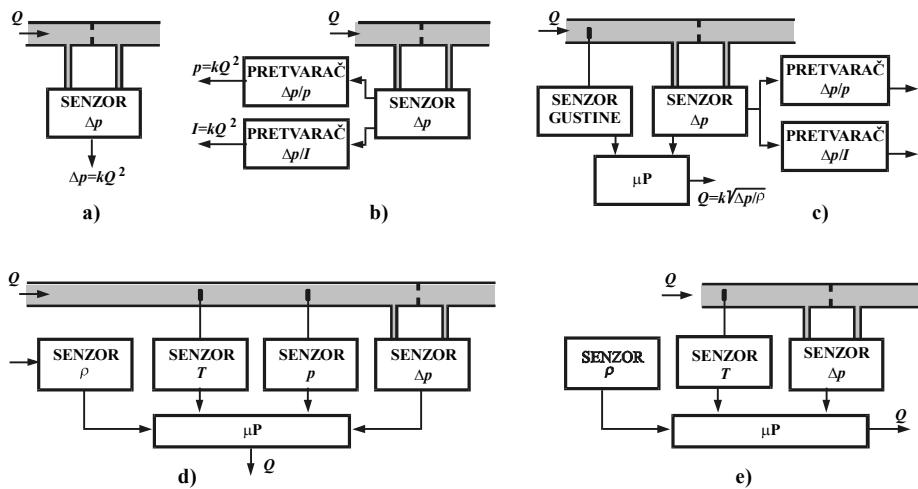
dijagrami funkcije $\alpha = f(R_e, m)$ za standardizovane tipove i dimenzije prigušnica. Kod proračuna prigušnice moguće je, pomoću dopunskih korekcionih faktora, uzeti u obzir hrapavost cevi, zaobljenost ulazne ivice prigušnice i temperaturne dilatacije prigušnice. Radna gustina stišljivog fluida računa se pomoću jednačine (20.6).



Slika 20.1. Senzori protoka sa prigušnicom: a) standardne prigušnice, b) deo cevovodova sa mernom blendom i dijagrom promene pritiska Δp

Prednosti senzora protoka sa prigušnicom su: jednostavnost, nepostojanje pokretnih delova, dugovečnost i pristupačnost cene. Nedostaci su: nelinearna zavisnost protoka od pada pritiska, mali korisni opseg ($Q_{\max}/Q_{\min} = 4 : 1$) jer se Δp može meriti najviše u rasponu $10 : 1$, ograničena primena na cevovode sa prečnikom većim od $D = 50 \text{ mm}$, neophodnost pravolinijskog toka na rastojanju $10 - 30D$ uzvodno i $5 - 10D$ nizvodno od prigušnice, te trajni gubitak pritiska. Postavljanjem prepreke u tok fluida u obliku standardnih prigušnica nastaje trajni gubitak energije, koji je ekvivalentan padu pritiska Δp_g . Gubitak se izražava u procentima opsega merenog pada pritiska Δp . Veći gubitak je pri manjoj vrednosti odnosa $m = A_0/A_1$ i može iznositi do 10% za Venturijevu cev, odnosno do 60% za mernu blendu. Tipična tačnost je $\pm 1\text{--}2\%$, a sa kalibriranim prigušnicama do $\pm 0,5\%$.

Struktura senzora protoka sa prigušnicom najprostija je u slučaju kada je $m = A_0/A_1$ izabran tako da je koeficijent protoka α konstantan na mernom opsegu (slika 20.2a). Šema može imati i blok za konverziju izlaznog signala u standardni strujni ili pneumatski signal (slika 20.2b). Kada se gustina radnog fluida menja, potrebno je meriti njegovu aktuelnu vrednost kako bi izlaz bio u skladu sa jednačinom (20.8), (slika 20.2c). Ukoliko gustinu gasa nije moguće izmeniti u radnim uslovima, vrši se merenje temperature i pritiska u radnim, a gustine u referentnim uslovima (slika 20.2d). Protok se računa kombinacijom jednačina (20.6) i (20.8). Ponekad se ni gustina tečnosti ne može meriti u radnim uslovima. U tom slučaju šema se sastoji od senzora temperature u radnim uslovima i senzora gustine pri referentnoj temperaturi 20°C (slika 20.2e).



Slika 20.2. Strukturne blok-seme senzora protoka sa prigušnicom: a) Δp -protokometar, b) Δp -protokometar sa standardnim signalom na izlazu, c) Δp -protokometar sa senzorom gustine u radnim uslovima, d) Δp -protokometar za gasove (sa posrednim merenjem gustine), e) Δp -protokometar za tečnosti (sa posrednim merenjem gustine).

20.2.3. Rotametar

Rotametar je komercijalni naziv za senzor protoka sa lebdećim plovkom kao pokretnim delom (slika 20.3a). Između plovka i konusnog tela rotametra formira se suženje – prsten sa površinom koja se menja zavisno od visine plovka. Suženje ima ulogu prigušnice. Pad pritiska na suženju ne zavisi od protoka, pa se rotametar označava kao senzor sa konstantnim padom pritiska i promenljivom površinom. Proticanjem tečnosti ili gasa kroz rotametar na plovak deluju tri sile:

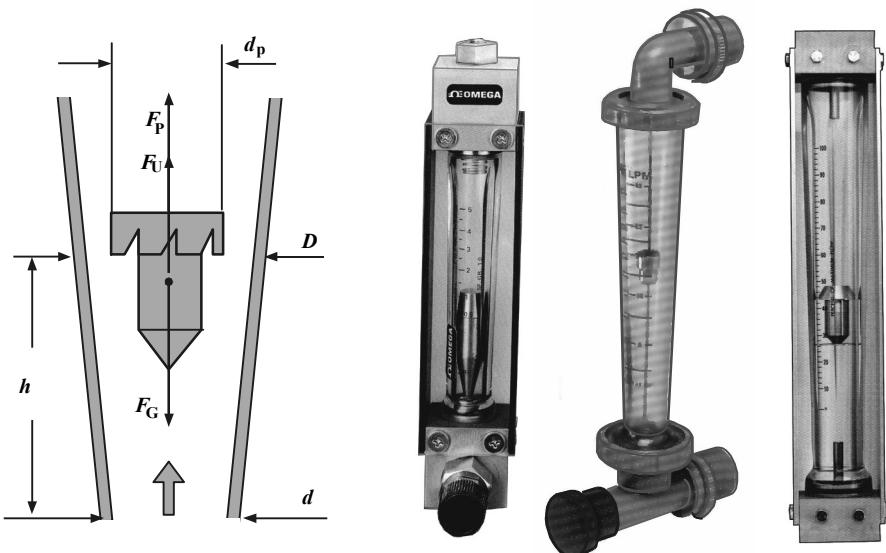
- rezultantna sila statičkog pritiska $F_p = (p_1 - p_2)S_p$, gde su p_1 i p_2 statički pritisci sa donje i gornje strane plovka, a S_p površina najvećeg poprečnog preseka plovka;
- težina plovka $F_G = \rho_p g V_p$;
- sila uzgona $F_U = \rho_F g V_p$.

Iz uslova ravnoteže navedenih sila ($F_p = F_G - F_U$) pri ustaljenom protoku dobije se da je pad pritiska na plovku konstantan i nezavisran od protoka:

$$\Delta p = (p_1 - p_2) = (\rho_p - \rho_F)g \frac{V_p}{S_p} . \quad (20.9)$$

Ovaj pad pritiska može se izraziti pomoću srednje brzine proticanja fluida kroz prstenasti zazor između plovka i zida rotametra, u obliku:

$$\Delta p = \nu^2 \frac{\rho_F}{2} . \quad (20.10)$$



Slika 20.3. Rotametar - protokometar sa sa konstantnim padom pritiska: a) princip rada, b) izgled

Izjednačavanjem jednačina (20.9) i (20.10) dobija se da je brzina fluida u zazoru:

$$v = \sqrt{2gV_p(\rho_p - \rho_F)/\rho_F S_p} , \quad (20.11)$$

tako da je protok:

$$Q_V = \alpha v S_z = \alpha S_z \sqrt{2gV_p(\rho_p - \rho_F)/\rho_F S_p} , \quad (20.12)$$

gde je α koeficijent protoka koji se određuje eksperimentalno, a S_z površina prstenastog zazora između plovka i cevi. Ako se geometrijske relacije:

$$S_z = (D^2 - d_p^2)\pi/4 \quad \text{i} \quad D = d + kh , \quad (20.13)$$

uvrste u jednačinu (20.12), dobije se volumenski protok u funkciji visine plovka:

$$Q_V = \alpha \sqrt{2gV_p(\rho_p - \rho_F)/\rho_F S_p} [(d + kh)^2 - d_p^2] . \quad (20.14)$$

Konusna cev rotametra karakteriše se malim nagibom, tj. $k = 0,001\text{--}0,01$, tako da je, konačno, protok Q_V približno direktno proporcionalan visini plovka h :

$$Q_V = K_1 + K_2 h . \quad (20.15)$$

Konusna cev obično je izradena od stakla. Na cevi je ugravirana skala, a čitanje protoka vrši se u odnosu na gornju površinu plovka. Na plovku su narezani kosi kanali kako bi se omogućila njegova rotacija i centriranje. Kod nekih varijanti

plovak se kreće po vodicima. Položaj plovka detektuje se najčešće pomoću induktivnog senzora pomeraja. Zastupljenost rotametra je oko 8% u odnosu na sve ostale protokometre. Primjenjuje se za merenje protoka gasova u opsegu 0,003–800 m³/h, a za tečnosti u opsegu 0,00004–100 m³/h. Maksimalni pritisak fluida je od 4,5 MPa (za staklene cevi) do 35 MPa (za čelične cevi). Korisni merni opseg je $Q_{\max}/Q_{\min} = 10 : 1$. Tipična tačnost industrijskih izvedbi je ±1–10% mernog opsega, a kalibriranih rotametra ±0,5–1%. Treba napomenuti da rotametar ima visok prag osetljivosti (5–10% opsega), što je posledica činjenice da se plovak počinje kretati tek kada sila uzgona postane veća od težine plovka.

20.3. VOLUMETRIJSKI SENZORI PROTOKA SA MERENJEM BRZINE FLUIDA

20.3.1. Turbinski protokometar

Obrtanje turbine. Volumetrijski senzori protoka sa merenjem brzine imaju aksijalnu ili poprečno postavljenu turbinu kao osjetilni element. Zbog toga su i dobili naziv turbineski protokometri. Broj obrtaja turbine u jedinici vremena n proporcionalan je brzini fluida v u posmatranom poprečnom preseku S :

$$n = kv, \quad (20.16)$$

gde je k koeficijent proporcionalnosti. Ako se eliminiše brzina fluida v pomoću poznate relacije za volumetrijski protok $Q_V = vS$, dobije se da je:

$$n = \frac{k}{S} Q_V. \quad (20.17)$$

Imajući u vidu definiciju volumenskog protoka (20.2), jednačina (20.17) postaje:

$$dV = \frac{S}{k} n dt. \quad (20.18)$$

Integriranjem u vremenu od t_1 do t_2 dobija se:

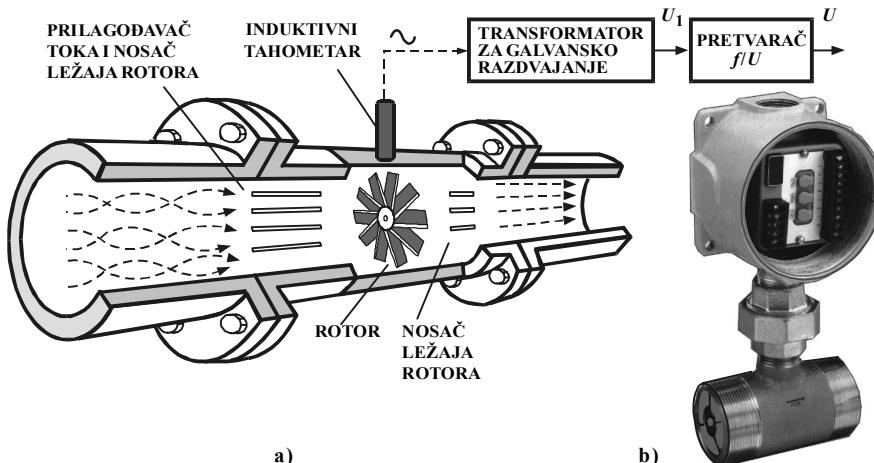
$$V = \frac{S}{k} (N_2 - N_1), \quad (20.19)$$

gde je $N_2 - N_1$ pokazivanje brojača, odnosno broj obrtaja turbine u intervalu $t_2 - t_1$. Merenjem ukupnog broja obrtaja dobija se informacija o zapreminskoj količini proteklog fluida.

Volumenski protok odreduje se merenjem brzine vrtnje turbine, najčešće pomoću elektromagnetskog tahometra reluktantnog tipa. U tom slučaju lopatice rotora su od feromagnetnog, a kućište protokometra od neferomagnetnog materijala (slika 20.4). Prolazom lopatice turbine kroz magnetsko polje stalnog magneta tahometra

indukuje se jedan impuls. Ukupan broj impulsa I na intervalu Δt jednak je broju izmerenih obrtaja $N_2 - N_1$ pomnožen sa brojem lopatica n_L :

$$I = n_L(N_2 - N_1) = n_L \frac{k}{S} V. \quad (20.20)$$



Slika 20.4. Turbinski protokomer: a) funkcionalna šema, b) izgled

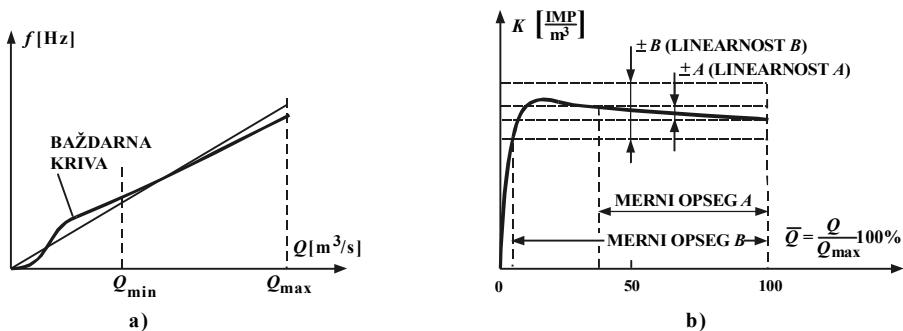
Pad pritiska. Kretanje turbine ostvaruje se oduzimanjem energije iz toka, što se odražava kao pad pritiska na tom delu toka. Najveći pad je pri maksimalnom protoku:

$$\Delta p = \Delta p_m Q / Q_m. \quad (20.21)$$

Pad pritiska uvek se specificira za određeni fluid, obično je to voda temperature 20°C i dinamičke viskoznosti $\mu = 0,1 \text{ Ns/m}$. Ukoliko se kalibrirani turbineski protokometar upotrebljava za drugu tečnost i pri drugim referentnim uslovima, pad pritiska se može izračunati pomoću modifikovane jednačine (20.21), koja tada ima oblik:

$$\Delta p_2 = \Delta p_1 (\rho_2 / \rho_1)^{0.81} (\mu_2 / \mu_1)^{0.27} (Q_2 / Q_1). \quad (20.22)$$

Statička karakteristika turbineskog merača protoka određuje se tako da se na celom opsegu utvrđuje koliko ima izlaznih impulsa pri protoku tačno određene količine fluida. Vrednost $K = n_L k/S$ iz jednačine (20.20) je karakteristična veličina koja se označava kao koeficijent protokometra. Njegova vrednost daje se kao broj impulsa po jedinici volumena ili kao broj impulsa u sekundi po jedinici volumenskog protoka. Navedeni postupak kalibracije pokazuje da realna statička karakteristika odstupa od idealnog pravca (slika 20.5a). Iznad vrednosti protoka $Q_{\min} \approx 0,1 Q_{\max}$ realna statička karakteristika ima približno konstantan nagib. Ona je linearna $\pm A\%$ za dati opseg ako je promena koeficijenta K unutar specificirane tolerancije $\pm A\%$. Proizvodači obično daju i podatak o proširenom radnom području sa B -linearnošću, pri čemu je $B > A$ (slika 20.5b).



Slika 20.5. Statička karakteristika turbineskog protokomera: a) realna karakteristika,
b) standardna baždarna kriva

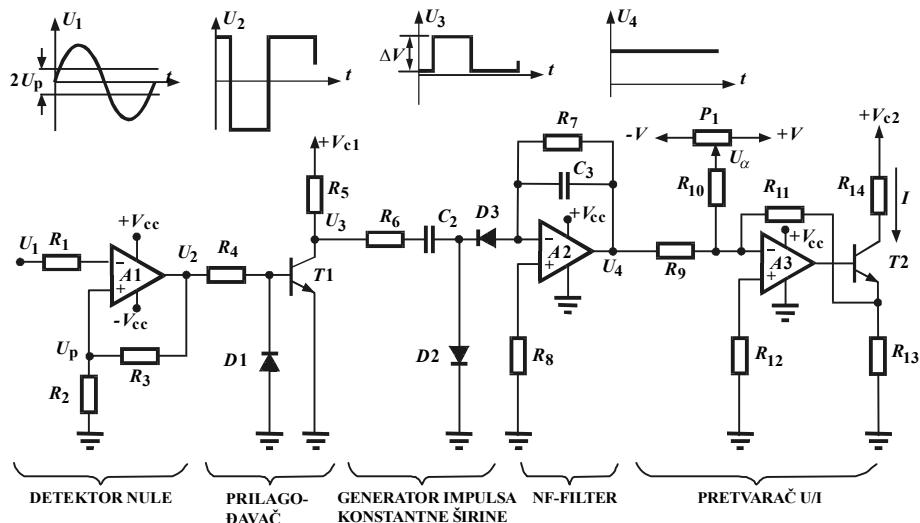
Prednosti turbineskih protokometara su: visoka tačnost ($\pm 0,2\text{--}2\%$), obnovljivost $\pm 0,02\%$, vremenska konstanta $2\text{--}10\text{ ms}$, korisni merni opseg $10:1$, mali pad pritiska, integriranje celog profila protoka, mogućnost primene za raznovrsne fluide u širokom opsegu temperature i pritiska, relativno jednostavna konstrukcija i laka zamena oštećenog rotora ili ležajeva. Nedostaci su obavezna kalibracija i periodično servisiranje rotora. Turbinskim protokometrom mere se protoci $0,001\text{--}500\text{ m}^3/\text{min}$ za gasove, odnosno $0,05\text{--}120\,000\text{ m}^3/\text{min}$ za tečnosti.

Elektronske šeme turbineskih protokometara zavise od načina generisanja impulsa i tipa izlaznog signala. U sistemima automatskog upravljanja potreban je standardni strujni signal $4\text{--}20\text{ mA}$. Prema tome, nužno je izvršiti konverziju frekvencije u kontinualni signal pomoću f/U konvertora (slika 20.6).

Naizmenični signal U_1 sa frekvencijom proporcionalnom protoku $f = KQ$ pretvara se u idealne četvrtke pomoću sklopa za detekciju nule – Šmitovog tragera. Napon $U_p = U_2 R_2 / (R_2 + R_3)$ na neinvertujućem ulazu pojačavača A_1 određuje prag okidanja, tj. širinu histerezisa tragera. Histerezis unosi izvesnu netačnost, ali onemogućava promenu stanja zbog smetnji čija je amplituda manja od histerezisa. Amplituda izlaznih impulsa sa tragera U_2 jednaka je naponu zasićenja. Tranzistor T_1 radi u prekidačkom režimu i na svom kolektoru daje normirani radni napon U_3 . Talasni oblici napona pokazuju da su frekvencije napona U_1 , U_2 i U_3 jednakе.

Četvrtke sa Šmitovog tragera dolaze na generator impulsa konstantne širine. Kao generator ovakvih impulsa može da posluži monostabilni multivibrator ili diodna pumpa. Promena signala U_3 je konstantna i iznosi ΔV volti. Vremenska konstanta $R_6 C_2$ bira se tako da se kondenzator može napuniti na puni iznos ΔV svaki put nakon promene znaka na izlazu tragera. Kada je signal iz tragera negativan, tranzistor T_1 koji radi u prekidačkom režimu je zakočen ($U_{ce} = U_3 \approx V_{cl}$) i struja punjenja kondenzatora zatvara se kroz diodu D_2 . Kada signal iz tragera postane pozitivan, tranzistor vodi ($U_{ce} = U_3 \approx 0$) i struja pražnjenja kondenzatora zatvara se kroz diodu D_3 . Nakon svake promene napon na kondenzatoru je:

$$q = C_2 \Delta V. \quad (20.23)$$



Slika 20.6. Tipična elektronska šema za turbinski senzor

Za signal koji se menja sa frekvencijom f kroz diodu D_3 formira se srednja vrednost struje:

$$-i_{sr} = fC_2\Delta V, \quad (20.24)$$

gde znak minus indicira da struja ide prema diodnom generatoru. Na izlazu operacionog pojačavača A_2 dobija se proporcionalni napon $U_{4sr} = -i_{sr}R_7$, odnosno:

$$U_{4sr} = fR_7C_2\Delta V. \quad (20.25)$$

Vremenska konstanta kojom se uspostavlja ovaj napon je R_7C_3 .

Podsklop sa operacionim pojačavačem A_3 služi za pretvaranje istosmernog napona U_1 u standardni strujni signal I od 4 mA do 20 mA. Ovakva konstrukcija U/I pretvarača upotrebljava se kao izlazni stepen i kod drugih senzora kada je potrebno slanje analognog signala na veća rastojanja. Tranzistor T_2 radi u linearном režimu. Pojačanje pojačavača A_3 u otvorenom je veliko, pa jednačina balansa struja na njegovom invertirajućem ulazu ima oblik:

$$\frac{U_4}{R_9} + (I + I_b) \frac{R_{11}R_{13}}{R_{11} + R_{13}} \frac{1}{R_{11}} + \frac{U_\alpha}{R_{10}} = 0. \quad (20.26)$$

Izlazna struja kolektora $I = h_{FE}I_b$ mnogo je veća od struje baze, jer je pojačanje tranzistora h_{FE} je 100–500. Osim toga, emiterski otpornik R_{13} bira se da bude mnogo manji od otpornika u povratnoj grani R_{11} , tako da se iz jednačine (20.26) dobija izlazna struja:

$$I = -\frac{U_1R_{11}}{R_9R_{13}} - \frac{U_\alpha R_{11}}{R_{10}R_{13}} = kf + I_0. \quad (20.27)$$

Ovakav strujni signal može da se šalje na udaljenosti do 1000 m, imun je na smetnje, a pogodan je i za indikaciju i za regulaciju protoka. Napon potiskivanja U_a podesi se da pri nultoj vrednosti ulaza izlazni signal ima 4 mA.

20.3.2. Pitoova cev

Rasprostranjen način merenja protoka zasniva se na posrednom metodu, odnosno na merenju dinamičkog pritiska. Neposredno uz zid cevovoda sa unutrašnje strane fluid miruje i tu deluje samo statički pritisak p_{st} . Na osi cevi deluje totalni pritisak p_{tot} koji je u odnosu na statički uvećan za dinamičku komponentu $\rho v^2/2$. Dinamički pritisak računa se iz razlike:

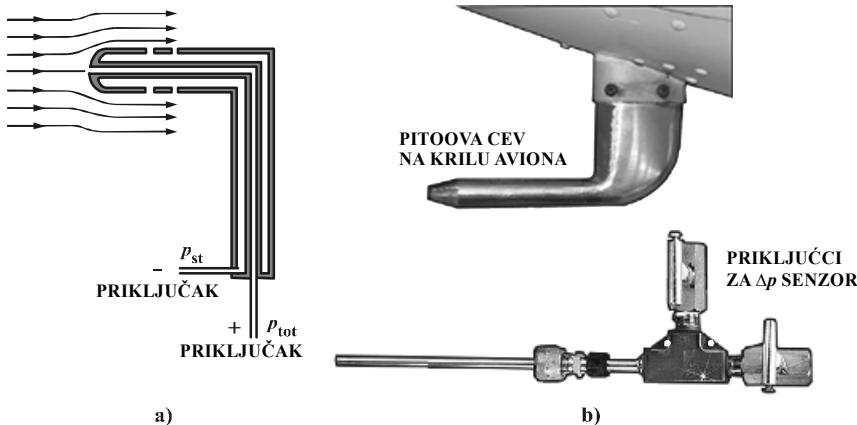
$$p_{din} = p_{tot} - p_{st} = \rho v^2/2 . \quad (20.28)$$

Za merenje dinamičkog pritiska upotrebljava se Pitoova ili Prantlova cev. U jedinstvenom kućištu otvor za totalni pritisak je u smeru toka, a više otvora poprečno na tok služi za merenje statičkog pritiska (slika 20.7b). Na Pitoovu cev potrebno je priključiti senzor diferencijalnog pritiska. Greške merenja nastaju zbog nemogućnosti da se totalni i statički pritisak odrede u jednoj tački. Zato se u jednačini (20.28) uvodi korekcioneni koeficijent $k_c = 0,7 - 1$, koji uzima u obzir konstrukcione osobine Pitoove cevi. Brzina se računa na sledeći način:

$$v = k_c \sqrt{2(p_{tot} - p_{st})/\rho} . \quad (20.29)$$

Na osnovu lokalne brzine (20.29) ne može se odrediti protok. Kada se Pitoova cev upotrebljava kao senzor protoka, eksperimentalno se mora ustanoviti odnos brzine toka na mestu mernog otvora i srednje brzine $k_v = v/v_{sr}$. Konačni izraz za računanje protoka je:

$$Q = k_v k_c \frac{D^2 \pi}{4} \sqrt{2\Delta p/\rho} . \quad (20.30)$$

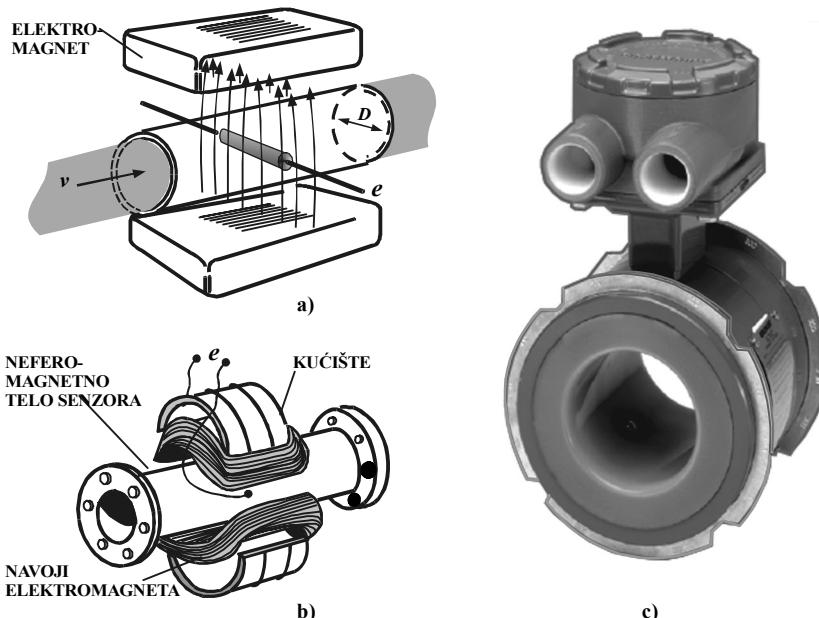


Slika 20.7. Pitoova cev: a) princip rada, b) izgled

20.3.3. Indukcioni senzori

To su elektromagnetični senzori koji rade na principu Faradejevog zakona indukcije. Kao što je poznato, ovaj zakon kaže da se relativnim kretanjem provodnika i magnetnog polja pod pravim uglom na provodniku indukuje napon. Na ovom principu rade istosmerni i naizmenični generatori napona. Za merenje protoka princip je primenljiv samo za provodne tečnosti. Takva tečnost ekvivalentna je provodniku dužine jednake unutrašnjem prečniku cevi D (slika 20.8a). Provodnik se kreće srednjom brzinom toka v u magnetnom polju B , zbog čega se na krajevima provodnika, tj. na elektrodama indukuje napon:

$$e = BDv = 4B \frac{Q_V}{\pi D} . \quad (20.31)$$



Slika 20.8. Indukcioni senzor: a) princip rada, b) konstrukcija, c) izgled

Kod indukcionih senzora protoka sa elektromagnetom koji se napaja jednosmernim naponom na elektrodamu se javlja galvanska ems i ems polarizacija. One suštinski utiču na tačnost merenja. To je glavni razlog da su indukcionici senzori protoka modifikacije naizmeničnog generatora. Kada se elektromagnet napaja naizmeničnim naponom, tada se dobija promenljivo magnetno polje $B = B_m \sin \omega t$, a indukovani napon je:

$$e = B_m D v \sin \omega t = 4B_m Q_V \frac{\sin \omega t}{\pi D} . \quad (20.32)$$

Smanjenje efekta polarizacije postiže se povećanjem frekvencije napona napajanja. Međutim, glavni nedostatak indukcionih senzora sa naizmeničnim napajanjem je transformatorski efekt između navoja elektromagneta i radnog provodnika. Zbog toga se u izlaznom krugu i kada tečnost miruje indukuje napon:

$$e_t = -\frac{dB}{dt} S = -S\omega B_m \cos \omega t , \quad (20.33)$$

koji se može smanjiti samo smanjivanjem površine kruga S . Drift nule (20.33), kao rezultat transformatorske sprege, eliminiše se posebnim kolima. Navoje elektromagneta smešteni su inače sa vanjske strane cevovoda (slika 20.8b). Postoje i izvedbe sa navojima na unutrašnjoj strani cevovoda. Elektrode su umetnute u zid cevovoda.

Mnogostrukе су prednosti indukcionih senzora protoka: bezinercionost, linearna zavisnost izlaza od protoka, nezavisnost izlaza od temperature i pritiska tečnosti i neremećenje toka. Indukcioni senzori čine oko 10% svih senzora protoka. Primjenjuju se za protoke $1 - 2500 \text{ m}^3/\text{h}$, pri brzini toka $v = 0,6 - 10 \text{ m/s}$ i prečnicima cevovoda $D = 10 - 1000 \text{ mm}$. Njihova tipična tačnost je $\pm 0,2 - 2\%$, korisni merni opseg 40:1, a dužina neporemećenog toka ispred mesta ugradnje je oko $5D$. Nedostaci indukcionih senzora su: nemogućnost merenja protoka neprovodnih tečnosti, potrošnja energije $40 - 700 \text{ W}$, te relativno visoka cena.

20.3.4. Ultrazvučni senzori protoka

Ultrazvučni senzori mere brzinu toka na bazi interakcije toka i ultrazvuka koji prolazi kroz fluid. Postoji više metoda ultrazvučnog merenja protoka. U praksi su najviše zastupljeni metodi merenja promene faze ili promene frekvencije ultrazvuka pri prolazu kroz fluid, te metod merenja vremena prolaza ultrazvuka kroz fluid. Kao generator i prijemnik ultrazvuka upotrebljavaju se pijezokeramički elementi u obliku diska prečnika $D = 10 - 20 \text{ mm}$. Da bi se dobio što veći intenzitet ultrazvučnih valova, pijezoelement se projektuje da radi na rezonantnoj frekvenciji:

$$f_r = \left(\frac{E}{\rho} \right)^{0.5} \frac{1}{2h} = \frac{v_p}{2h} , \quad (20.34)$$

gde su: h debljina diska, E Jangov modul elastičnosti i $v_p = (E/\rho)^{0.5}$ brzina ultrazvuka u pijezoelementu. Veća rezonantna frekvencija dobija se za tanji disk. Budući da je $v_p = f\lambda$, gde je λ talasna dužina ultrazvuka, pri rezonantnoj frekvenciji talasna dužina jednaka je dvostrukoj debljini diska $\lambda = 2h$. Tipična rezonantna frekvencija diska, odnosno frekvencija ultrazvuka za senzore protoka je $1 - 10 \text{ MHz}$. Ultrazvučni talas širi se po konusu sa uglom $\phi = 10^\circ$ koji zavisi od talasne dužine: $\sin \phi = 1,2\lambda/D$.

Vremensko-impulsni ultrazvučni senzori protoka. Brzina prostiranja ultrazvuka u mirnom fluidu je c . U pokretnom fluidu brzina v ultrazvuk se prostire brzinom koja je određena vektorskim zbirom $\vec{c} + \vec{v}$. Za konfiguraciju na slici 20.9a vreme potrebno da ultrazvučni impuls pređe rastojanje $L = D/\sin \alpha$ od predajnika do prijemnika u smeru toka je:

$$t_1 = \frac{L}{c + v \cos \alpha} , \quad (20.35)$$

a vreme za koje impuls pređe to isto rastojanje, ali u smeru suprotno toku je:

$$t_2 = \frac{L}{c - v \cos \alpha} . \quad (20.36)$$

Prikazani senzor sastoji se od dva para predajnik-prijemnik, postavljenih pod ugлом α u odnosu na tok. Dovoljan je jedan par. Predajnik i prijemnik tada menjaju svoje uloge u sukcesivnim vremenskim intervalima zahvaljujući posebnim eksternim kolima. Direktnim metodom merenja razlike vremena t_2 i t_1 dobija se:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2vL \cos \alpha}{c^2 - v^2 \cos^2 \alpha}. \quad (20.37)$$

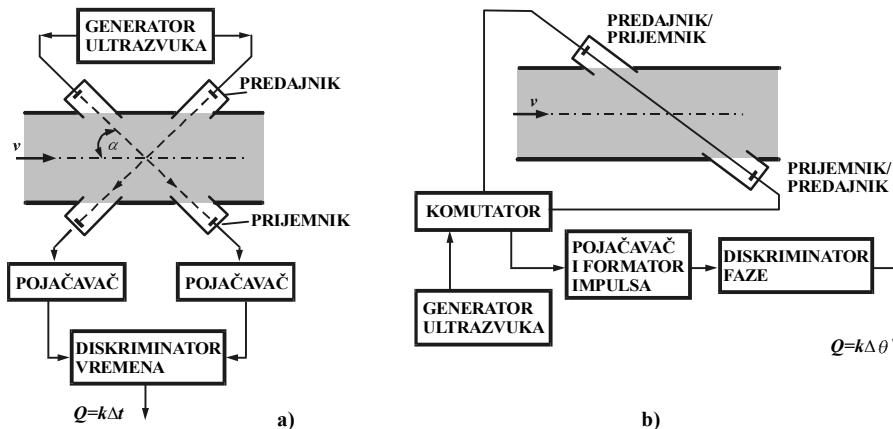
Brzina fluida v mnogo je manja od brzine ultrazvuka c , tako da je interval Δt

$$\Delta t = \frac{2vD}{c^2 \operatorname{tg} \alpha}, \quad (20.38)$$

proporcionalan protoku:

$$\Delta t = \frac{8Q \operatorname{ctg} \alpha}{D \pi c^2}. \quad (20.39)$$

Vrednost vremenskog intervala je veoma mala i iznosi $\Delta t = 10^{-6} - 10^{-7}$ s, dok je ukupno vreme prostiranja oko 1000 puta veće. Tačnost merenja intervala Δt treba da je $\pm 1 - 0,1\%$, što znači da će greška tada biti reda $10^{-8} - 10^{-10}$ s. Složenost elektronskih kola za merenje malih vremenskih intervala značajno utiče na cenu senzora. Ukupna tačnost ultrazvučnih senzora sa direktnim merenjem vremenske razlike Δt je $\pm 0,5 - 4\%$.



Slika 20.9. Ultrazvučni senzor protoka: a) princip rada sa direktnim merenjem vremena prelaza, b) princip merenja faze

Fazni ultrazvučni senzori protoka mere faznu razliku ultrazvučnih oscilacija $\Delta\theta$. Ona zavisi od razlike u vremenu prostiranja ultrazvuka Δt uz tok i niz tok. Rastojanje između predajnika i prijemnika je L za oba smera prostiranja (slika 20.9b). Generator pobuduje pijezokeramičke predajnike na ultrazvučne oscilacije frekvencije $f = \omega/2\pi$, koje se prenose do odgovarajućih prijemnika. Prijemni signali se pojačavaju, pretvaraju u četvrtke i u bloku za detekciju faze formiraju se impulsi sa širinom proporcionalnom razlici faza:

$$\Delta\theta = 2\pi f \Delta t = \omega \Delta t = \frac{2vD\omega}{c^2 \operatorname{tg} \alpha}. \quad (20.40)$$

Izraz za računanje protoka dobija se uvođenjem smene $v = 4Q/D^2\pi$. Tipična tačnost ultrazvučnih senzora protoka ovog tipa je $\pm 2\%$.

Frekventni ultrazvučni senzori protoka mere razliku frekvencija Δf između ultrazvučnih oscilacija koje se kreću niz tok i nasuprot toku. Ove frekvencije su:

$$f_1 = \frac{1}{t_1} = \frac{c + v \cos \alpha}{L} \quad \text{i} \quad f_2 = \frac{1}{t_2} = \frac{c - v \cos \alpha}{L}, \quad (20.41)$$

odakle proizilazi da je njihova razlika:

$$\Delta f = f_1 - f_2 = \frac{2v \cos \alpha}{L}. \quad (20.42)$$

Uvođenjem smene $v = 4Q/D^2\pi$ dobija se veza sa protokom. Merenje razlike frekvencija Δf kao posredna metoda merenja intervala Δt ima veliku prednost jer ne zavisi od brzine prostiranja ultrazvuka kroz fluid. Osim toga, merne šeme za merenje Δf su jednostavnije od šema za merenje vremena Δt i faze $\Delta\theta$. Tačnost frekventnih ultrazvučnih senzora protoka je $\pm 0,2\text{--}1\%$, a namenjeni su za fluide čija je brzina $0,12\text{--}12 \text{ m/s}$. Tipični su im pokazatelji: frekvencija generisanog ultrazvuka $1\text{--}5 \text{ MHz}$ za tečnosti i $0,2\text{--}0,5 \text{ MHz}$ za gasove, korisni merni opseg $10:1$, mogućnost ugradnje na cevovode prečnika $D = 75\text{--}1500 \text{ mm}$, neporemećeni deo toka uzvodno od senzora $10D$, a nizvodno od senzora $5D$.

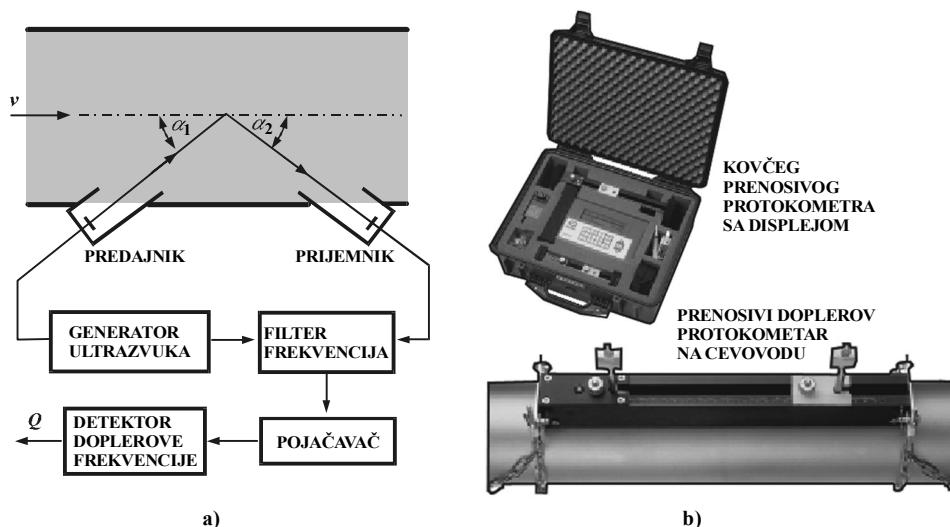
Ultrazvučni senzor sa Doplerovim efektom. Doplerov efekat manifestuje se kao promena frekvencije reflektovanog talasa pri kretanju predajnika ili prijemnika. Kada se na objekat koji se kreće brzinom v usmeri ultrazvuk frekvencije f_0 , tada se frekvencija f_r ultrazvuka reflektovanog sa objekta promeni u skladu sa poznatom Doplerovom jednačinom $\Delta f_D = 2fv/c$. Pri merenju brzine fluida kao objekat se javljaju čestice nečistoće ili mehurići zraka prisutni u fluidu. Predajnik i prijemnik obično se nalaze na istoj strani cevovoda (slika 20.10a). Doplerova frekvencija za datu konfiguraciju je:

$$\begin{aligned} \Delta f_D &= f_0 - f_r = f_0 - f_0(1 - \frac{v}{c} \cos \alpha_1 + \frac{v}{c} \cos \alpha_2) = \\ &= f_0 (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \frac{v}{c}. \end{aligned} \quad (20.43)$$

Obično su predajnik i prijemnik postavljeni pod istim uglom u odnosu na osu cevovoda, pa je $\cos \alpha_1 = -\cos \alpha_2$, odnosno:

$$\Delta f_D = 2f_0 \frac{v}{c} \cos \alpha. \quad (20.44)$$

Za ultrazvuk frekvencije $f_0 = 5 \text{ MHz}$ Doplerova frekvencija je oko $\Delta f_D = 15 \text{ kHz}$. Ukoliko nema nečistoće, u fluid se ubacuje neka poznata suspenzija sa česticama prečnika do $0,1 \text{ mm}$ ili se ubacuje zrak sa protokom $0,005\text{--}0,1\%$ u odnosu



Slika 20.10. Doplerov ultrazvučni senzor protoka: a) princip rada, b) izgled prenosivog senzora

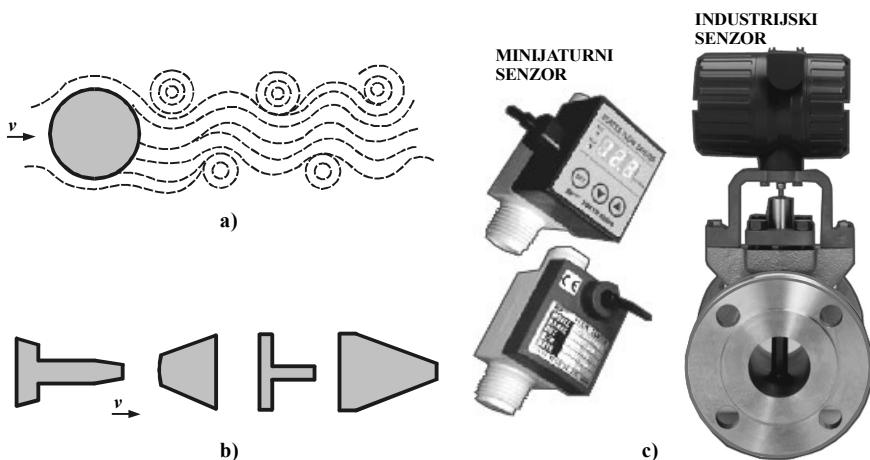
na mereni. Jednačina (20.43) može da sadrži i koeficijent korekcije lokalne brzine $k_v = v/v_{sr}$. Metrološke karakteristike Doplerovog ultrazvučnog senzora slične su karakteristikama ultrazvučnih senzora sa merenjem intervala Δt , Δf i $\Delta\theta$. Radi povećanja tačnosti predajnik se može postaviti tako da se ultrazvuk pri kretanju do prijemnika više puta odbija od zida cevovoda. Na slici 20.10b prikazan je prenosivi Doplerov protokometar koji se pomoću lanaca, traka i posebnog gela pričvrsti za cevovod. Postoje portabilne konstrukcije u obliku klešta namenjene za cevovode malih prečnika: 0,6 – 1,9 cm.

20.3.5. Vrtložni senzori

Princip rada vrtložnih senzora zasniva se na odvajjanju vrtloga iza prepreke postavljene u toku fluida. Frekvencija odvajanja vrtloga proporcionalna je brzini toka. Nailaskom na prepreku, brzina fluida raste, a pritisak opada. Na polovini poprečnog preseka dešava se obrnuti proces – brzina opada a pritisak raste. Na taj način na prednjoj strani formira se viši, a na zadnjoj strani niži pritisak. Pod delovanjem ove razlike pritiska odvaja se pogranični sloj fluida sa prepreke u obliku vrtloga. Vrtlozi se odvajaju naizmenično na gornjoj i donjoj strani (slika 20.11a). Zavisnost frekvencije vrtloga od brzine toka i prečnika cevovoda naziva se Struhalovim brojem:

$$\text{Sh} = fD / v. \quad (20.45)$$

Prepreka je obično simetrična. Osnovni zahtevi koji se postavljaju pri konstrukciji prepreke su da odnos njenog prečnika i prečnika cevovoda bude manji od 0,2 kako ne bi remetila tok, te da ima oblik koji će obezbediti nepromenljivost Struhalovog broja u širokom intervalu promene Rejnoldsovog broja ($Re=vD/v=1000$ –200 000). Tipične prepreke prikazane su na slici 20.11b.



Slika 20.11. Vrtložni senzor: a) odvajanje Karmanovih vrtloga iza prepreke, b) tipične prepreke, c) izgled minijaturnog i industrijskog vorteks senzora

Tehnike detekcije vrtloga. Na mestu odvajanja vrtloga dolazi do fluktuacija brzine i pritiska. Kao detektor vrtloga može se upotrebiti ili senzor brzine ili senzor pritiska. Praktične poteškoće nastaju zbog malih amplituda fluktuacija. Detekcija se najčešće ostvaruje pomoću:

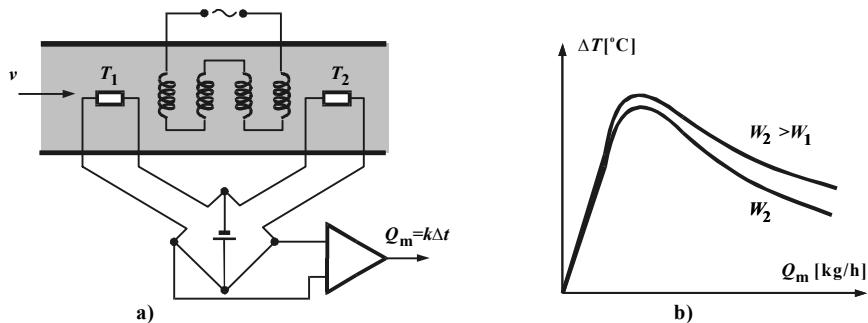
- ultrazvučnog predajnika i prijemnika, postavljenih poprečno na tok iza prepreke, tako da nailazak vrtloga modulira ultrazvučni talas;
- termistora postavljenog iza prepreke, tako da se pri nailasku vrtloga termistor hlađi, a u njegovom odsustvu zagrejava;
- pjezoelementa, koji prati fluktuacije pritiska.

Osobine vrtložnih senzora. Dobre osobine vrtložnih senzora su: nepostojanje pokretnih delova, jednostavnost konstrukcije, velika pouzdanost, nezavisnost izlaza od temperature i pritiska, te stabilnost izlaza. Loše osobine su: trajni gubitak pritiska zbog ugradnje prepreke i nemogućnost merenja protoka pri $Re < 3000$. Tipična tačnost ovih senzora je $\pm 0,5 - 1\%$, korisni merni opseg im je 20:1, a neporemećeni deo toka ispred prepreke $10 - 20D$. Mogu se ugradjivati na cevovode prečnika 25 – 300 mm.

20.4. SENZORI MASENOG PROTOKA

20.4.1. Termički senzori

Kalorimetarski senzor tipa grejana cev. Ispred i iza grejača postavljeni su termootporni senzori temperature. Prolaskom pored grejača fluid se zagrejava, tako da se dobije temperaturna razlika $T_2 - T_1$ (slika 20.12a). Ako je snaga grejača W



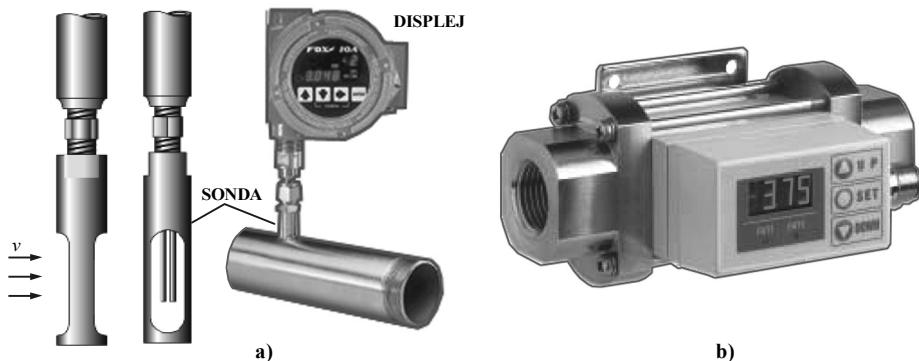
Slika 20.12. Kalorimetarski senzor protoka: a) princip rada, b) statička karakteristika

konstantna i cev izolovana, tako da se sva energija grejača troši na zagrejavanje fluida, tada jednačina topotne ravnoteže glasi:

$$W = kQ_m c_p \Delta T, \quad (20.46)$$

gde je k korekcionii koeficijent, koji uzima u obzir gubitke topote u okolini i greške merenja ΔT , nastale zbog neravnomerne raspodele temperatura po poprečnom preseku, c_p specifični topotni kapacitet fluida (gasa pri konstantnom pritisku) na temperaturi $(T_1 + T_2)/2$.

Razlika temperatura ΔT je nelinearna funkcija masenog protoka (slika 20.12b). Linearnost statičke karakteristike (20.46) postoji samo za male brzine. Povećanje osjetljivosti postiže se većom snagom grejača. Ukoliko bi se održala konstantna razlika temperatura $\Delta T = \text{const}$ prilagodavanjem snage grejača W , tada bi statička karakteristika snaga grejača – protok bila linearna. Termootpornici kalorimetarskog senzora protoka obično su ugrađeni u posebnu sondu ili sa unutrašnje strane armature (slika 20.13). Termootpornici sa još dva fiksna otpornika čine Vitstonov most. Tačnost merenja je $\pm 0,2 - 0,5\%$, minimalni merni opseg je $2,5 \cdot 10^{-10} \text{ kg/s}$ a maksimalni do $5 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$, korisni merni opseg do 100, vremenska konstanta $0,1 - 1 \text{ s}$. Na slici 20.13 prikazane su tipične konstrukcije kalorimetarskog senzora.



Slika 20.13. Termički senzor: a) izgled sonde kalorimetarskog senzora sa bočne i prednje strane, b) senzor sa armaturom

Termokonvektivni senzor masenog protoka razlikuje se od kalorimetarskih po tome što su grejač i termootpornici smešteni na vanjskoj strani cevovoda, a ne u toku

fluida. Prednost su povećana pouzdanost i mogućnost ugradnje na cevovode malih prečnika ($0,5 - 1 \text{ mm}$). Grejač se mora konstruisati tako da se fluid i pri maksimalnom protoku može zagrejati na iznos od 99% temperature grejača.

Razlika između temperatura fluida ispred i iza grejača opisuje se sličnom jednačinom kao i kod kalorimetarskih senzora. Izgled statičke karakteristike zavisi od termofizičkih osobina merenog fluida i materijala od kojeg je napravljen cevovod, te od geometrije cevi. Između grejača i cevovoda odvija se konduktivni prenos topline, a između cevovoda i fluida konvektivni. Vremenska konstanta ovog procesa je oko 1s . Tipična tačnost termokonvektivnih senzora je $\pm 0,5 - 2\%$, a korisni merni opseg im je $10:1$. Ne postavljaju se nikakvi uslovi u pogledu stacionarnosti toka ispred i iza mesta ugradnje.

20.4.2. Momentni senzori

Turbinski momentni senzor sastoji se od dva turbinska rotora: inicijalnog i mernog (slika 20.14). Kroz koaksialne kanale na obodu rotora protiče fluid. Inicijalni rotor okreće se eksternim elektromotorom ugaonom brzinom ω i svojim kanalima uvrće tečnost, tako da ona dobije moment vrtnje (ugaonu količinu kretanja):

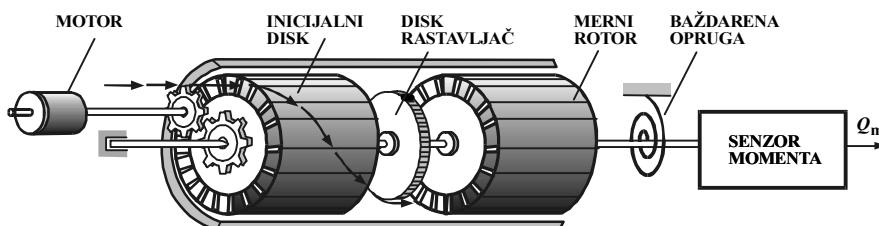
$$L = I\omega = mr^2\omega, \quad (20.47)$$

gde su: I moment inercije rotirajuće tečnosti, m masa tečnosti i r poluprečnik inicijalnog rotora.

Prema zakonu o očuvanju količine kretanja, promena momenta vrtnje dL/dt jednaka je sumi momenata ΣM svih vanjskih sila koje deluju na tečnost. Ako su moment sile viskoznog trenja i moment sile trenja u ležajevima zanemarljivi, odnosno ako na tečnost deluje samo moment M , prema prethodno navedenom zakonu dobije se:

$$\omega r^2 \frac{dm}{dt} = \omega r^2 Q_m = M. \quad (20.48)$$

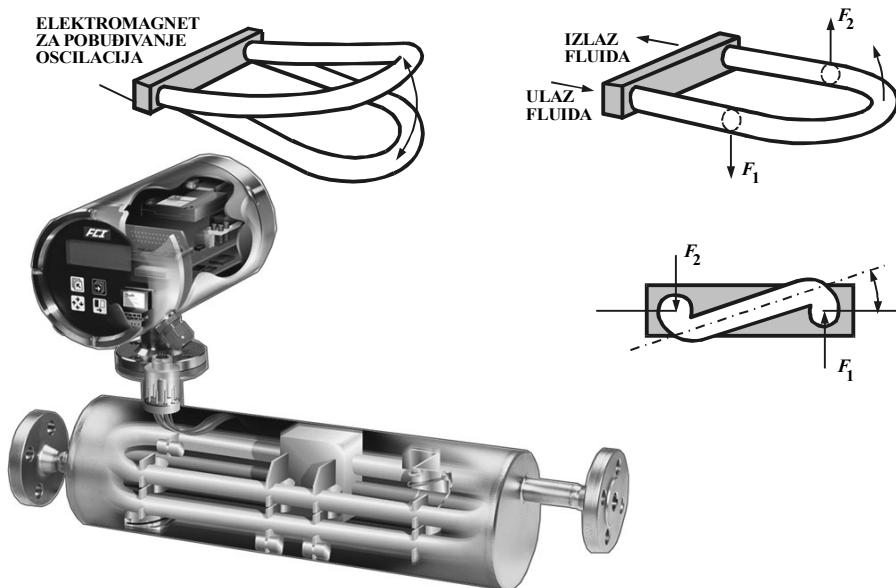
Izlazeći iz inicijalnog rotora, tečnost u celosti predaje stečeni moment vrtnje (20.48) mernom rotoru. Merni rotor na taj način dobija moment obrtanja M , koji se uravnovežuje baždarenom oprugom. Zakretanje osovine mernog rotora θ proporcionalno je razlike u momentu vrtnje:



Slika 20.14. Turbinski momentni senzor masenog protoka

onalno je obrtnom momentu M , odnosno masenom protoku Q_m . Disk za razdvajanje smanjuje viskoznu vezu između rotora.

Karakteristični podaci koji se odnose na turbinski momentni senzor masenog protoka su: tačnost $\pm 0,5\text{--}2\%$, ugaona brzina tečnosti $\omega = 1500 \text{ o/min}$, prečnik cevovoda $D = 50\text{--}200 \text{ mm}$, merni opseg $0,1\text{--}50 \text{ kg/s}$ za tečnosti i $0,01\text{--}10 \text{ kg/s}$ za gasove, korisni merni opseg $10:1$, mogućnost rada pri pritiscima do 10 MPa i temperaturi od -30°C do 50°C .



Slika 20.15. Koriolisov momentni senzor protoka

Koriolisov senzor masenog protoka meri moment koji se javlja zbog delovanja Koriolisove sile, koja zavisi od protoka. Koriolisova sila je inercijalna sila na površini rotirajućeg tela i deluje pod pravim uglom u odnosu na smer kretanja. Savremeni senzori ovog tipa imaju primarni element najčešće u obliku U -cevi, koja se posebnim elektromagnetom pobuduje na prirodne oscilacije frekvencije $\omega = 80 \text{ Hz}$. Cev je priključena na cevovod (slika 20.15).

Neka se U -cev nalazi u poluciklusu kada se kreće naviše. Tečnost koja ulazi u cev dobija pozitivno Koriolisovo ubrzanje $a_k = 2v\omega$ i odupire se tom kretanju silom F_1 , usmerenom naniže, a tečnost koja izlazi iz cevi dobija negativno Koriolisovo ubrzanje i odupire se tom kretanju silom F_2 , usmerenom naviše. Ove dve sile stvaraju moment i cev se uvrće. Poluciklus u kome se cev kreće niže karakteriše se obrnutim procesom. Amplituda uvrta proporcionalna je masenom protoku. Induktivni senzor prati oscilacije u uvrtaju na obe strane cevi. Izlazni napon proporcionalan je masenom protoku. Tačnost Koriolisovih momentnih senzora masenog protoka je $0,25\text{--}2\%$, a korisni merni opseg $10:1$. Ne postavljaju se nikakvi uslovi u pogledu stacionarnosti toka ispred i iza mesta ugradnje senzora.

20.5. SPECIJALNI SENZORI PROTOKA

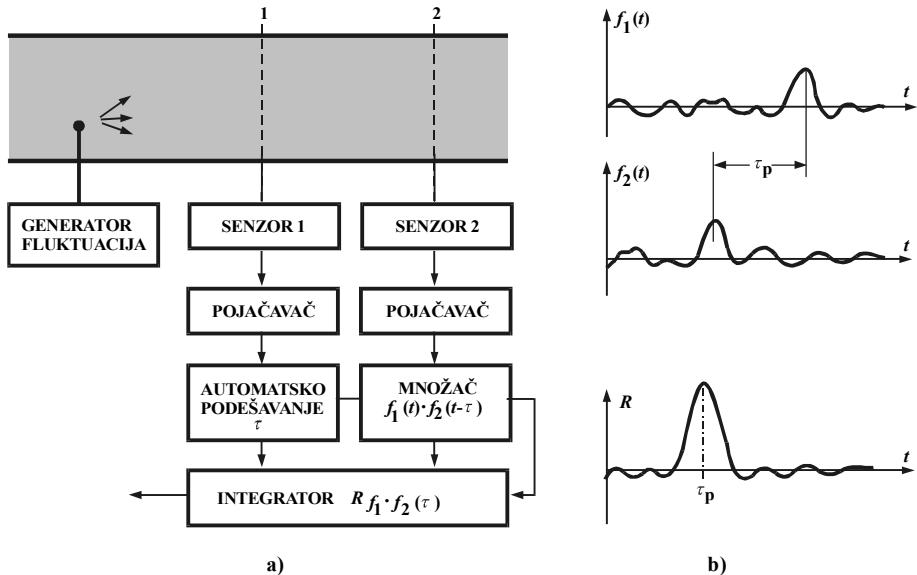
20.5.1. Korelacioni senzor protoka

Princip rada. Tok fluida najčešće nije homogen. Zbog toga se pojedini parametri ili svojstva toka kao što su gustina, temperatura, električna provodnost, turbulencija ili difuzija menjaju stohastički. Fluktuacije se prate pomoću dva odgovarajuća senzora, postavljena na cevovodu na rastojanju L (slika 20.16a). U kontrolnom preseku 1 meri se fluktuacija $f_1(t)$, a u kontrolnom preseku 2 nakon τ sekundi meri se fluktuacija $f_2(t-\tau)$. Od izmerenih signala formira se kroskorelaciona funkcija:

$$R_{f_1 f_2}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T f_1(t) \cdot f_2(t-\tau) dt, \quad (20.49)$$

koja ima izražen maksimum pri $\tau = \tau_p$ (slika 20.16b). Vreme kašnjenja τ podešava se automatski sve dok se ne izjednači sa $\tau_p = L/v$ vremenom prelaza fluida iz preseka 1 u presek 2. Kroskorelator se sastoji od kola za podešavanje τ , množaca signala $f_1(t)$ i $f_2(t-\tau)$, te integratora proizvoda $f_1(t)f_2(t-\tau)$, na čijem se izlazu dobija srednja vrednost $R_{f_1 f_2}(\tau)$ u toku vremenskog perioda T . Ako su poznati poprečni presek S , rastojanje L između senzora fluktuacije, te k koeficijent korekcije profila brzine po poprečnom preseku, protok Q tada se računa pomoću jednostavnog izraza:

$$Q = k \cdot S v = k \cdot S L / \tau_p. \quad (20.50)$$



Slika 20.16. Kroskorelacioni senzor: a) strukturalna blok-šema,
b) oblici signala $f_1(t)$, $f_2(t)$ i $R_{f_1 \cdot f_2(\tau)}$

Kroskorelacioni princip merenja protoka primenljiv je i za izrazito homogeni tok. U tom slučaju potreban je poseban generator fluktuacija, obično pseudoslučajnih binarnih impulsa. U tečnom fluidu fluktuacije se stvaraju ubacivanjem mehurića zraka, a u gasnom ubacivanjem čvrstih čestica ili raspršenih kapljica tečnog fluida.

Način gradnje. Korelacioni senzori protoka prave se u različitim varijantama, što zavisi od toga koji se parametar toka menja stohastički, te od toga koji se senzori upotrebljavaju za merenje tih fluktuacija. Dielektrični korelacioni senzori protoka osetljivi su na promenu kapaciteta u kontrolnim presecima, konduktometarski korelacioni senzori protoka osetljivi su na promenu provodnosti fluida, koja se meri u dvama kontrolnim presecima, elektrostatički korelacioni senzori osetljivi su na promenu naboja čvrstih čestica u toku gasova koja se meri u kontrolnim presecima itd.

U praksi se najviše upotrebljava ultrazvučni korelacioni senzor protoka. U kontrolnim presecima sa unutrašnje strane cevovoda, poprečno na tok, postavlja se po jedan par – ultrazvučni predajnik i ultrazvučni prijemnik, napravljeni od pijezoelektričnih diskova. Najbolji rezultat postiže se za $D/d \leq 10$ i $L = 0,5\text{--}1,5D$. Kako je prečnik pijezoelektričnog diska $d < 50 \text{ mm}$, proizilazi da je maksimalni prečnik cevovoda na koji se ugrađuje ultrazvučni korelacioni senzor $D < 500 \text{ mm}$.

Najveću perspektivu ima optoelektronski korelacioni senzor sa optičkim vlaknima. Ovaj senzor ima u svakom kontrolnom preseku par vlakana – dovodno i prijemno. Kroz dovodno vlakno dolazi svetlost iz optičkog izvora. Nailaskom čvrstih čestica u toku, svetlost se reflektuje u prijemno vlakno, na čijem se kraju nalaze fotodiode za formiranje električnog signala. Električni signali dalje se obrađuju u korelatoru, tako da se na izlazu dobija signal proporcionalan protoku.

Karakteristike korelacionih senzora. Dobre osobine korelacionih senzora su: neremećenje toka, te mogućnost merenja protoka čistih, zaprljanih ili višefaznih fluida. Nedostaci su složenost i veliko vreme odziva. Smanjenje vremena odziva postiže se smanjenjem vremena merenja T , ali tada greška merenja postaje veća. Ovaj problem rešava se primenom mikroprocesora. Tipična tačnost korelacionih senzora je $\pm 2\text{--}4\%$ mernog opsega za ultrazvučne, odnosno $\pm 1\%$ za optoelektronske.

20.5.2. Termoanemometri

Termoanemometri služe za merenje dinamičkih promena lokalne brzine ili vektora brzine. Ako je poznat odnos k_v između lokalne i srednje brzine, mogu se primeniti i za merenje protoka. Anemometar etimološki označava instrument za merenje brzine veta, a prefiks termo odnosi se na princip rada.

Princip rada termoanemometra zasniva se na činjenici da odvođenje toplote sa zagrejanog tela zavisi od brzine fluida u kome se telo nalazi. Zagrejano telo termoanemometra je termootpornik, koji radi u režimu sa konstantnom strujom grejanja ili u režimu sa konstantnom temperaturom. U prvom slučaju meri se otpor $R = R(v)$, a u drugom slučaju struja $I = I(v)$.

Kada je termoanemometar u stacionarnom toku fluida brzine v , uspostavlja se ravnoteža između dovedene električne snage i toplotnog toka koji odvodi fluid:

$$RI^2 = hS(T - T_f), \quad (20.51)$$

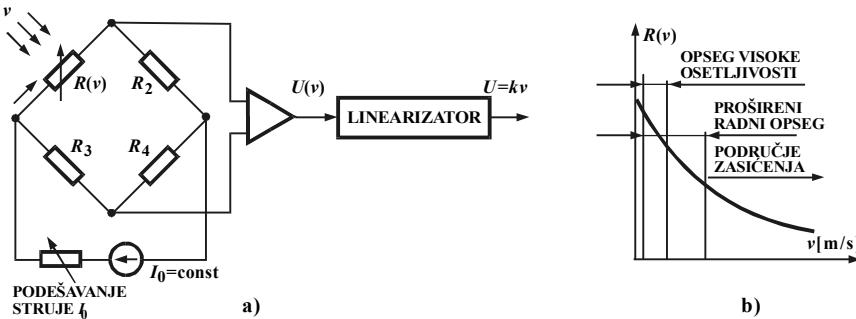
gde su: h koeficijent prelaza toplice [$\text{W/m}^2\text{K}$], S površina termootpornika [m^2], T temperatura površine termootpornika [K], T_f temperatura fluida [K]. Koeficijent prelaza toplice h je nelinearna funkcija brzine fluida. Njen opšti oblik je:

$$h = C_0 + C_1 v^{0.5}. \quad (20.52)$$

Koeficijenti C_0 i C_1 zavise od geometrije termootpornika i termičkih svojstava materijala od kojeg je napravljen, te od viskoznosti i toplotne vodljivosti fluida.

Termoanemometri u režimu $I=const$ i $R=R(v)$. Ako se struja zagrejanja I održava konstantnom, tada je, prema (20.51) i (20.52), otpor $R=R(v)$ nelinearna funkcija brzine (slika 20.17b). Analiza pokazuje da osetljivost dR/dv pri $I=const$ opada sa porastom v . Zato je poželjno da struja grejanja I bude što veća, te da se termoanemometar upotrebljava za merenje manjih brzina.

Tipična merna šema za termoanemometar u režimu $I=const$ gradi se kao Vitstonov most napajan generatorom struje (slika 20.17a). Generator daje nepromenljivu struju $I_0=const$. Kod gradnje mosta otpornici se biraju tako da bude $(R + R_2) \ll (R_3 + R_4)$, pa je tada $I \approx I_0 = const$. Izlazni napon $U(v)$ dobija se pojačanjem napona sa merne dijagonale mosta. Ovaj napon je nelinearna funkcija i samo u uskom opsegu proporcionalan je brzini. Ukoliko je potrebna proporcionalnost za veći opseg brzine, neophodna je linearizacija statičke karakteristike $U = U(v)$.

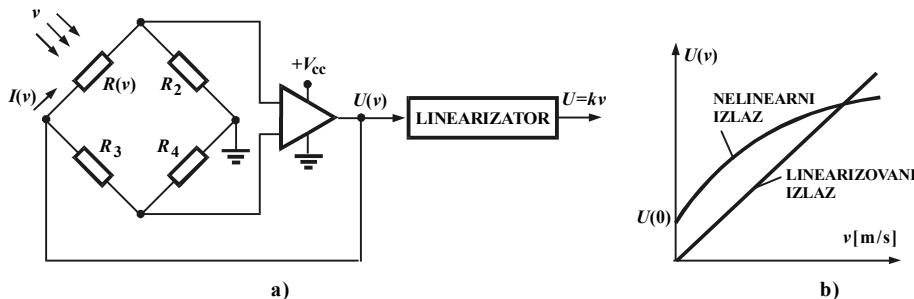


Slika 20.17. Termoanemometar u režimu $I=const$: a) merna šema, b) tipična zavisnost $R=R(v)$

Termoanemometar u režimu $T=const$ i $I=I(v)$. Povećanjem brzine fluida termootpornik se hlađi, pa je potrebno povećati struju da bi se očuvala njegova zadana temperatura, $T=const$. Analiza pokazuje da je $I=I(v)$ nelinearna funkcija. Osetljivost senzora je zato različita na pojedinim segmentima opsega ($dI/dv \neq const$), tj. zavisi od brzine fluida.

Za termoanemometar koji radi u režimu konstantne temperature neophodna je šema sa promenljivim generatorom struje, gde se vrednost struje automatski prilagođava. Za ove namene pogodna je šema sa pojačavačem u čijoj se povratnoj grani nalazi Vitstonov most sa termoanemometrom (slika 20.18). Za početno stanje,

kada fluid miruje ($v=0$), na izlazu pojačavača je napon $U(0)$, a most je u ravnoteži, tj. $R(0) = R_2R_3/R_4$. Napon $U(0)$ je istovremeno napon napajanja mosta i projektuje se tako da struja $I(0)$ kroz termootpornik R bude dovoljna da ga zagreje na zadanu temperaturu ($T=const$).



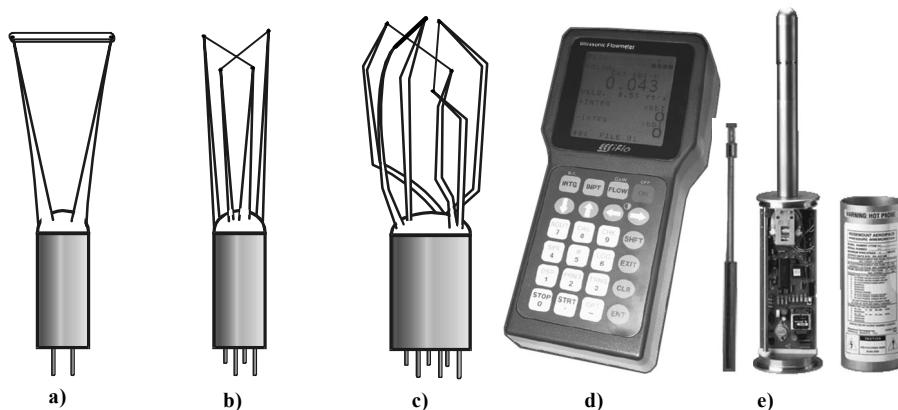
Slika 20.18. Termoanemometar u režimu $T=const$: a) šema sa automatskom kompenzacijom mernog mosta,b) tipični oblik izlaznog napona $U(v)$

Sa porastom brzine fluida v termootpornik se hlađi, njegov otpor i temperatura opadaju, ravnoteža mosta se narušava, a napon na izlazu pojačavača raste. Ovaj porast dovodi do povećanog napajanja mosta, veće struje kroz senzor i zagrijavanja, sve dok ne dostigne temperaturu $T=const$. Tada je most u ravnoteži, a izlaz pojačavača $U(v)$ je funkcija merene brzine. Struja kroz senzor se, praktično, trenutno pretvara u toplotu, i zato način rada sa konstantnom temperaturom omogućava merenje brzine toka sa fluktacijama čije su gornje vrednosti 300 – 500 kHz.

Izrada termoanemometra. Termoanemometri se prave od metalnih ili poluprovodničkih otpornika u obliku žice ili filma. Žica je obično od platine, volframa ili nikla, dužine 5 – 10 mm, prečnika 0,5 – 2 mm i upeta je na posebnim nosaćima (slika 20.19a). Povećanjem prečnika termoniti poboljšavaju se mehanička čvrstoća i pouzdanost, ali je za njeno zagrijavanje potrebna veća struja. Deblja žica ima i veću tromost, pa se zbog toga može primeniti samo za merenje malih brzina fluida. Pomoću termoanemometra od platske i volframove žice mere se lokalne brzine toka vazduha i vode u opsegu 100 – 500 m/s i frekvencije do 400 kHz, dok je u opsegu manjih brzina (0,01 – 5 m/s) frekvencija manja (5 – 50 kHz).

Termoanemometar u obliku metalnog filma, debljine 0,005 – 0,01 mm, nanosi se na keramičku podlogu površine $(1 \cdot 0,2)\text{mm}^2$ (slika 20.19b). Tankoslojna izvedba ima veliku mehaničku čvrstoću i nešto veću inerciju u poređenju sa žičanom. Pomoću tankoslojnih termoanemometara mere se brzine gasova u opsegu 0,2 – 500 m/s, pri temperaturi do 500 °C i frekvenciji do 450 kHz. Ako je brzina manja (do 1 m/s), granična frekvencija se smanjuje na 1 kHz. Za tečnosti se mere brzine u opsegu 0,01 – 20 m/s, pri temperaturi do 60 °C i frekvenciji do 30 kHz.

Poluprovodnički termoanemometri imaju oblik kuglice ili prstena. Glavne su im odlike velika mehanička čvrstoća i osetljivost, jednostavnost konstrukcije, te mogućnost primene pri velikim temperaturama toka. Vremenska konstanta im je 0,5 – 2,5 s.



Slika 20.19. Konstrukcija termoanemometra: a) jednokomponentni sa tankim slojem platine, b) dvo-komponentni sa upetom žicom, c) trokomponentni senzor, d) anemometar sa elektronskim modulom

Višekomponentni termoanemometri. Treba imati u vidu da tok fluida mora biti okomit na osu termoniti, jer je samo tada topotna ravnoteža odredena jednačinom (20.51). U suprotnom, posebnim faktorom koriguje se uticaj komponente toka duž termoniti.

Posebna je konstrukcija termoanemometra za registraciju komponenata vektora brzine. Za tečenje u ravni to je XY-termoanemometar, sa dve termoniti medusobno ukrštene pod pravim uglom i postavljene u ravni tečenja fluida (slika 20.19c). Na sličan način realizuje se trokomponentni termoanemometar (slika 20.19d).

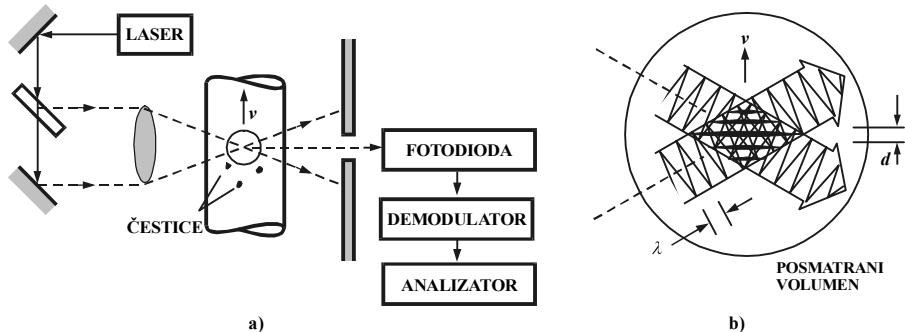
Kompenzacija uticaja okoline. Izlazni signal termoanemometra podložan je uticaju temperature i termičkih parametara mernog fluida. Nestabilnost statičke karakteristike kompenzira se uključivanjem jednog termootpornika u susednu granu Vitstonovog mosta. Ovaj termootpornik istih je karakteristika kao i termonit, a ugrađuje se u njenoj neposrednoj blizini, tako da reaguje samo na promenu temperature, a ne i brzine toka. Na taj način izlazni napon ostaje nezavisан od temperaturnih uticaja okoline.

20.5.3. Laserski Doplerov anemometar

Laserski Doplerov anemometar (LDA) meri lokalnu brzinu fluida na osnovu Doplerovog efekta. Većina današnjih LDA-senzora pri tome koristi interferenciju dva optička zraka. Laserski zrak talasne dužine λ usmeren je od izvora prema prizmi za deljenje zraka (slika 20.19). Iz prizme se dobijaju dva laserska zraka, koji se pomoću pomicnih sočiva fokusiraju na željenu lokaciju. Na mestu preseka, u volumenu oko $0,1 \text{ mm}^3$, poprečno na tok stvaraju se svetle i tamne linije interferencije. Jedan par ovih linija ima širinu:

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2)} , \quad (20.53)$$

gde je θ ugao pod kojim se seku laserski zraci. Optički signal dalje prolazi do fotoprijemnika (fotomultiplikator ili fotodioda). Međutim, iz takvog signala ne može se dobiti informacija o brzini toka. Do nje se dolazi tek nailaskom neke čvrste čestice.



Slika 20.20. Laserski Doplerov anemometar: a) princip rada, b) interferencijske linije u mernom volumenu

Kada čestica nošena fluidom nađe na interferencijske linije, potrebno joj je vreme da pređe jedan par svetlih i tamnih linija:

$$T = \frac{d}{v} = \frac{\lambda}{2v \sin(\theta/2)}. \quad (20.54)$$

Svaki put kada čestica pređe preko svetle linije dolazi do rasejavanja, tj. do promene intenziteta optičkog signala. Na taj način na fotodiodu dolazi modulisani signal, kome se intenzitet menja sa Doplerovom frekvencijom $f_D = 1/T = (2v/\lambda) \cdot \sin(\theta/2)$. Signali iz fotodiode zatim se filtriraju i dobiju se demodulisani impulsi, sa frekvencijom f_D proporcionalnoj merenoj lokalnoj brzini. Za merenje komponenata brzine primenjuju se LDA sa odgovarajućim brojem laserskih zraka i fotoprijemnika.



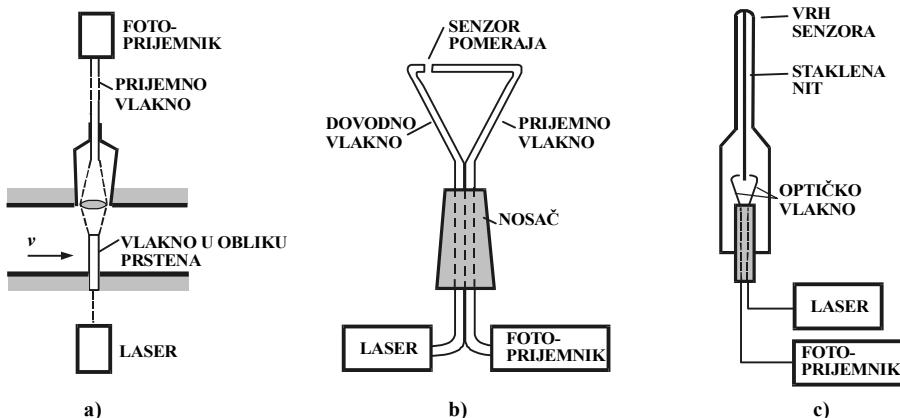
Slika 20.21. LDA: a) izgled predajne i prijemne sonde sa produžecima od optičkog vlakna, b) ispitivanje aerodinamike automobila

Prednost LDA je u beskontaktnom merenju brzine providnih fluida, pre svega vazduha. Tipični opseg merenja je $1 - 2000 \text{ m/s}$, tačnost merenja je $\pm 0,1 - 0,2\%$, a opseg merenih frekvencija $f_D = 100 \text{ MHz}$.

20.5.4. Senzori brzine i protoka sa optičkim vlaknom

Tečenje fluida u tehničkim aparatima i sistemima ima uglavnom turbulentni karakter. Za takvo tečenje karakteristične su prostorne i vremenske fluktuacije pritiska i brzine. Problem merenja vremenskih fluktuacija rešava se povećanjem gornje granične frekvencije senzora, dok se problem prostornih fluktuacija rešava primenom senzora malih dimenzija, pri čemu je najbitnija dimenzija duž gradijenta merene veličine. Termoanemometar i LDA ispunjavaju ove uslove kada su u pitanju tečenja sa malim temperaturnim gradijentom, odnosno kada su fluidi providni. Senzori sa optičkim vlaknom imaju veliku perspektivu u merenju lokalne brzine u turbulentnim tokovima neprovidnih tečnosti, u tokovima sa velikim temperaturnim gradijentom, kao i u tokovima sa gradijentom električne provodnosti.

Jedan od prvih senzora za merenje brzine fluida je tzv. anemometar sa optičkim vlaknom (slika 20.22a). Svetlost iz izvora prolazi kroz optičko vlakno savijeno u obliku prstena i postavljeno okomito na tok. U zavisnosti od brzine toka, vlakno se savija tako da svetlost koja izlazi iz prstena ne dolazi u celosti na prijemno vlakno. Izazvani signal iz fotoprijemnika je tako proporcionalan progibu vlakna u obliku prstena, tj. brzini toka. Mehaničke osobine prstena kao senzora pomeraju menjaju se zavisno od dužine „drške“, tj. od lokacije prstena unutar cevovoda, pa se kalibracija mora provoditi za svaku lokaciju posebno.



Slika 20.22. Senzori brzine sa optičkim vlaknom: a) anemometar sa optičkim vlaknom - generička konstrukcija, b) senzor za providne tečnosti, c) senzor za neprovidne tečnosti

Savremenije izvedbe senzora brzine sa optičkim vlaknom imaju statičku karakteristiku nezavisnu od mesta merenja. Tehnologija njihove izrade je, međutim, veoma komplikovana. To je glavni razlog što se ovi senzori još uvek ne nalaze u komercijalnoj upotrebi, već se izrađuju u velikim naučno-istraživačkim centrima za vlastite potrebe. Na slici 20.20b prikazana je izvedba senzora koji služi za merenje brzine u providnim fluidima. Senzor je u celosti napravljen od stakla. Završeci dovodnog i prijemnog optičkog vlakna posebnim postupkom istegnuti su i suženi do

prečnika od 0,012 mm i savijeni tako da je formirana trouglasta petlja. Završeci su postavljeni sučelice jedan prema drugome i predstavljaju senzor pomeraja. Sonda se postavlja okomito na tok fluida, tj. okomito na ravan crteža. Zakretanje horizontalnog dela dovodnog vlakna proporcionalno je brzini fluida. Izlazni signal iz fotodiode linearna je funkcija brzine.

Posebno je komplikovana izvedba za merenje brzine neprovidnih i elektromagnetnih tečnosti, kao što su, na primer, tečni metali (slika 20.20c). Osobina navedene konstrukcije je odvojenost od tečnosti senzora pomeraja kao primarnog elementa. Ovaj element napravljen je izvlačenjem tankostijene staklene kapilare prečnika 0,5 mm do kapilare prečnika 0,03–0,05 mm. Na izvučenom delu sa unutrašnje strane zavarena je staklena nit dužine L i prečnika 0,02 mm sa neprovidnim slobodnim krajem. Kada se vrh senzora pomeri za Δy , on se zakrene za ugao θ , tako da se slobodni neprovidni kraj niti pomeri za $\Delta r = L \sin \theta - \Delta y$. U zavisnosti od brzine toka, slobodni kraj niti moduliše prolaz svetlosti između dovodnog i prijemnog vlakna, te se na izlazu dobija signal proporcionalan merenoj brzini toka.

20.5.5. Vizuelizacija protoka

Distribucija brzine fluida u aparatima ili oko radnih profila daje važne odgovore, neophodne za njihovu bolju konstrukciju. U tom smislu vizuelizacija protoka na bazi holografske interferometrije ima veliku perspektivu. Kod dvodimenzionalnih protoka metoda daje tačne kvantitativne podatke o gustini vazdušnog polja, dok kod trodimenzionalnih protoka omogućava brzu procenu 3D-polja protoka u slučajevima hidrauličkih udara, vrtložnih struja, vrtložnih repova, pograničnog sloja i dr.

Za vizuelno predstavljanje protoka primenjuje se metod holografske interferometrije sa dvostrukom ekspozicijom. Prva ekspozicija registruje se u odsustvu protoka u ispitivanoj sekciji, a druga ekspozicija registruje se pri određenoj vrednosti ulaznog pritiska vazduha, tj. pri nekom toku u posmatranoj sekciji. Merni sistem sličan je ranije opisanom holografskom interferogramu, pri čemu se objektni laserski zrak usmerava na ispitivanu sekciju. Nakon prolaska kroz test-sekciju objektni zrak interferira sa referentnim zrakom i formira holografsku sliku protoka. Kvalitativna slika interferograma daje mnoge korisne informacije o komplikovanom polju protoka (slika 20.21.a). Digitalnom obradom interferograma formira se izometrijska slika gustine gasa u test-sekciji (slika 20.21.b). Osnova za obradu je izračunavanje reda interferometarske pruge, koja se za bilo koju tačku polja (x, y) može izraziti u obliku

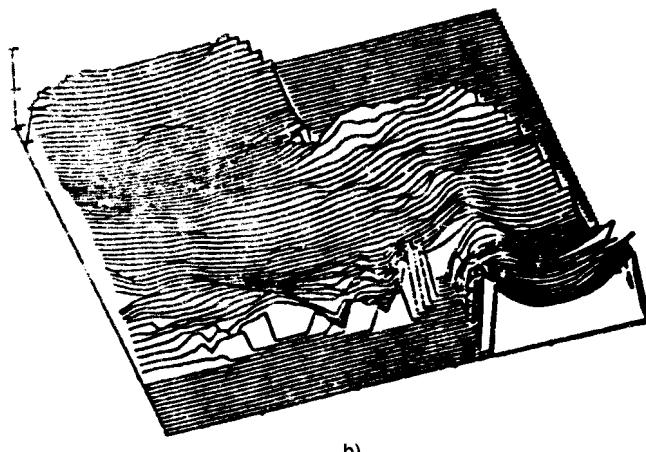
$$N(x, y) = \frac{C}{\lambda} L \Delta \rho(x, y), \quad (20.55)$$

gde su: C Gledston-Dalova konstanta, λ talasna dužina laserske svetlosti, L dužina puta kroz test-sekciju i $\Delta \rho$ promena gustine gasa između dveju ekspozicija.

Nove mogućnosti u primeni holografske interferometrije na bazi dvostrukе ekspozicije odnose se na praćenje drugih fizičkih veličina gase, koje su u vezi sa gustinom. Iz jednačine gasnog stanja $\rho = p/R_0 T$ proizilazi da se mogu odrediti pritisak i temperatura gase. U tom slučaju, međutim, treba dobro poznavati proces koji



a)



b)

Slika 20.23. Holografski interferogram: a) promena gustine u test-sekciji složenog oblika
b) izometrijski prikaz gustine za jednu podsekciju dobijen proračunom

izaziva promenu gustine. Na primer, ako se pretpostavi izobarski proces, promena temperature u test sekciji povezana je sa promenom pritiska relacijom $\Delta T = -T \Delta p / \rho$.

PITANJA I ZADACI

- 1) Koji su načini predstavljanja protoka? Zašto je maseni protok najegzaktniji?
- 2) Brzina vode gustine u cevovodu na mestu gde je postavljena Pitoova cev je $v = 0,1 \text{ m/s}$. Gustina vode je $\rho = 985 \text{ kg/m}^3$, a konstrukcioni koeficijent Pitoove

cevi je $k_c = 0,97$. Kolika je vrednost dinamičkog pritiska?

Rešenje: $p_{\text{din}} = k_c \rho v^2 / 2 = 4,78 \text{ Pa}$.

- 3) Da li promena temperature utiče na izlazni signal kada se protok meri pomoću merne prigušnice? Koji su načini da se ovaj uticaj uzme u obzir?
- 4) Ako se promeni smer toka fluida, da li će se promeniti izlazni signal indupcionog senzora protoka?
- 5) Indukcioni senzor protoka postavljen je u cevovod prečnika $D = 100 \text{ mm}$. Protok vode je $Q = 200 \text{ m}^3/\text{h}$, a magnetna indukcija elektromagneta je $B = 0,01 \text{ T}$. Izračunati vrednost indukovanih napona na izlazu senzora.
Rešenje: $E = BDv = BD \frac{4Q^2}{\pi D^2} = 7,07 \text{ mV}$.
- 6) Protok vode meri se ultrazvučnim Doplerovim senzorom. Prijemnik i predajnik nalaze se na osi cevovoda. Predajnik generiše ultrazvuk frekvencije $f_0 = 10 \text{ MHz}$. Ako je brzina fluida 15 m/s , kolika je Doplerova frekvencija? Kolika bi bila Doplerova frekvencija ukoliko bi predajnik generisao radio-talase od 10 GHz ? (Brzina ultrazvuka u vodi je 330 m/s a radio-talasa $3 \cdot 10^8 / (4/3) \text{ m/s}$).
Odgovor: $f_{D1} = 0,9 \text{ MHz}$, $f_{D2} = 1,3 \text{ kHz}$.
- 7) Protok vode u cevovodu prečnika $D = 100 \text{ mm}$ menja se u opsegu $0 \text{--} 300 \text{ m}^3/\text{h}$. Protok se meri ultrazvučnim senzorom. Predajnik i prijemnik senzora smešteni su duž ose cevovoda na rastojanju $L = 300 \text{ mm}$. Ako je brzina ultrazvuka u vodi 1500 m/s , izračunati:
a) vremenski interval Δt_1 , koji odgovara prolazu ultrazvučnih valova emitovanih niz tok pri promeni $Q_0 - Q_{\max}$;
b) vremenski interval Δt_2 , koji odgovara razlici vremena prolaza ultrazvučnih valova niz tok i uz tok, pri čemu predajnik i prijemnik zamenjuju uloge;
c) razliku faza $\Delta\theta$ zbog različite brzine prostiranja ultrazvučnih valova niz tok i uz tok, pri čemu je frekvencija ultrazvučnih valova 20 kHz .
Odgovor: a) $\Delta t_1 = 1,4 \text{ ms}$; b) $\Delta t_2 = 2,83 \text{ ms}$; c) $\Delta\theta = 0,355 \text{ rad}$.
- 8) Odrediti ugao konusne cevi rotametra kojim se meri protok vode $Q = 10 \text{ -- } 500 \text{ l/h}$. Podaci: gustina vode $\rho_v = 998,2 \text{ kg/m}^3$, visina cevi $H = 160 \text{ mm}$, površina poprečnog presaka plovka $S_p = 78,6 \text{ mm}^2$, volumen plovka $V_p = 600 \text{ mm}^3$, gustina materijala od kojeg je napravljen plovak $\rho_p = 7870 \text{ kg/m}^3$, te koeficijent protoka rotametra $\alpha = 0,98$.
Odgovor: $\varphi = 1^\circ 9' 42''$.
- 9) Koje su osnovne odlike termičkih metoda za merenje brzine i protoka fluida?
- 10) Koje su prednosti anemometra sa optičkim vlaknom u poređenju sa termoanemometrom kada je u pitanju merenje prostornih fluktuacija brzine toka?

11) Da li se LDA-senzor može upotrebiti za merenje brzine neprovidnih tečnosti? Koje su poteškoće obrade optičkog signala dobijenog rasejavanjem svetlosti?

LITERATURA

1. F. Čorlukić: *Mjerenje protoka fluida*, ATM, Tehnička knjiga, Zagreb, 1975.
2. *Instrument Handbook*, Vol.2, Process Measurement, B.G. Liptak, editor, Chilton Book Company, Philadelphia, 1969.
3. N.G. Farzane, L.V. Iljasov, A.J. Azim-zade: *Tehnologičeskie izmerenija i pribory*, Vysšaja škola, Moskva, 1989.
4. V.M. Zemljanskij: *Izmerenie skorosti potokov lazernym doplerovskim metodom*, Višća škola, Kijev, 1989.
5. V.G. Žilin: *Volokonno-optičeskie izmeritel'nye preobrazovateli skorosti i davlenija*, Energoatomizdat, Moskva, 1987.
6. P. Kesić: *Turbinsko mjerilo protoka i zapremine*, Zb. „Mjerenje protoka“, knjiga 3, svezak 1, „Škola merenja, automatike i kibernetike“, str. 1-13, JUREMA, Zagreb, 1980.
7. R. Marinković: *Elektronski pretvarači turbinskih mjerila protoka*, Zb. „Mjerenje protoka“, knjiga 3, svezak 1, „Škola mjerjenja, automatike i kibernetike“, str. 13-25, JUREMA, Zagreb, 1980.
8. H.V. Malmstadt, C.G. Enke, S.R. Crouch: *Elektronic Measurements for Scientists*, W.A. Benjamin, Inc, Menlo Park, California, 1974.
9. *Turbinski mjerač protoka i količine*, opšta informacija, Energoinvest, Sarajevo, 1983.
10. *OMEGA Complete Flow and Level Measurement Handbook and Encyclopedia 1986*, Omega Engineering, Inc, Stamford, USA.
11. D. Goli: *Automatizacija klimatizacionih uređaja*, SMEITS, Beograd, 1989.
12. S.A. Spektor: *Električeskie izmerenija fizičeskikh veličin*, Energoatomizdat, Lenjingrad, 1987.
13. P.P. Kremlevskij: *Rashodomery i sčetčiki količestva*, Mašinostroenie, Lenjingrad, 1989.
14. D. Stanković: *Fizičko-tehnička merenja*, Naučna knjiga, Beograd, 1987.
15. S.J. Berezin, O.G. Karataev: *Korrelacionnye izmeritel'nye ustroistva v avtomatike*, Energija, Lenjingrad, 1976.
16. E.A. Šornikov: *Izmeritel'no-vychislitel'nye ustroistva v teploenergetike*, Energoatomizdat, Lenjingrad, 1985.
17. A.F.P. VanPutten: *Anemometer production: a silicon success story. A state-of-the-art review of hot wire flow-measurement*, Sensor Review, 9(1), p. 47-51, 1989.
18. *Senzori protoka: principi rada i konstrukcije*: www.engineeringtoolbox.com/49.html, www.flows.com, www.greylime.com/howitwk.htm#Doppler%20Flow, www.epiflow.com, www.sensormag.com, www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/pubs/wmm/indexframe.html, www.dantec.dynamics.com
19. *Dokumentacija proizvodača*: www.rosemount.com, www.omega.com, www.krohne.com, www.greylime.com/pdfm.htm, www.koboldmessring.com, www.eesiflo.com

21

MERENJE TEMPERATURE

21.1. METROLOŠKI OSNOVI MERENJA TEMPERATURE

Temperatura (lat. temperatura – blaga toplina, ublažavanje) jeste fizikalna veličina koja predstavlja stepen zagrejanosti tela. Temperatura je povezana sa termičkim kretanjem molekula ili atoma, tj. sa termodinamičkim stanjem tela i njegovom unutrašnjom energijom. Termičko kretanje u gasovima razlikuje se od termičkog kretanja u tečnostima i kristalima. Prema kinetičkoj teoriji gasova, apsolutna temperatura T tela definiše se kao mera srednje energije translatornog kretanja molekula gasa:

$$\bar{E}_k = \frac{m\bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2} kT , \quad (21.1)$$

gde su: m masa molekula gasa, \bar{v} srednja brzina molekula, k Boltmanova konstanta. Pri datoј temperaturi kinetička energija pojedinih molekula razlikuje se od srednje kinetičke energije, odakle proizilazi da je temperatura statistička veličina, koja se odnosi na veliki broj čestica koje se nalaze u toplotnoj ravnoteži.

Intenzivnost temperature. Fizikalne veličine kao što su masa, dužina, pritisak i druge označavaju se kao ekstenzivne ili parametarske, jer se sa povećanjem objekta povećava i njihova vrednost. Za razliku od ovih veličina, temperatura je intenzivna ili aktivna veličina. Njen intenzivni karakter ogleda se u tome što će prilikom deljenja tela na više delova svaki deo zadržati temperaturu tog tela. Drugim rečima, temperatura nema svojstvo aditivnosti. Za temperatuру se ne može izgraditi delitelj ili sabirač. Zbog toga se etalon temperature ne može praviti na način kako se to radi za ekstenzivne veličine.

Termometar. U skladu sa drugim zakonom termodinamike, pri uzajamnom delovanju dva tela sa različitim temperaturama prelazi toplota od tela sa većom energijom na telo sa manjom energijom. Prelaženje toplote vrši se kondukcijom, konvekcijom i radijacijom. Promena topotnog stanja tela koja tada nastaje praćena je popratnim efektima i fenomenima, kao što su dilatacija, ekspanzija, termoelektricitet, zračenje itd. Zbog popratnih efekata menjaju se određena fizikalna svojstva tela, tj. odgovarajuće veličine: dužina, volumen, termoelektrična sila, električni otpor i dr. Ovo su termometrijske veličine, jer se njihovim direktnim merenjem dolazi do vrednosti temperature. Iz ovoga se zaključuje da je temperaturu moguće izmeriti samo posrednim putem, preko termometrijskih veličina, koje su podložne direktnom merenju i u funkcionalnoj su vezi sa temperaturom.

Senzor za merenje temperature obično se naziva termometrom, a oblast merenja temperature termometrijom.

Razvoj termometrije. Temperatura je najčešće merena veličina u tehnološkim procesima i na nju otpada oko 60% svih merenja u toj oblasti. Veliki je značaj merenja temperature i u drugim oblastima nauke i tehnike, u medicini, u svakodnevnom životu. Smatra se da je prvi termometar konstruisao Galilej 1592. god. (1597?) na principu širenja gasova. U otvorenu posudu napunjenu alkoholom on je postavio dugu staklenu cevčicu na čijem je kraju bila staklena kugla. Kada se vazduh u kugli zagrejavao, nivo tečnosti u cevčici je opadao, a sa hladnjem kugle rastao. Tako je temperatura kugle merena na osnovu nivoa alkohola u cevčici. Ovaj prvi termometar pod nazivom termoskop, davao je slabu indikaciju temperature budući da je nivo zavisio od atmosferskog pritiska, a cevčica nije imala nikakvu skalu.

Holandanin Farenhajt je 1711. umesto alkohola upotrebio živu i prvi definišao termometrijsku skalu. Za fiksnu tačku u donjem delu skale uzeo je temperaturu smese leda i soli (ili amonijum-hlorida), tj. najnižu temperaturu koju je mogao reproducovati i označio je sa 32 stepena. Za fiksnu tačku u gornjem delu skale uzeo je temperaturu ključanja vode i označio je sa 212 stepeni. Francuski fizičar Reomir je 1730. konstruisao termometar sa alkoholom. Fiksne tačke su bile 0° (mržnjenje vode) i 80° (ključanje vode). Švedanin Celzijus 1742. god. uzeo je iste fiksne tačke i označio ih sa 100° i 0° , da bi tek 1845. ove vrednosti bile obrnute i tako nastala centigradna skala. Od 1948. ova skala se i zvanično zove Celzijusova. Konstrukcija modernih senzora temperature počinje 1821. god. i vezana je za Zebekovo otkriće termoelektriciteta. Za merenje visokih temperatura osnov je Stefan-Bolcmanov zakon zračenja.

Temperaturne skale. Temperaturna skala predstavlja funkcionalnu vezu između temperature i neke termometrijske veličine. Pomoću ove definicije moguće je uspostaviti proizvoljan broj različitih temperaturnih skala. Sve one imaju uslovni karakter, pa se i njihovi podeoci označavaju uslovnim stepenima. U širokom temperaturnom intervalu, osim toga, svaka termometrijska veličina je nelinearna funkcija temperature, te podložna uticaju drugih veličina.

Prve temperaturne skale (Farenhajtova, Reomirova, Celzijusova) definisane su na osnovu zavisnosti temperature T i volumena tečnosti V kao termometrijskog svojstva, koja je u opštem slučaju data približnom relacijom:

$$T = a + bV, \quad (21.2)$$

gde su a i b konstante. Pri fiksnim (repernim) tačkama T_1 i T_2 , volumen tečnosti u termometru je V_1 i V_2 , na osnovu čega se mogu odrediti koeficijenti a i b . Tako se dobija opšta jednačina za pomenute tri temperaturne skale:

$$T = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{V_2 - V_1} (V - V_1). \quad (21.3)$$

Uslovni karakter Farenhajtove, Reomirove i Celzijusove temperaturne skale očigledan je, budući da se međusobno razlikuju samo po načinu kako je isti

temperaturni interval $T_2 - T_1$ podeljen na stepene. Zato ovi stepeni nisu (apsolutne) merne jedinice, već samo razmere na skali.

Termodinamička temperaturna skala. Problem nezavisnosti temperaturne skale od termometrijskog svojstva radnog medija rešio je engleski fizičar Kelvin 1848. On je predložio termodinamičku temperaturnu skalu koja je, za razliku od dotadašnjih, apsolutna. Termodinamička temperaturna skala zasniva se na primeni drugog zakona termodinamike. U skladu sa tim zakonom, koeficijent korisnog delovanja η idealne topotne mašine, koja radi po obratnom Karnoovom ciklusu, ne zavisi od osobina radnog medija, već samo od temperature toplog tela T_t , od kojeg mašina prima količinu toplote Q_t i temperature hladnog tela T_h , kome mašina vraća količinu toplote Q_h , odnosno:

$$\eta = \frac{T_t - T_h}{T_t} = \frac{Q_t - Q_h}{Q_t}, \quad (21.4)$$

odakle proizilazi odnos:

$$\frac{T_t}{T_h} = \frac{Q_t}{Q_h}. \quad (21.5)$$

Jednakim intervalima količine toplote razmenjene tokom ciklusa odgovara uvek isti interval temperature. Zato je Kelvin predložio da se odnos temperatura meri pomoću odnosa količine toplote i tako, zapravo, definisao termodinamičku temperaturnu skalu. Saglasno prethodnom objašnjenju, ta skala ne zavisi od radnog medija, tj. od njegovih termometrijskih osobina. Da bi apsolutna temperatura, a ne samo odnos temperatura, imala neku vrednost, prihvaćeno je da između termodinamičke temperature ključanja vode T_{kv} i termodinamičke temperature topljenja leda T_{tl} bude razlika od 100, očigledno, kao ustupak centogradnoj Celzijusovoj skali. Na temelju jednačine (21.4) i prihvaćene razlike $T_{kv} - T_{tl} = 100$ dobije se jednačina centogradne termodinamičke temperaturne skale:

$$T = \frac{Q}{Q_{kv} - Q_{tl}} 100, \quad (21.6)$$

gde je Q_{kv} količina toplota koju topotna mašina radeći po obratnom Karnoovom ciklusu uzima od toplog tela (ključala voda), a Q_{tl} količina toplote koju mašina predaje hladnom telu (otapajući led). Termodinamička temperatura T linearna je sa količinom toplote Q , koja se dobija od radnog medija i nezavisna je od njegovih termometrijskih osobina.

Apsolutna nula. Analiza jednačine (21.4) pokazuje da se maksimalni koeficijent korisnog dejstva $\eta = 1$ dobija kad je $T_h = 0$. Ova temperatura označava se Kelvinovom apsolutnom nulom.

Jedinica termodinamičke skale. Budući da je termodinamička skala (21.6) linear, ona se može definisati samo pomoću jedne vrednosti temperature. Konsultativni komitet za termometriju Međunarodnog komiteta za mere i utege je 1954. preporučio da se kao reperna tačka za definisanje termodinamičke skale uzima trojna tačka vode – ravnotežno stanje triju fazu vode. Temperatura ove tačke je

$T = 273,16\text{ K}$, odnosno $t = 0,01^\circ\text{C}$, a relativno lako se može realizovati. Generalna konferencija za mere i utege 1967. usvojila je konačnu definiciju za jedinicu termodinamičke temperature: kelvin (K) je $1/273,16$ deo termodinamičke temperature trojne tačke vode. Termodinamička temperatura $T[\text{K}]$ može se definisati i relacijom:

$$T = t + 273,15, \quad (21.7)$$

gde je temperatura t izražena u Celzijusovim stepenima, ${}^\circ\text{C}$. Odavde je $t = T - 273,15$. S obzirom da apsolutna i centigradna skala imaju iste reperne tačke, očigledno da promeni $\Delta T = 1\text{ K}$ odgovara promena $\Delta t = 1 {}^\circ\text{C}$.

Internacionalna praktična termodinamička skala – IPTS. Termodinamička temperaturna skala ima veliki teorijski i principijelni značaj. Međutim, realizacija termometra kao idealne toplotne mašine, koja radi po obratnom Karooovom ciklusu, praktično je neostvarljiva. Zato je neophodno uspostaviti vezu između termodinamičke skale i realnih termometara.

Termodinamička skala realizuje se primenom jednačine gasnog stanja, $pV = RT$, tj. pomoću gasnog termometra. U dosta širokom temperaturnom opsegu ($3 - 1300\text{ K}$) tako dobijena temperaturna skala razlikuje se od termodinamičke za $0,003 - 0,02\text{ K}$. Rad sa gasnim termometrom dosta je složen, jer je teško osigurati sličnost realnog i idealnog gasa.

Internacionalna praktična temperaturna skala (IPTS) sastoji se od 13 osnovnih i 31 sekundarnih repernih tačaka, koje odgovaraju faznim prelazima nekih čistih materijala. Ove tačke su reproducibilne i proverene etalonskim termometrima. Od uspostavljanja 1927. godine IPTS-skala je dopunjavana u više navrata (1948, 1960, 1968 i 1975), a prema dopuni iz 1968. godine imala je naziv IPTS-68.

Internacionalna temperaturna skala ITS-90. Odstupanje temperatura, prema Internacionalnoj temperaturnoj skali IPTS-68, od termodinamičkih temperatura najveće je u oblasti primene termoelemenata $Pt-Rh(10\%)/Pt$ kao interpolacionog instrumenta. Iz tih razloga je Međunarodni komitet za mere i utege (CIPM) 1989. proglašio aktuelnu Internacionalnu temperaturnu skalu ITS-90, koja je stupila na snagu 1.1.1990. Temperatura se prema ITS-90 označava sa $T_{90} [\text{K}]$ ili $t_{90} [{}^\circ\text{C}]$, pri čemu je veza između Kelvinove i Celzijusove temperature $T_{90} = t_{90} + 273,15$.

Osnovne razlike između ITS-90 i IPTS-68 su sledeće:

- numeričke vrednosti svih osnovnih tačaka (osim trojne tačke vode) su promjenjene, čime je obezbeđeno bolje slaganje ITS-90 i termodinamičke skale (tabela 21.1);
- umesto termopara $Pt-Rh(10\%)/Pt$ kao interpolacioni instrument upotrebljava se platinski otpornik za temperature do tačke očvršćavanja srebra, odnosno spektralni pirometar od te tačke pa do tačke očvršćavanja zlata;
- ITS-90 predstavlja značajno poboljšanje u pogledu približavanja apsolutnim temperaturama u oblasti viših temperaturama, pa je zato razlika u numeričkim vrednostima temperatura T_{90} i T_{68} manja pri niskim temperaturama (na

primer, $T_{90} - T_{68} = -0,006 \text{ K}$ pri $T_{90} = 50 \text{ K}$), a veća pri višim temperaturama (na primer, $T_{90} - T_{68} = -2,43 \text{ K}$ pri $T_{90} = 3900 \text{ K}$);

- interpolacioni instrumenti ne mogu se upotrebljavati za praktična merenja.

FIKSNA TAČKA (RAVNOTEŽNO STANJE FAZA)	IPTS-68 $t_{68}=T_{68}-273,15$		ITS-90 $t_{90}=T_{90}-273,15$		p [Pa]
	T_{68} [K]	t_{68} [°C]	T_{90} [K]	t_{90} [°C]	
Pritisak pare helijuma	–	–	3 do 5	–270,15 do –268,15	101 325
Trojna tačka ravnotežnog helijuma	13,81	– 259,34	13,8033	–259,3467	101 325
Pritisak pare ravnotežnog vodonika ili helijuma	17,042	– 256,108	17	–256,15	33 330,6
Pritisak pare ravnotežnog vodonika ili helijuma	20,28	– 252,87	20,3	–252,85	101 325
Trojna tačka neona	–	–	24,5561	–248,5939	101 325
Tačka ključanja neona	27,102	– 246,048	–	–	101 325
Trojna tačka kiseonika	54,361	– 218,789	54,3584	–218,7916	101 325
Trojna tačka argona	83,798	– 189,352	83,8058	–189,3442	101 325
Tačka rosišta kiseonika	90,188	– 182,962	–	–	101 325
Trojna tačka žive	–	–	234,3156	–38,8344	101 325
Trojna tačka vode	273,16	0,01	273,16	0,01	101 325
Tačka topljenja galijuma	–	–	302,9146	29,7646	101 325
Tačka ključanja vode	373,15	100	–	–	101 325
Tačka očvršćavanja indijuma	–	–	429,7485	156,5985	101 325
Tačka očvršćavanja kalijuma	–	–	505,078	231,928	101 325
Tačka očvršćavanja olova	505,1181	231,9681	–	–	101 325
Tačka očvršćavanja cinka	692,73	419,58	692,677	419,527	101 325
Tačka očvršćavanja aluminijuma	–	–	933,473	660,323	101 325
Tačka očvršćavanja srebra	1235,08	961,63	1234,93	961,78	101 325
Tačka očvršćavanja zlata	1337,58	1064,43	1337,33	1064,18	101 325
Tačka očvršćavanja bakra	–	–	1357,77	1084,62	101 325

Tabela 21.1. Osnovne reperne tačke IPTS-68 i ITS-90

Osnovne i sekundarne reperne tačke predstavljaju aproksimaciju termodinamičke skale. Između ovih tačaka vrši se aproksimacija, koja je definisana sa ITS-90. Na primer, u opsegu 0–961,78 °C temperatura T_{90} je definisana pomoću platinskog otporničkog termometra kao odnos između njegove otpornosti na temperaturi T_{90} i temperaturi trojne tačke vode: $W(T_{90}) = R(T_{90})/R(273,16 \text{ K})$. Interpolaciona (referentna) funkcija data je relacijom:

$$W(T_{90}) = C_0 + \sum_{i=1}^9 C_i \left[\frac{T_{90} - 754,15}{481} \right]^i,$$

gde su vrednosti koeficijenta C_0 i C_i date u tekstu ITS-90.

21.2. EKSPANZIONI SENZORI TEMPERATURE

Ekspanzionalni senzori temperature su termometri čiji se radni medij grejanjem širi, a hlađenjem skuplja, tako da linearno menja svoje geometrijske dimenzije. Ukoliko je radni medij smešten u prostor sa konstantnom zapreminom, tada se umesto promene dimenzija javlja promena pritiska.

Gasni ekspanzionalni senzor temperature. Promena pritiska kaptiranog gasa u zavisnosti od temperature (pri $V = \text{const.}$), saglasno Gej-Lisakovom zakonu je:

$$p_t = p_0 (1 + \alpha t), \quad (21.8)$$

gde su: p_0 pritisak gase na temperaturi 0°C , p_t pritisak gase na temperaturi t i α termički koeficijent pritiska, jednak $1/273,15 = 0,00366\text{ K}^{-1}$ za idealni gas. Za realne gasove α ima približno istu vrednost kao i za idealni gas.

Gasni ekspanzionalni senzori temperature sastoje se od balona kao rezervoara gase, kapilare kao spojnog voda i senzora pritiska (slika 21.1a). Senzor pritiska obično je Burdonova cev ili spirala, pa odatle tradicionalni naziv manometarski termometri. Postoji veliki broj različitih praktičnih izvedbi gasnih ekspanzionih senzora temperature za industrijska merenja. U izboru najpogodnijeg odlučujući su faktori: kompenzacija termičkog širenja, ravnomernost podele skale, konstrukcija i veličina balona, dužina kapilare, materijal od kojeg su izrađeni balon i kapilara, cena i drugo.

Jednačina (21.8) važi pod uslovom da je ukupna unutrašnja zapremina balona V_b , kapilare V_k i senzora pritiska V_p , konstantna i nezavisna od temperature. Smatra se da je uslov ispunjen ako je $(V_p + V_k) : V_b \leq 1 : 100$. Za potpunu kompenzaciju termičke ekspanzije zapremina V_p i V_k primenjuje se diferencijalni sistem sa mernim i kompenzacionim senzorom (slika 21.1a). Oni su u svemu isti, jedino kompenzacioni nema balona. Njihovi senzori pritiska (spirale) povezani su tako da se uticaj temperature okoline u celosti eliminiše.

Tipični parametri gasnog ekspanzionog senzora temperature su: prečnik balona $20 - 30\text{ mm}$, dužina kapilare $250 - 500\text{ mm}$ (maksimalno do 50 m), opseg primene od -150°C do 600°C , tačnost $\pm 0,5 - 2\%$ mernog opsega sa mogućnošću prekoračenja do $150 - 300\%$, vremenska konstanta $4 - 7\text{ s}$, najčešći gas je azot, te početni pritisak pri nominalnoj temperaturi $p_n = 1 - 3\text{ MPa}$.

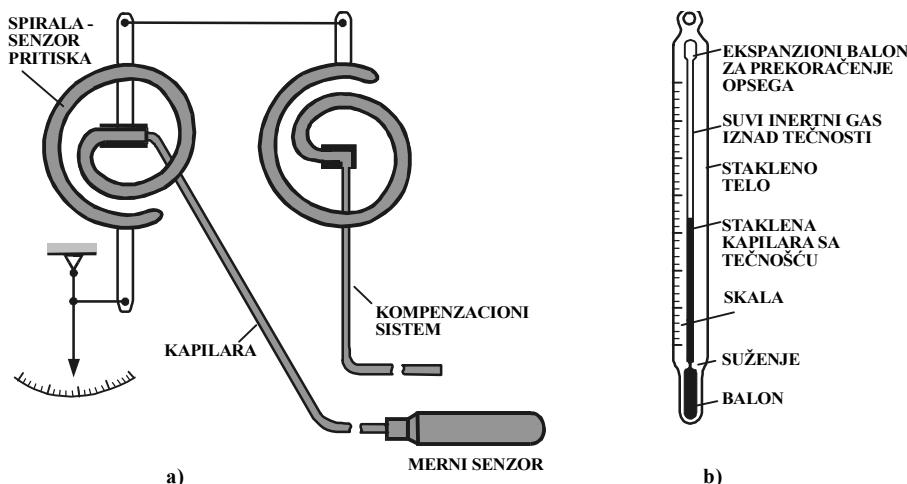
Parni ekspanzionalni senzori temperature ispunjeni su zasićenom parom neke lako isparljive tečnosti (metil-hlorid, propan, aceton, toluol, freon). Po konstrukciji, ovi senzori su slični gasnim. Međutim, tečnost (kondenzat) na nominalnoj temperaturi ispunjava samo do $(0,7 - 0,75)V_b$, tako da je iznad njene površine zasićena para. Pritisak zasićene pare izrazito je nelinearna funkcija temperature:

$$p = T^a e^{-b/T}, \quad (21.9)$$

gde su a i b konstante. Za tačnija merenja potrebna je linearizacija statičke karakteristike $p = f(T)$. Pritisak p približno se udvostručava pri porastu temperature za

10 °C. Kraj kapilare uvek je uronjen u tečnost, čime se odstranjuje uticaj promenljive zapreminе u balonu iznad nivoa tečnosti.

Opseg primene ovih senzora je od -50 °C do 350 °C. Merni opseg je mali (50 – 100 °C), a merno područje zavisi od karakteristika lako isparljive tečnosti. Specijalne konstrukcije sa helijumom omogućavaju merenje vrlo niskih temperatura (0,5–5 K). Tipična tačnost je ±0,2–2% mernog opsega, a maksimalna dužina kapilare 60 m. Dinamika parnog ekspanzionog senzora temperature predstavlja se aperijskom prenosnom funkcijom prvog reda sa kašnjenjem, pri čemu je vremenska konstanta 4–6 s, a vremenska konstanta kašnjenja 0,12–17 s.



Slika 21.1. Ekspanzioni senzori temperature: a) gasni ekspanzioni senzor sa kompenzacijom uticaja temperature okoline, b) ekspanzioni senzor sa tečnošću

Ekspanzioni senzori sa tečnošću rade na principu termičkog širenja tečnosti, koji opisuje polinom:

$$V_t = V_0[1 + \alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3 + \dots], \quad (21.10)$$

gde su: V_0 zapremina tečnosti na referentnoj temperaturi, V_t zapremina na merenoj temperaturi t , α koeficijent zapreminskog širenja tečnosti 1/°C. Zapreminske koeficijenti višeg reda (β, γ, \dots) veoma su mali i obično se zanemaruju, tako da se polinom (21.10) aproksimira linearom funkcijom $V_t = V_0(1 + \alpha t)$.

Tipični ekspanzioni senzor sa tečnošću je živin termometar (slika 21.1b). Zapreminske koeficijente širenja žive je 0,00018 1/°C. Donja granica mernog opsega određena je tačkom mržnjenja (-38,8 °C), a gornja tačkom ključanja žive (357 °C). Zbog svojih dobrih metroloških karakteristika živin termometar se upotrebljava kao sekundarni etalon temperature, koji je, na temperaturama do 200 °C, samo malo netačniji od platiniskog otporničkog termometra odnosno od termoelemenata na temperaturama do 500 °C. Pored žive, upotrebljavaju se toluol, etil-alkohol, pentan i drugo. Merni opseg je tada znatno manji (150–300 °C), ali je u principu donja granica mernog opsega niža, na primer, kod pentana čak -200 °C.

Kod ekspanzionih senzora sa tečnošću javljaju se sistematske greške zbog:

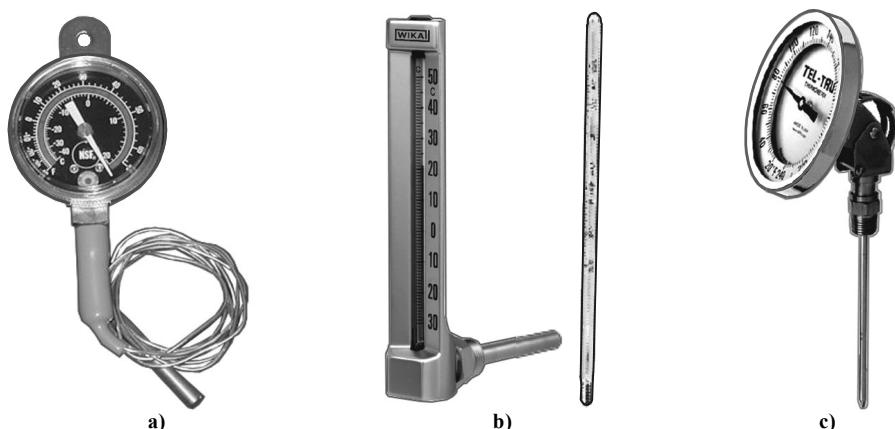
- drifta nule (depresija nule), koji nastaje kao rezultat termičkih svojstava stakla i njegovog starenja;
- nepotpune potopljenosti senzora u mernom mediju, zbog čega je nepotopljeni deo izložen uticaju okoline;
- nejednakosti poprečnog preseka staklene kapilare.

Metrološke karakteristike ekspanzionih senzora sa tečnošću slične su karakteristikama gasnih i parnih ekspanzionih senzora: tačnost im je $\pm 0,1\text{--}2\%$, mogućnost prekoračenja opsega do 150%, maksimalna rezolucija do $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ i vremenska konstanta 4–5 s. Zajedničke osobine navedenih ekspanzionih senzora temperature su jednostavnost, pristupačna cena i dobra mogućnost ugradnje. Ovi senzori upotrebljavaju se gotovo isključivo za indikaciju i laboratorijska merenja temperature, a veoma retko za registraciju ili regulaciju temperature.

Dilatacioni senzor temperature radi na principu povećanja dimenzija čvrstog tela sa porastom temperature. U određenom temperaturnom intervalu zavisnost dužine tela od temperature približno je linearна:

$$l_t = l_0 (1 + \alpha t), \quad (21.11)$$

gde su: l_0 dužina na temperaturi $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, l_t dužina na merenoj temperaturi t i α koeficijent linearne dilatacije (širenja) tvrdog tela. Dilatacioni senzori obično se prave od bakra ($\alpha = 15,3 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/\text{ }^{\circ}\text{C}$), mesinga ($\alpha = 18,3 \cdot 10^{-6} - 23,6 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/\text{ }^{\circ}\text{C}$), legure železa (64%) i nikla (36%) – invara ($\alpha = 0,9 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/\text{ }^{\circ}\text{C}$) i dr. Merni opsezi senzora od navedenih metala su: $0 - 150\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0 - 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, odnosno $0 - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, rezolucija im je do $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, a tipična tačnost $\pm 1,5 - 25\%$ mernog opsega. Dilatacioni senzori temperature primenjuju se u gradnji termostata – dvopozicionog (relejnog) regulatora temperature.



Slika 21.2. Ekspanzionii senzori temperature: a) izgled manometarskog termometra sa sondom, b) stakleni termometar sa tečnošću, c) bimetalni senzor

Bimetalni senzori temperature prave se u obliku trake, spirale ili helikoida od dva sloja različitih metala, na primer invar-mesing, invar-čelik i dr. Zbog različitih koeficijenata linearnog širenja pri porastu temperature bimetalna traka se savija na stranu metala sa manjim koeficijentom linearnog širenja. Raširena je upotreba bimetalne trake u gradnji termostata za temperature u oblasti -30°C do 300°C .

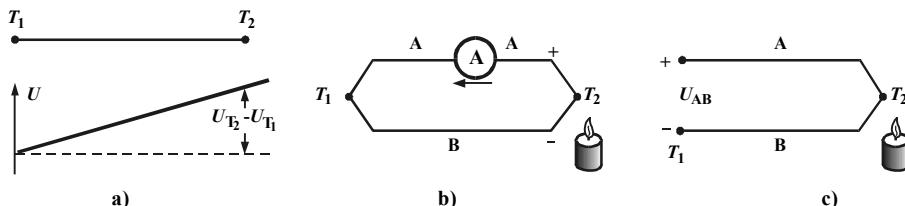
21.3. TERMOELEMENTI

21.3.1. Termoelektrične pojave

Uvod. Prvobitna namena termoelemenata bila je merenje visokih temperatura $500 - 1000^{\circ}\text{C}$. I danas je njihov značaj najveći u merenju tih temperatura, ali je primena uspešno proširena i na vrlo niske temperature od 1K , pa do visokih do 4000°C . Zbog dobrih osobina termoelementi imaju mnogobrojne praktične primene u merenju i regulaciji temperature.

Termoelektrični potencijal. Kada su krajevi provodnika na različitim temperaturama $T_2 > T_1$ između njih nastaje toplotni tok od toplijeg prema hladnjem kraju (slika 21.3a). Prenos toplote je, prema tumačenju kvantne teorije, usko povezan sa kretanjem slobodnih elektrona. Njihova koncentracija i pripadni potencijal neravnomerno su raspoređeni duž provodnika, pa se javlja struja:

$$I_e = -K_e \frac{dU}{dx}. \quad (21.12)$$



Slika 21.3. Termoelektrični efekt: a) nastanak termoelektričnog potencijala, b) zatvoreno termoelektrično kolo, c) otvoreno termoelektrično kolo sa dva

Istovremeno se javlja i struja zbog temperaturnog gradijenta:

$$I_T = -K_T \frac{dT}{dx}. \quad (21.13)$$

Koeficijenti K_e i K_T označavaju proporcionalnost struja I_e i I_T sa gradijentom potencijala, odnosno sa gradijentom temperature. Znak minus upućuje na negativan prirast potencijala i temperature sa pozitivnim prirastom rastojanja duž provodnika. Budući da nije zatvoreno nikakvo vanjsko električno kolo, ukupna struja kroz provodnik jednaka je nuli, tj. $I_e + I_T = 0$, odakle proizilazi da je:

$$dU = -(K_T/K_e) dT. \quad (21.14)$$

Napon koji nastaje kao rezultat temperaturne razlike $T_2 - T_1$ između krajeva posmatranog provodnika naziva se termoelektrični napon, a njegova vrednost dobija se integracijom jednačine (21.14):

$$U_{T_2} - U_{T_1} = \int_{T_1}^{T_2} K dT. \quad (21.15)$$

Termoelektrični koeficijent $K = -(K_T/K_e)$ zavisi od materijala od kojeg je izrađen provodnik. Za male promene temperature može se smatrati da je:

$$U_{T_2} - U_{T_1} = K(T_2 - T_1). \quad (21.16)$$

Zebekov termoelektrični efekt – termoelement. Struja ne može da se zatvori kroz jedan provodnik duž kojeg se dovodi toplota. Neophodno je zatvoreno termoelektrično kolo od dva različita provodnika A i B sa termoelektričnim konstantama K_A i K_B (slika 21.3.b). Spojevi su na temperaturama T_1 i T_2 , pa će svaki provodnik postati izvor termoelektričnog napona. Ako se kolo prekine u centru prvog spoja (slika 21.3.c), dobija se napon na otvorenim krajevima:

$$\begin{aligned} U_{AB} &= (U_{T_2} - U_{T_1}) - (U_{T_1} - U_{T_2}) = \\ &= K_A(T_2 - T_1) - K_B(T_1 - T_2) = \alpha(T_2 - T_1) \end{aligned} \quad (21.17)$$

Napon U_{AB} je Zebekov napon (1821. god.), a koeficijent α [$\mu\text{V/K}$] termoelektrična Zebekova konstanta proporcionalnosti, koja zavisi od osobina dva provodnika. Takvo termoelektrično kolo naziva se termoelement ili termopar. Metal A je na pozitivnijem potencijalu u odnosu na metal B ako struja teče od A prema B na hladnom kraju.

Peltijeov termoelektrični efekt. Ako se na slobodne krajeve termoelektričnog kola prikazanog na slici 21.3c priključi jednosmerni izvor, kroz kolo će teći neka struja I . Zbog ove struje nastaje reverzibilni proces: jedan spoj se hlađi (topljeni ponor), a drugi zagrejava (topljeni izvor). Promeni li se smer struje, prethodno zagrevani spoj počeće se hlađiti i obrnuto. Ovo je termoelektrični Peltijeov efekt. Za razliku od Džulove toplotne, koja je proporcionalna kvadratu struje ($I^2 R_s$, R_s – otpor spoja), apsorbovana, odnosno oslobođena toplota zbog Peltijeovog efekta proporcionalna je jačini struje. Spoj tako postaje generator termoelektričnog Peltijeovog napona:

$$U_P = \pi_{AB} T, \quad (21.18)$$

gde je π_{AB} Peltijeov koeficijent, čija vrednost zavisi od provodnika u spoju.

Peltijeov efekat više je izražen kod poluprovodnika. Na bazi Peltijeovog efekta prave se minijaturni grejači/hladnjaci.

Tomsonov termoelektrični efekt. Tomson (Kelvin) je zaključio da ukoliko kroz termoelektrično kolo protiče neka struja, tada se, pored Peltijeovog napona na spojevima, javlja termoelektrični Tomsonov napon duž svakog provodnika pod uslovom da postoji gradijent temperature:

$$U_T = \int_{T_1}^{T_2} \sigma dT, \quad (21.19)$$

gde je σ Tomsonov koeficijent, koji predstavlja generisani ili oslobođenu toplotu po jedinici temperaturne razlike i po jedinici jačine struje.

Termoelektrični napon – rekapitulacija. Iz prethodnog razmatranja može se zaključiti da kroz kolo od dva provodnika čiji su krajevi na različitim temperaturama teče termoelektrična struja. Prolaz struje uvek je praćen Džulovim efektom, ali je istovremeno praćen i reverzibilnim Peltijeovim efektom, tj. zagrejavanjem ili hlađenjem krajeva. Ako postoji i temperaturna razlika i prolaz struje, javlja se reverzibilni Tomsonov efekt, tj. grejanje i hlađenje provodnika. Zebekov efekt se, dakle, suštinski može objasniti pomoću Peltijeovog i Tomsonovog efekta. Ukupni termoelektrični napon generisan u posmatranom kolu je:

$$U_{AB} = \pi_{AB} \cdot T_2 - \pi_{AB} \cdot T_1 + \int_{T_1}^{T_2} \sigma_A dT - \int_{T_1}^{T_2} \sigma_B dT = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_{AB} dT. \quad (21.20)$$

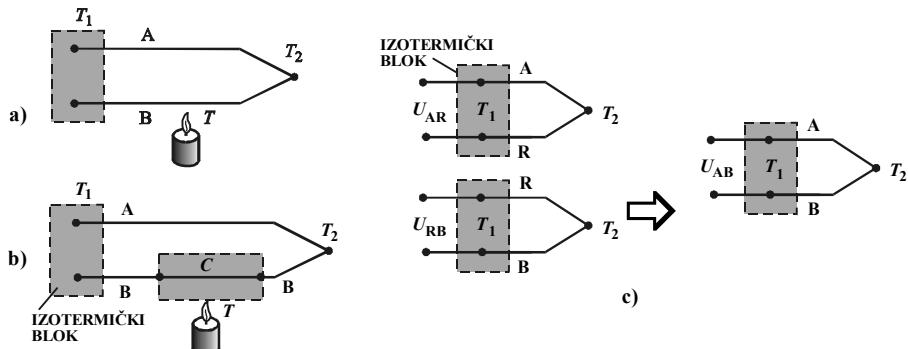
Veza između termoelektričnih koeficijenata π_{AB} , σ i α_{AB} odredena je Kelvinovim relacijama:

$$\pi_{AB} = \frac{dU_{AB}}{dT} = \alpha_{AB} \quad \text{i} \quad (\sigma_A - \sigma_B) = -T \frac{d^2 U_{AB}}{dT^2}. \quad (21.21)$$

21.3.2. Empirijski zakoni termoelektričnih kola

Za praktična merenja i analizu termoelektričnih kola značajna su empirijski zakoni, a odnose se na kola sa homogenim provodnicima, bez primesa i defekta.

Zakon homogenog kola (zakon unutrašnje temperature). Na izlazni napon termoelementa čiji krajevi imaju temperature T_1 i T_2 ne utiče temperatura toplotnog izvora koji deluje između krajeva ako su upotrebljeni metali homogeni (slika 21.4a). To znači da žice od mernog mesta (T_2) do mesta indikacije (T_1) mogu biti položene i u blizini neke peći bez uticaja na indikaciju, sve dok žice ne počnu da se tope ili da menjaju svoje termoelektrične osobine.



Slika 21.4. Empirijski zakoni termoelektričnih kola: a) zakon homogenog kola, b) zakon međumetala, c) zakon aditivnosti

Zakon međumetala. Umetanje žice od metala C na čijim je krajevima ista temperatura ne remeti izlazni napon spoja AB, jer spoj BC deluje suprotno spoju CB (slika 21.4b):

$$U_{AB}(T_2, T_1) + U_{BC}(T, T) + U_{CB}(T, T) = U_{AB}(T_2, T_1). \quad (21.22)$$

To znači da se termoelementi mogu spajati bilo kojom žicom ili zavariti ako su spojna mesta na istoj temperaturi.

Zakon aditivnosti termoelektričnih napona. Ako su poznati termoelektrični naponi za metale A i B u odnosu na referenti R, tada je ukupni termoelektrični napon za termoclement AB (slika 21.4c):

$$U_{AB}(T_2, T_1) = U_{AR}(T_2, T_1) + U_{RB}(T_2, T_1). \quad (21.23)$$

To znači da se mogu upotrebiti i termoelementi sa nestandardnim kombinacijama metala pomoću postojećih referentnih tabela.

21.3.3. Problem hladnog kraja termoelementa

Termoelement kao diferencijalni senzor temperature. Iz jednačine (21.17) vidi se da je generisani Zebekov napon proporcionalan razlici temperatura:

$$U_{AB} = \alpha(T_2 - T_1) = u_{AB}(T_2) - u_{AB}(T_1). \quad (21.24)$$

gde su $u_{AB}(T_2)$ i $u_{AB}(T_1)$ termoelektrični naponi u tačkama 2 i 1. Iz praktičnih razloga temperature se označavaju Celzijusovim stepenima, pa termoelektrični koeficijent ima dimenziju $V/^{\circ}C$.

Da bi se izmerila temperatura T_2 , neophodno je poznavati temperaturu T_1 i termoelektričnu konsantnu α za dati termoelement. Uobičajeno je da se tačka na temperaturi T_2 označava kao topli, a tačka na temperaturi T_1 kao hladni ili referentni kraj termoelementa. Termoelement se baždari u odnosu na $0^{\circ}C$, ali referentna temperatura, saglasno empirijskom zakonu međutemperature, može biti na bilo kojoj vrednosti – napon termoelementa pri temperaturnoj razlici $T_3 - T_1$ jednak je sumi napona pri temperaturnim razlikama $T_2 - T_1$ i $T_3 - T_2$:

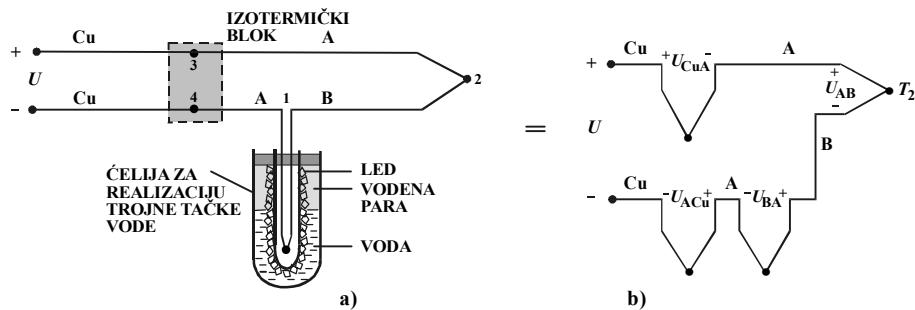
$$U_{AB}(T_3, T_1) = U_{AB}(T_2 - T_1) + U_{AB}(T_3 - T_2). \quad (21.25)$$

Referentna temperatura $T_r = 0^{\circ}C$. Kada je referentna temperatura $T_r = 0^{\circ}C$, tada je izlazni napon termoelementa proporcionalan merenoj temperaturi toplog kraja T_2 , odnosno $U_{AB} = \alpha T_2 = u_{AB}(T_2)$. Referentna temperatura održava se konstantnom pomoću čelije za realizaciju trojne tačke vode (slika 21.5). Priključni kablovi voltmetra koji meri izlazni napon termoelementa napravljeni su od bakra, pa u kontaktnim tačkama 3 i 4 nastaju termoelektrični spojevi Cu/A i A/Cu. Na osnovu ekvivalentne šeme vidi se da je mereni napon:

$$U_{AB} = u_{CuA}(T_3) + u_{AB}(T_2) + u_{BA}(T_r) + u_{ACu}(T_4) = u_{AB}(T_2), \quad (21.26)$$

Zaista, budući da su tačke 3 i 4 na istoj temperaturi, naponi $u_{\text{CuA}}(T_3)$ i $u_{\text{ACu}}(T_4)$ istog su iznosa i suprotnog predznaka, a u tački 1 napon $u_{\text{BA}}(T_r)$ jednak je nuli jer je temperatura u toj tački $T_1 = T_r = 0^\circ\text{C}$.

Ova šema pogodna je za laboratorijska merenja gde je rastojanje između mernog instrumenta i referentne tačke malo. Duži vodovi od istog metalala od kojeg je napravljen termoelement ne mogu se prihvati zbog visoke cene. Osim toga, temperatura trojne tačke vode u prikazanoj ćeliji ne može se očuvati duže vreme, što je za praktična merenja veliko ograničenje.



Slika 21.5. Laboratorijsko merenje pri $Tr=0$: a) merna šema, b) ekvivalentna šema

Produžni vodovi. Za povezivanje termoelementa sa mernom šemom, koja je udaljena od termoelementa, upotrebljavaju se produžni ili kompenzacioni vodova (slika 21.6). Na krajevima kola voltmeter meri napon:

$$U = u_{AB}(T_2) + u_{BD}(T_1) + u_{DCu}(T_r) + u_{CuF}(T_r) + u_{FA}(T_1). \quad (21.27)$$

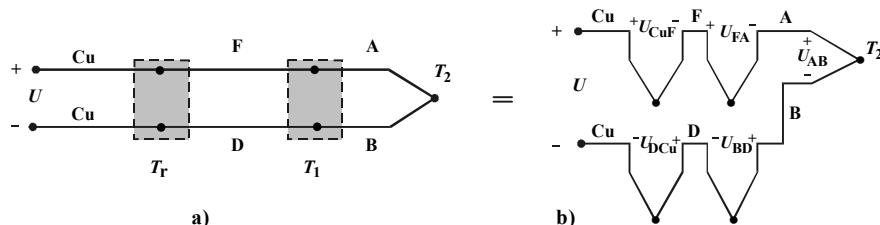
Ukoliko bi celo kolo bilo na istoj temperaturi T_1 , tada bi, prema zakonu međumetala, ukupni napon kola bio:

$$u_{AB}(T_1) + u_{BD}(T_1) + u_{DCu}(T_1) + u_{CuF}(T_1) + u_{FA}(T_1) = 0. \quad (21.28)$$

Oduzimajući ovu jednačinu od polazne, dobija se:

$$U = u_{AB}(T_2) - u_{AB}(T_1) + u_{FD}(T_1) - u_{FD}(T_r). \quad (21.29)$$

Ako se produžni vodovi prave od metala F i D, tako da termoelement F/D u temperaturnom intervalu od T_1 do T_r ima istu termoelektričnu karakteristiku kao i merni termoelement A/B:



Slika 21.6. Termoelement sa produžnim vodovima od drugog materijala: a) merna šema, b) ekvivalentna šema

$$U_{AB}(T_1, T_r) = U_{FD}(T_1, T_r). \quad (21.30)$$

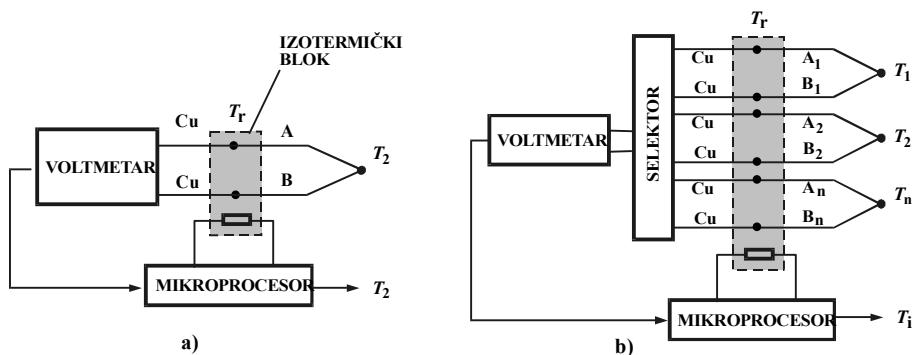
Uvrštavanjem (21.29) u jednačinu (21.28) dobija da je termoelektrični napon:

$$U = U_{AB}(T_2, T_1) + U_{AB}(T_1, T_r) = U_{AB}(T_2, T_r). \quad (21.31)$$

Za tipični termoelement (platina/platina-rodijum) produžni vodovi su kombinacija bakar/bakar-nikl. I za druge termoelemente nastoji se da jedan produžni vod bude od bakra. Cena takvih kompenzacionih vodova znatno je manja od cene vodova koji bi bili od materijala osnovnog termoelementa, ali je ipak veća od cene bakrenih. Zato je poželjno da produžni vodovi budu što kraći, tj. da mesto sa referentnom temperaturom T_r bude što bliže mernom mestu sa temperaturom T_2 .

Metod softverske kompenzacije temperature hladnog kraja. Upotreba produžnih vodova umesto vodova od istog materijala od kojeg je napravljen merni termoelement pokazuje se kao dobro rešenje sve dok merno mesto nije suviše daleko. Tada cena produžnih vodova postaje značajna, pa se primenjuju metode kompenzacije temperature hladnog kraja.

Termoelektrični napon $U_{AB} = \alpha(T_2 - T_r) = u_{AB}(T_2) - u_{AB}(T_r)$ zavisi od referentne temperaturu T_r i zato je ovu temperaturu potrebno održavati konstantnom ili njen uticaj kompenzovati: $U_{AB} = u_{AB}(T_2) - u_{AB}(T_r) + u_k(T_r) = u_{AB}(T_2)$. Softverska kompenzacija je postupak pri kome se temperatura T_r meri, najčešće pomoću termistora (slika 21.7a), a zatim se na osnovu otpornosti termistora u mikroprocesoru računa aktuelna temperatura T_r i odgovarajući kontakti termoelektrični napon $u_k(T_r) \approx \alpha T_r = u_{AB}(T_r)$. Ovaj napon dodaje se na izmereni napon na krajevima termoelementa U_{AB} : $u_{AB}(T_2) = U_{AB} + u_k(T_r)$, da bi se na kraju dobila vrednost merene temperature $T_2 = u_{AB}(T_2)/\alpha$.



Slika 21.7. Softverski metod kompenzacije hladnog kraja: a) osnovna šema, b) šema sa selektorom

Zbog velike brzine rada mikroprocesora moguće je dovesti više različitih termoelemenata na izotermički blok sa temperaturom T_r , a pomoću selektora odabrani termoelement priključiti na vodove prema mikroprocesoru (slika 21.7b).

Hardverska kompenzacija pomoću kompenzacionog mosta. Most za automatsku korekciju napona termoelementa, koji nastaje zbog nestabilnosti temperature hladnog kraja, sastoji se od četiri otpornika (slika 21.8a). Jedan od njih temperaturno

je osetljiv R_T i ugrađen je na izotermički blok, gde su priključeni i slobodni krajevi termoelementa. Bitno je da se između otpornika R_T i izotermičkog bloka ostvari dobar termički kontakt.

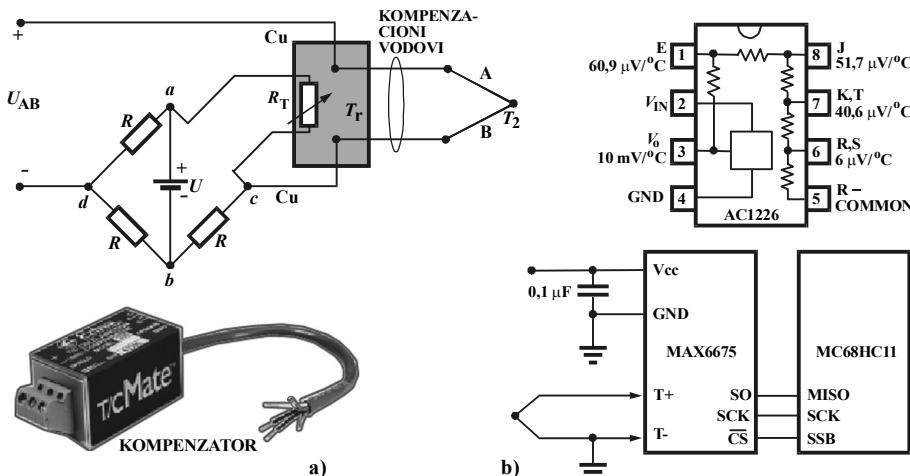
Most se projektuje tako da je napon na mernoj dijagonalni U_{cd} jednak nuli kada je temperatura bloka jednaka referentnoj $T_r = 0^\circ\text{C}$. Za tačno uravnotežavanje mosta u tački c može se postaviti potenciometar. Zbog uticaja okoline temperatura T_r menja se na T'_r , pa napon termoelementa postaje veći ili manji nego u odnosu na $T_r = 0^\circ\text{C}$. Umesto napona $U_{AB}(T_2, T_r)$ termoclement daje napon $U_{AB}(T_2, T'_r)$. Sa promenom temperature T_r menja se termootpor: $R_T = R + \Delta R$, pa se na dijagonalni mostu javlja napon $U_{cd} = U\left(\frac{1}{2} - \frac{R}{2R + \Delta R}\right) \approx \frac{\Delta R}{4R}U = kT'$. Koeficijent kompenzacionog mosta projektuje se tako da U_{cd} bude jednak naponu koji daje termoelement pri temperaturnoj razlici $T'_r - T_r$:

$$U_{cd} = kT' = U_{AB}(T'_r, T_r). \quad (21.32)$$

Most je priključen u seriju sa termoelementom. Tako napon mosta služi za korekciju promene napon termoelementa zbog toga što hladni kraj nije na $T_r = 0^\circ\text{C}$:

$$U_{AB}(T, T'_r) + U_{cd} = U_{AB}(T, T'_r) + U_{AB}(T'_r, T_r) = U_{AB}(T, T_r). \quad (21.33)$$

Dobre osobine metoda hardverske kompenzacije su odsustvo proračuna aktuelne vrednosti referentne temperature i veća brzina odziva. Tipična greška kompenzacionog mosta je $\pm 3^\circ\text{C}$ za promenu referentne temperature $0 - 50^\circ\text{C}$. Jedan kompenzacioni most upotrebljava se najviše za šest termoelemenata istog tipa.



Slika 21.8. Hardverska kompenzacija temperature hladnog kraja: a) mosna šema, b) integrirani kompenzatori

Integrirani kompenzatori prave se kao monolitna kola (LT1025, AD595 ili AC1226). Sadrže instrumentacioni pojačavač za pojačavanje direktno priključenog milivoltnog napona termoelementa, pomoću diode mere temperaturu hladnog kraja unutar samog čipa i generišu odgovarajući kompenzacioni napon (slika 21.8b). U

kolu je otpornički delitelj pomoću koga se dobija kompenzacioni napon za sve vrste termoelemenata, radno područje temperature je 0–70 °C, izlaz 10 mV/°C plus četiri izlaza za kompenzacioni napon koji je odabran tako da odgovara nagibu statičke karakteristike termoelementa na 25 °C (60,9 µV/°C za E tip, 51,7 µV/°C za J tip, 40,3 µV/°C za K i T tip, 5,95 µV/°C za R i S tip). Uzalna struja je oko 80 µA pri napajanju od 10 V, tako da je disipacija kola mala i porast unutrašnje temperature iznosi najviše 0,1 °C. Tipična greška sa integrisanim kompenzatorima je ±0,5 °C.

Postoje i kola sa digitalnim izlazom. Na primer, kolo MAX6675 služi za kompenzaciju hladnog kraja i daje digitalni izlaz sa 12-bitnom rezolucijom za termoelement tipa K. Serijski interfejs omogućava povezivanje sa mikrokontrolerom. Na pin \overline{CS} (Chip Select) dolaze impulsi kojima mikrokontroler određuje početak i kraj prenosa rezultata konverzije sa pina SO (Serial Data Output), a SCK je serijski klok na 4,3 MHz.

21.3.4. Izrada termoelemenata

Materijali za izradu termoelemenata. Za izradu termoelemenata najbitnija su termoelektrična svojstva materijala. Za relativno poređenje materijala koristan je tzv. termoelektrični niz, koji pokazuje koliki je termoelektrični napon µV/°C za neki materijal u spoju sa platinom (tabela 21.3). Pretpostavlja se da je hladni kraj takvog termoelementa na 0 °C, topli na 100 °C i da je reč o čistim materijalima. Praktično, čistoća varira od 99,9% za železo do 99,999% za zlato i platinu.

Za izradu termoelemenata mogu se, u principu, upotrebiti bilo koja dva čista metala ili legure. Za praktična merenja ograničen je broj kombinacija jer se od materijala zahtevaju određena termoelektrična i mehanička svojstva:

- stabilnost termoelektričnih parametara, jednoznačna i linearna zavisnost termoelektričnog napona od temperature, visoka osjetljivost;
- homogenost materijala po dužini provodnika, mogućnost zavarivanja i mehaničke obrade, mehanička čvrstina, pristupačna cena.

MATERIJAL	µV/°C	MATERIJAL	µV/°C	MATERIJAL	µV/°C
Bizmut	-72	Živa	0,6	Bakar	7,6
Konstantan	-35	Ugljik	3	Volfram	8
Nikl	-16,4	Aluminijum	3,5	Molibden	12
Kobalt	-15,2	Kalaj	4,2	Gvožde	18,5
Alumel	-12,9	Olovo	4,4	Nihrom	25
Potaša	-9	Tantal	4,5	Hromel	28
Rodijum	-6,4	Srebro	6,5	Antimon	47
Paladijum	-5,7	Zlato	7,3	Germanijum	300
Natrijum	-2	Cink	7,5	Telur	500
Platina	0	Kadmijum	7,5	Selen	900

Tabela 21.3. Termoelektrični niz materijala u odnosu na platinu

Označavanje termoelemenata je prema ANSI-standardu (ANSI – American National Standards Institute). Za svaki tip propisani su: dozvoljeno temperaturno područje, radno okruženje, maksimalna temperatura pri kratkotrajnom zagrejavanju itd. (tabela 21.4). Prvoimenovani metal (legura) predstavlja pozitivni, a drugoimenovani negativni priključak. Termoelementi od tanje žice osjetljiviji su na difuziju, nečistoće, koroziju i nehomogenost nego termoelementi napravljeni od deblje žice. Zbog skupoće, termoelementi od plamenitih metala prave se od tanje žice.

Pored navedenih tipova, za specijalne namene upotrebljavaju se i drugi (nestandardizovani) termoparovi. Tako, na primer, za visoke temperature do 2760°C pogodni su W/W–26%Rh (G-tip), W–5%Rh/W–26%Rh (CW5-tip), W–3%Rh/W–25%Rh (CW3-tip), a za niske temperature $0\text{--}80^{\circ}\text{C}$ i Cu/Cu/Ni (V-tip). N-tip (nikrosil/nisil) je novi standardizovani tip, sličan je K-tipu, ali od njega ima lineariju i stabilniju karakteristiku. Karakteristike svih termoparova dostupne su na internetu (www.temperatures.com/tctables).

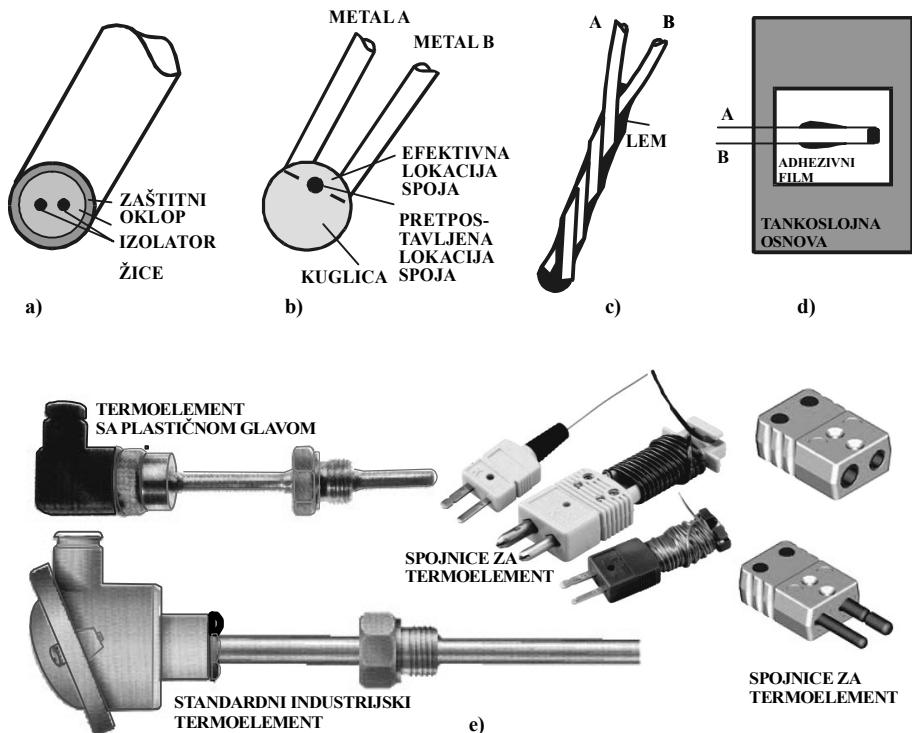
TIP	KOMERCIJALNI NAZIV	MAKSIMALNI OPSEG °C	MAKSIMALNA TEMPERATURA (KRATKOTRAJNO ZAGREVANJE)	PROSEĆNA OSETLJIVOST $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$	KARAKTERISTIKE RADNE SREDINE I OGRANIČENJA U UPOTREBI
T	Bakar/konstantan	–200 do 350	600	40,5	Slabo korozivna i redukovana atmosfera. Vakuum ili inertna atmosfera. Prisustvo vlage.
J	Gvožde/konstantan	0 do 750	1 200	52,6	Reducovana atmosfera. Vakuum ili inertna atmosfera. Ograničena upotreba na visokim temperaturama zbog pojačane korozije. Ne preporučuje se za niske temperature
E	Kromel/konstantan	–200 do 900	1 000	67,9	Korozivna ili inertna atmosfera. Ograničena upotreba u vakuumu i redukovanoj atmosferi.
K	Kromel/alumel	–200 do 1250	1 370	38,8	Inertna atmosfera, bez korozija. Ograničena upotreba u vakuumu i redukovanoj atmosferi. Nije dozvoljena upotreba u sumpornoj atmosferi.
S	Platina–10%rodijum/platina	0 do 1450	1 760	10,6	Korozivna ili inertna atmosfera. Dozvoljena samo kratkotrajna upotreba u vakuumu. Zaštitni oklop samo keramički. Moguća upotreba u metalnim i nemetalnim parama. Ove karakteristike iste su za tip S, R i B.
R	Platina–13%rodijum/platina	0 do 1450	1 600	12,0	
B	Platina–30%rodijum/platina–6%rodijum	0 do 1700	1 800	7,6	

Tabela 21.4. Standardni tipovi termoelemenata

Konstrukcija termoelemenata. Svi termoelementi prave se na isti način: dve žice od termoelektričnog materijala spoje se na topлом kraju i zaštite keramičkim izolacionim materijalom i metalnim oklopom (slika 21.9a). Postoji više različitih tehnika spajanja žica:

- žice se zavare topljenjem tako da se na vrhu spoja formira kuglica (slika 21.9b)
- žice se zaleme pomoću metala sa nižom tačkom topljenja (slika 21.9c)
- žice se potope u živu ili u rastopljeni metal
- žice se zaleme za čvrsti metal
- žice se pričvrste stezaljkom i trakom.

Termoelementi su osetljivi na mehaničko i hemijsko delovanje radne sredine, pa se oko njih stvara zaštitna armatura. Izolaciona obloga najčešće se pravi od magnezijumovog oksida, berilijuma, aluminijuma ili torijuma zato što su to dobri izolatori, ne propuštaju gasove, kompatibilni su sa standardnim termoelementima i relativno su jeftini. Vanjska zaštitna cev od čelika sa visokom tačkom topljenja zadržava kompaktnost izolacije, štiti izolaciju i termoelement od radne sredine, te povećava mehaničku čvrstinu konstrukcije. Topli kraj termoelementa može biti odvojen izolacionim spojem od metalne obloge, pa se takav spoj označava kao neuzemljeni ili izolovani spoj. Ukoliko je topli kraj zavaren za metalnu oblogu, tada su žice sastavni deo zaštitnog zida, pa se takav spoj označava kao uzemljeni.



Slika 21.9. Termoelement: a) konstrukcija, b) termoelement sa zavarenim žicama na topлом kraju, c) termoelement sa zalemnjanim žicama na topлом kraju, d) tankoslojni, d) izgled

Značajan izvor grešaka u merenju pomoću termoelemenata je mehaničko naprezanje toplog kraja. Ono se javlja kao posledica termičke dilatacije, a njegov uticaj je manji kad je termoelement instaliran horizontalno. Tipična debljina žice je 2–3 mm, vanjski prečnik termoelementa sa zaštitom je 15–25 mm, a dužina 100–3 500 mm.

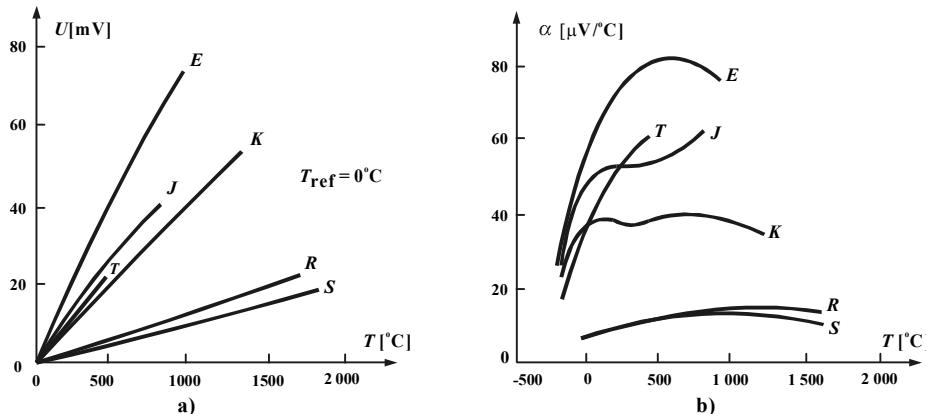
21.3.5. Statičke i dinamičke karakteristike termoelementa

Nelinearnost statičke karakteristike. I pored softverskog proračuna referentne temperature ili hardverske kompenzacije njene nestabilnosti, prilikom merenja napona termoelementa javljaju se greške. One su, pre svega, rezultat nelinearne statičke karakteristike, tj. nelinearne zavisnosti termoelektričnog napona od temperaturе. Za male promene temperature ta zavisnost se može prikazati kao linearna, što je predstavljeno poznatom jednačinom Zebekovog efekta (21.17).

Statičke karakteristike svih termoelemenata su nelinearne (slika 21.10a), što znači da je osetljivost $\Delta U / \Delta T$, odnosno vrednost Zebekovog koeficijenta α , vezana za izbor radne tačke. Samo u malom temperaturnom opsegu Zebekov koeficijent ima konstantnu vrednost (slika 21.10b). Zato se karakteristika termoelektrični napon – temperatura za tačna merenja tabelira sa rezolucijom i od 0,01 °C. Za inženjerska merenja dovoljne su tabele sa rezolucijom od 10 °C. Kod digitalnih senzora temperature na bazi termoelementa ove tabele čuvaju se u mikroprocesoru, ali je za to potreban značajan memorijski prostor. Znatno je povoljnije nelinearnu statičku karakteristiku termoelementa predstaviti u obliku polinoma:

$$T = \sum_{i=0}^n a_i U^i . \quad (21.34)$$

Na osnovu izmerenog napona U , pomoću polinoma (21.33) izračunava se temperatura T . Tačnost aproksimacije stvarne statičke karakteristike pomoću polinoma zavisi od stepena tog polinoma, tipa termoelementa i mernog opsega. Pomoću polinoma devetog reda omogućena je tačnost aproksimacije od $\pm 0,1$ °C do ± 1 °C u



Slika 21.10. Statičke karakteristike standardnih termoelemenata: a) zavisnost termoelektričnog napona od temperature, b) zavisnost Zebekovog termoelektričnog koeficijenta od temperature

odnosu na merni opseg. Za manje opsege i brži proračun upotrebljavaju se polinomi trećeg reda ili petog reda. Vrednosti koeficijenata za standardne tipove termoelemenata date su u tabeli 21.5. Polinomna aproksimacija statičke karakteristike termoelementa kombinuje se sa softverskom kompenzacijom hladnog kraja, metodom automatske kalibracije itd.

TIP KOEFI- CIJENT	E -100–1000 °C ± 0,5 °C	J 0–760 °C ± 0,1 °C	K 0–1370 °C ± 0,75 °C	R 0–1000 °C ± 0,5 °C	S 0–1750 °C ± 1 °C	T -160–400 °C ± 0,5 °C
a_0	0,104967248	-0,048868252	0,226584602	0,26332917	0,927763167	0,10086091
a_1	17189,45282	19873,14503	24152,109	179075,491	169526,515	25727,94369
a_2	-282639,0850	-218614,5353	67233,4248	-48840341,37	-31568363,94	-767345,8295
a_3	12695339,5	11569199,78	2210340,682	1,90002E+10	8990730663	78025595,81
a_4	-448703084,6	-264917531,4	-860963914,9	-4,82704E+12	-1,63565E+12	-9247486589
a_5	1,10866E+10	2018441314	4,83506E+10	7,62091E+14	1,88027E+14	6,97688E+11
a_6	-1,76807E+11		-1,18452E+12	-7,20026E+16	-1,37241E+16	-2,66192E+13
a_7	1,71842E+12		1,38690E+13	3,71496E+18	6,17501E+17	3,94078E+14
a_8	-9,19278E+12		-6,33708E+13	-8,03104E+19	-1,56105E+19	
a_9	2,06132E+13				1,69535E+20	

Tabela 21.5. Koeficijenti polinoma za aproksimaciju statičke karakteristike termoelemenata

Dinamička svojstva termoelemenata. Primajući deo energije radne sredine, termoelement se zagревa i poprima njenu temperaturu. Brzina kojom prati temperaturne promene zavisi od uslova provodenja, prelaza i zračenja toplote. Analitički je teško uzeti u obzir sve komponente razmene topline. Proces razmene topline između termoelementa, koji je na temperaturi T , i radne okoline, koja je na temperaturi T_0 , može se, uz izvesna pojednostavljenja, predstaviti običnom diferencijalnom jednačinom prvog reda. Do jednačine se dolazi na temelju toplotne ravnoteže između akumulacije i konvekcijske razmene topline sa okolinom:

$$mc \frac{dT}{dt} = kS(T_0 - T) , \quad (21.35)$$

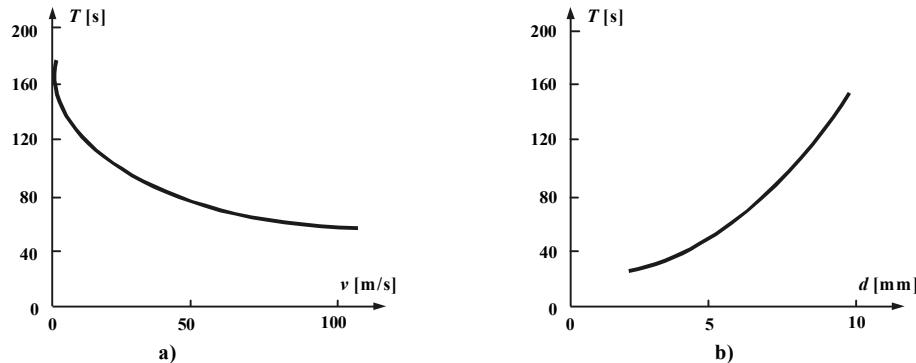
gde su: mc toplotni kapacitet termoelementa [$\text{J}/{}^\circ\text{C}$], m masa termoelementa [kg], c specifični toplotni kapacitet zaštitne armature [$\text{J}/\text{kg}{}^\circ\text{C}$], S vanjska površina termoelementa, kroz koju se odvija razmena topline [m^2], k koeficijent prelaza topline [$\text{W}/\text{m}^2 {}^\circ\text{C}$].

Prema tome, prenosna funkcija termoelementa kao jednokapacitivnog objekta je $G(s) = 1/(Ts + 1)$. Vremenska konstanta:

$$T = \frac{mc}{kS} = \frac{c\rho V}{kS} , \quad (21.36)$$

zavisi od geometrije termoclementa (volumen V , površina S), karakteristika materijala od kojeg je napravljena armatura (gustina ρ , specifični toplotni kapacitet c) i uslova

razmene topote (koeficijent prelaza topote k). Razmena topote se brže odvija, odnosno vremenska konstanta T je manja ukoliko je veća brzina fluida u kome se nalazi termoelement (slika 21.11a). Mehanička čvrstina i zaštita termoelementa bolji su kada je zaštitna armatura većeg prečnika, ali tada termoelement postaje tromiji i njegova vremenska konstanta raste (slika 21.11b). Najmanju vremensku konstantu ima nezaštićeni termoelement.



Slika 21.11. Vremenska konstanta termoelementa: a) zavisnost vremenske konstante od brzine fluida, b) zavisnost vremenske konstante od prečnika termoelementa

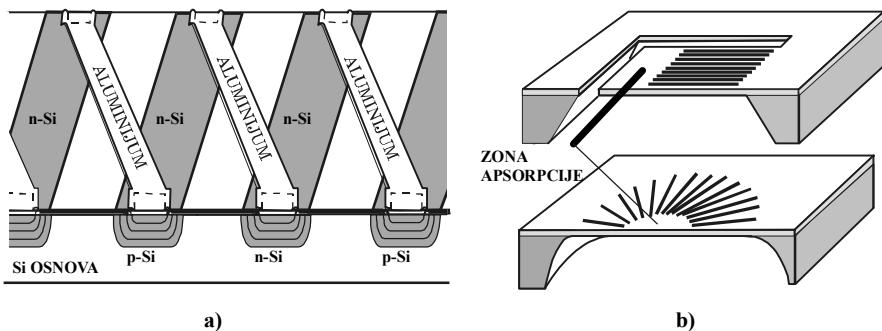
Za tačniju dinamičku analizu treba uzeti u obzir da je termoelement višekapacitivni objekt. Prenosna funkcija takvog termoelementa je $G(s) = e^{-\tau s} / (Ts + 1)$ gde je τ vremenska konstanta kašnjenja. Za industrijske termoelemente vremenska konstanta T je 90–480 s, vremenska konstanta kašnjenja τ je 9–30 s, a τ/T je 0,11–0,78.

21.3.6. Poluprovodnički termoelementi

Princip rada. Termoelektrični efekat javlja se kod poluprovodnika dopiranog različitim primesama ili kod kombinacije dvaju poluprovodnika. Vrednosti Zebekovog koeficijenta α mnogo su veće nego kod metala. Na primer, amorfni silicijum dopiran fosforom (a-Si:P) ima $\alpha = -(0,7-2) \text{ mV/}^\circ\text{C}$ u temperaturnom intervalu $30-550^\circ\text{C}$, pri čemu više dopirani a-Si ima manji α . Najpoznatiji poluprovodnički termoelementi su Bi/Sb, (p)Si/Al i Te/InSb.

Senzori zračenja. Poluprovodnički termoelementi služe za detekciju infracrvenog zračenja. Prave se u obliku traka dva poluprovodnika (slika 21.12a). Materijal se vakuumski deponuje na izolacioni sloj od SiO_2 ili Si_3N_4 debljine $1 \mu\text{m}$, koji je nanet na Si osnovu. Izolacioni sloj ima mali koeficijent provođenja topline od toplog prema hladnom kraju. Radi poboljšanja apsorpcije upadnog zračenja u širem području spektra, mesto gde su spojeni topli krajevi (apsorpciona zona) prekriva se tankim slojem apsorpcionog materijala. Veličina apsorpcione zone je $0,4-1 \text{ m}^2$. Radi dobijanja većeg napon u funkciji merenog zračenja, termoelementi se povezuju u pravouglu ili kružnu termobateriju (slika 12b).

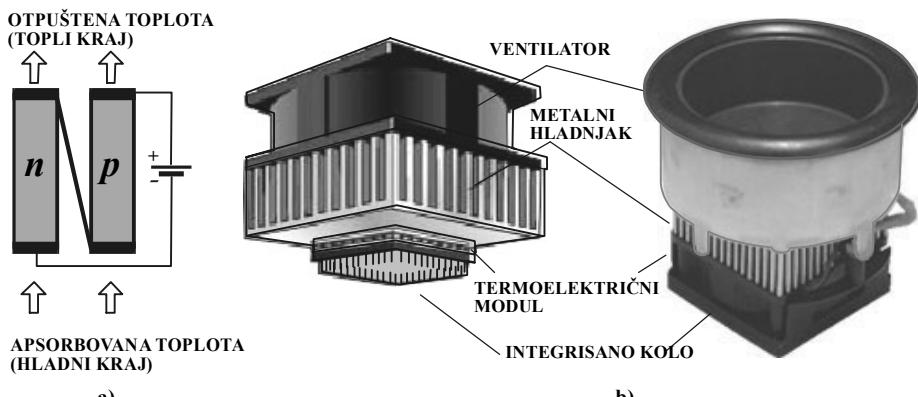
Termoelektrični grejači i hladnjaci. Kada kroz dva različita provodnika teče struja, tada se javlja Peltijeov efekat: na spoju provodnika se apsorbuje ili otpušta toplotna energija. Efekat je posebno izražen kod poluprovodničkih termoelemenata od bizmut-telurida. Ako se pločica od takvog poluprovodnika n -tipa pomoću bakarnih



Slika 21.12. Poluprovodnička termobaterija: a) u obliku traka, b) ugrađena na Si konzoli, c) na membrani

kontakata priključi na jednosmerni naponski izvor, elektroni kao nosioci negativnog nakelektrisanja kreću se od negativnog ka pozitivnom polu izvora. Istovremeno elektroni prenose toplotu sa donjeg spoja poluprovodnika sa bakrenim kontaktom prema gornjem spoju. Za poluprovodnik *p*-tipa nosioci nakelektrisanja su šupljine i one se kreću od pozitivnog prema negativnom polu izvora. Šupljine će zato toplotu prenositi u suprotnom smeru od elektrona. Ovaj efekat pumpanja toplote s jednog na drugi kraj termoelementa u praksi se primenjuje za pravljenje specijalnih hladnjaka ili grejača. Prednost Peltijevih hladnjaka su male dimenzije, pa se koriste za hlađenje laserskih dioda, integrisanih kola ili samo određenih disipacionih mesta u kolu.

Jedan pločasti termoelement prenosi malu količinu toplote. Multiplikacija se postiže spajanjem više termoelemenata (slika 21.13a). Pokazalo se da je najpovoljnije naizmenično povezivanje termoelementa *n*-tipa i *p*-tipa. Tipični modul ima 254 Peltijeva elementa, površinu do 50 mm^2 , debljinu 4 mm, promenom polariteta napajanja modul umesto hladnjaka postaje grejač i obrnuto. Za proračun termoelektričnog hladnjaka prvo se procene maksimalna temperatura ambijenta (na primer 50°C), optimalna radna temperatura (20°C) i maksimalna temperatura na toploj strani modula koja je veća od ambijentne temperature zbog odvodenja toplote. Zatim se prema uputstvu proizvođača odrede napon i struja termoelektričnog modula.

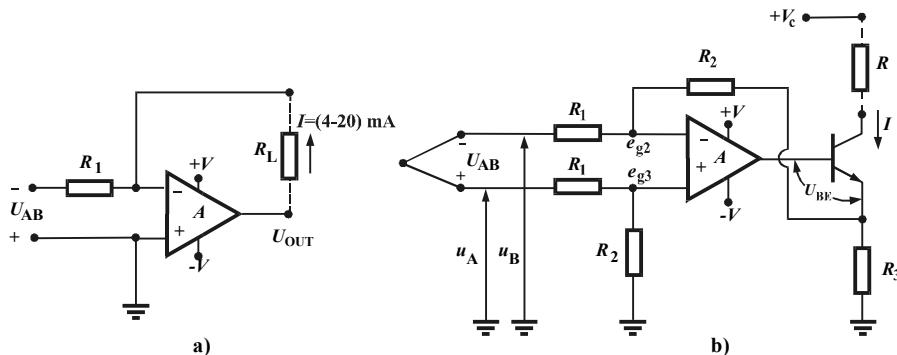


Slika 21.13. Termoelektrični hladnjak/grejač: a) princip rada, b) ilustracija primene

21.3.7. Merne šeme sa termoelementima

Šeme sa mernim pojačavačima. Ove šeme temelje se na primeni operacionih pojačavača sa velikim pojačanjem u otvorenom, visokom ulaznom impedansom, malim temperaturnim driftom i velikom vrednošću potiskivanja istosmerne komponente. Zahvaljujući ovim dobrim svojstvima operacionih pojačavača, moguće je ostvariti direktno merenje milivoltnih napona. Budući da se rezultat merenja prosleduje na veću udaljenost, na izlazu je potreban strujni signal. Takav sklop označava se kao mV/I-pretvarač. Najprostiji je neuzemljeni pretvarač (slika 21.14a). Struja kroz opteretni otpor pri konstantnoj vrednosti otpornosti R_L zavisi samo od merenog termoelektričnog napona:

$$I = U_{AB}/R_L . \quad (21.37)$$



Slika 21.14. Milivoltni merni pretvarač mV/I: a) jednostavna šema, b) praktična šema

Konkretna realizacija zasniva se na poznatoj šemi strujnog izvora (slika 21.14b). U izlaznom krugu diferencijalnog pojačavača nalazi se tranzistor sa velikim strujnim pojačanjem ($h_{FE} > 500$). Otpornici R_2 i R_3 čine strujni delitelj. S obzirom na svojstva operacionog pojačavača, jednačine koje povezuju mereni termoelektrični napon $U_{AB} = u_A - u_B$ sa izlaznom strujom I su:

- jednačina ravnoteže struja na invertujućem ulazu pojačavača:

$$\frac{u_B - e_{g2}}{R_1} + \left[\frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} (I + I_b) - e_{g2} \right] \frac{1}{R_2} = 0 , \quad (21.38)$$

- jednačina ravnoteže struja na neinvertujućem ulazu pojačavača:

$$\frac{u_A - e_{g3}}{R_1} + \frac{(0 - e_{g3})}{R_2} = 0 , \quad (21.39)$$

- jednačina naponskog pojačanja pojačavača:

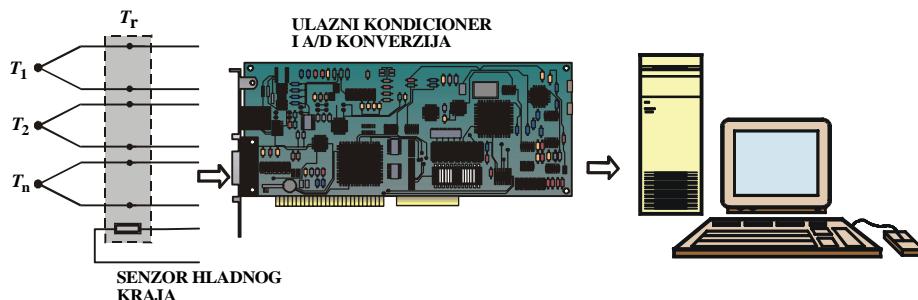
$$(e_{g3} - e_{g2})A = U_{BE} + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} (I + I_b) . \quad (21.40)$$

Sa U_{BE} označen je napon između baze i emitera ($\approx 0,7\text{V}$ za silicijumske tranzistore, odnosno $\approx 0,2\text{V}$ za germanijumske). Struja baze I_b je zbog velikog strujnog pojačanja tranzistora h_{FE} zanemarljivo mala u odnosu na struju kolektora I , tj. u odnosu na izlaznu struju I . Eliminacijom napona e_{g2} i e_{g3} iz prethodne tri jednačine, i uzimajući u obzir da je pojačanje pojačavača u otvorenom A veliko, kao i da je konstruktivno strujni delitelj napravljen tako da je $R_2 \gg R_3$, dobija se da je izlazni signal direktno proporcionalan termonaponu:

$$I = \frac{R_2}{R_1 R_3} (u_A - u_B) = k U_{AB}. \quad (21.41)$$

Šema sa milivoltnim pretvaračem mV/I pogodna je za primenu u sistemima automatske regulacije temperature jer se lako može dobiti standardni strujni signal 4 – 20 mA.

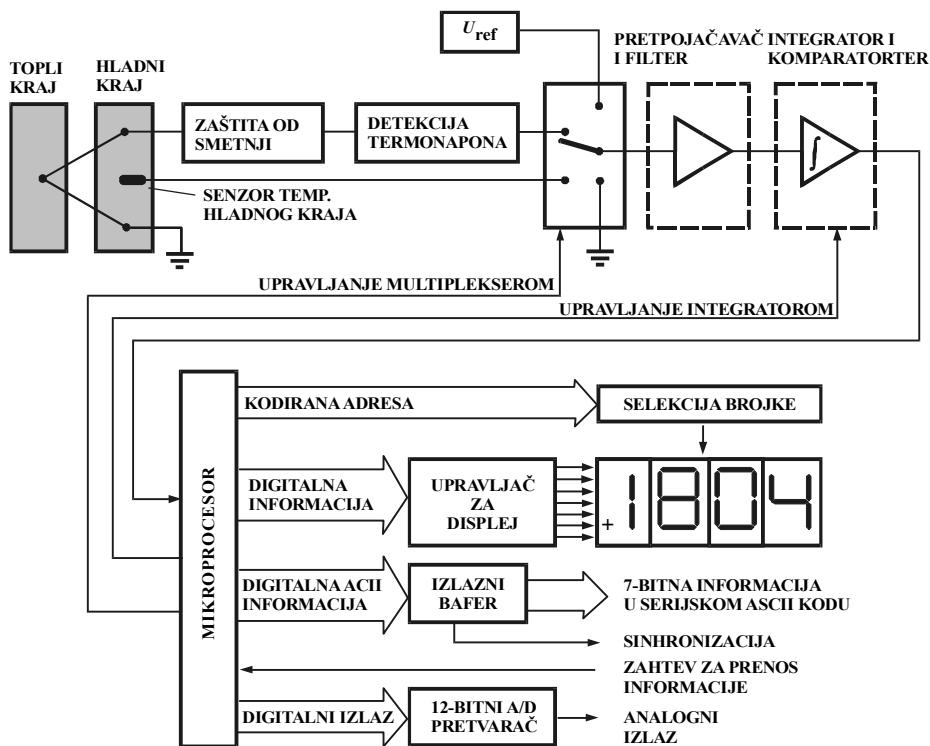
Povezivanje termoelementa sa mikroprocesorom. Termoelementi se priključuju na računar preko PC kartice na kojoj se nalaze kola za kondicioniranje signala, selektor kanala i A/D konvertor (slika 2115). U računaru se podaci o temperaturi analiziraju, čuvaju i po potrebi prikazuju tabelarno ili na odgovarajućim dijagramima, generišu kompenzacioni, alarmni i upravljački signali.



Slika 21.15. Priključivanje termoelementa na računar

Termoelement u kompaktnoj izvedbi sa mikroprocesorom čini industrijski digitalni senzor temperature (slika 21.16). Kondicioniranje ulaznog signala vrši se u bloku za zaštitu od smetnji, koji štiti vodove od uticaja visokog napona. Blok za detekciju termonapona indicira priključivanje termoelementa na mernom ulazu. Signal o temperaturi ide preko prepojačavača sa filterom i preko kola za A/D konverziju na bazi integratora i komparatora dolazi u mikroprocesor. Tu se vrši linearizacija, softverska kompenzacija hladnog kraja, automatska kalibracija i drugo. Multipleksler za svaki odabrani termoelement omogućava merenje aktuelne temperature, temperatu- re hladnog kraja i referentnog napona.

Izlazni digitalni signal predstavlja seriju impulsa kodiranih u ASCII-kodu. Digitalna informacija ide na digitalni displej, čuva se u privremenoj memoriji sve do zahteva za transfer ili se pretvara u analogni signal.



Slika 21.16. Funkcionalni dijagram mikroprocesorskog termometra sa termoelementom

21.3.8. Praktični aspekti upotrebe termoelemenata

Prednosti termoelemenata kao senzora temperature su:

- rad bez vanjskog izvora energije jer se radi o aktivnom senzoru;
- jednostavna i kompaktna konstrukcija, velika mogućnost ugradnje;
- širok temperaturni opseg merenja (od -270°C do 4000°C);
- visoka tačnost ($\pm 1 - 2,5^{\circ}\text{C}$ ili $\pm 0,25 - 0,75\%$ mernog opsega za standardne izvedbe, odnosno $\pm 0,5 - 1,1^{\circ}\text{C}$ ili $\pm 0,1 - 0,4\%$ mernog opsega za specijalne izvedbe).

Nedostaci termoelemenata su sledeći:

- nizak nivo izlaznog signala (najviše do 100mV);
- mala osetljivost ($10 - 70\text{\mu V}^{\circ}\text{C}$), zbog čega je veoma otežano merenje malih temperaturnih razlika;

- potrebna stalna referentna temperatura ili kompenzacija;
- nelinearna statička karakteristika;
- osetljivost na hemijsko delovanje radne okoline;
- pojava parazitnih termoelektričnih napona, koji su rezultat nehomogenosti materijala od kojeg je napravljen termoelement.

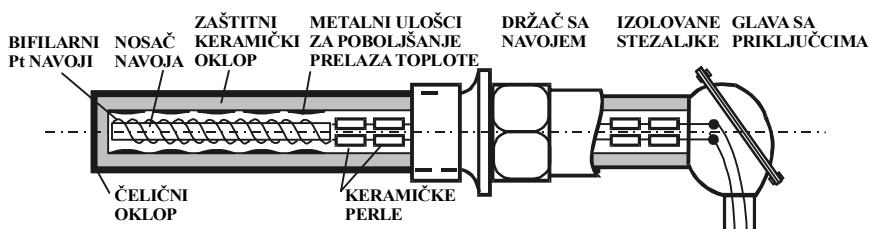
Praktične preporuke za smanjenje grešaka merenja pomoću termoelementa:

- termoelement ne sme biti na direktnom plamenu niti u njegovoj neposrednoj blizini zbog agresivnog delovanja gasova i čestica u okolini plamena;
- za tela sa raspodeljenom vrednošću temperature termoelement treba ugraditi u zoni srednje vrednosti temperature jer on meri temperaturu u jednoj tački;
- poželjno je da se termoelement locira na vidnom i dostupnom mestu radi lakše inspekcije i eventualne zamene;
- telo termoelementa u celosti treba da se nalazi u mernom mediju;
- svi kontakti moraju biti čisti i čvrsti kako bi prelazni otpor kontakata bio što manji;
- priključni vodovi ne smeju biti u blizini visokonaponskih energetskih vodova zbog elektromagnete indukcije.

21.4. OTPORNIČKI SENZORI TEMPERATURE

21.4.1. Metalni otpornički senzori

Zavisnost otpora od temperature, $R_t=R(T)$ prvi je uočio H. Dejvi 1821. godine. Senzori koji rade na ovom principu često se označavaju akronimom *RTD* (*Resistance Temperature Detector*). Termootpornici od metala prave se u obliku kalemata, po pravilu sa bifilarnim navojima (slika 21.17). Prečnik žice je 0,05 – 0,1 mm a dužina navoja 50 – 100 mm .



Slika 21.17. Konstrukcija industrijskog metalnog termootporničkog senzora

Statička karakteristika. Nelinearnost statičke karakteristike metalnog termootporničkog senzora manja je nego kod termoelementa. Za njenu aproksimaciju služe polinomi do dvadesetog reda, ali se obično upotrebljava jednačina C.V. Dusena, koja je jednostavnija:

$$R_T(T) = R_0 + R_0 \alpha \left[T - \delta \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \frac{T}{100} - \beta \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \left(\frac{T}{100} \right)^3 \right], \quad (21.42)$$

gde su: R_T otpor na temperaturi T , R_0 otpor na temperaturi $T=0^\circ\text{C}$, α , β i δ temperaturni koeficijenti otpora koji se određuju parametarskim merenjima, tj. testiranjem termootpornika na tri referentne temperature i potom rešavanjem sistema od tri jednačine (21.42).

Termootpornički senzor od Pt-žice. Platina je najbolji materijal za izradu metalnih termootpornika jer se može dobiti sa čistoćom do 99,999%, hemijski je neutralna, ima linearni temperaturni koeficijent otpora ($\alpha = 0,00392 \text{ } 1/\text{ } ^\circ\text{C}$) i specifični otpor $\rho = 0,1 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$. Ostala dva temperaturna koeficijenta otpora u jednačini (21.42) imaju sledeće vrednosti: $\beta = 0$ za $T > 0$, $\beta = 0,11$ za $T < 0$ i $\delta = 1,49$.

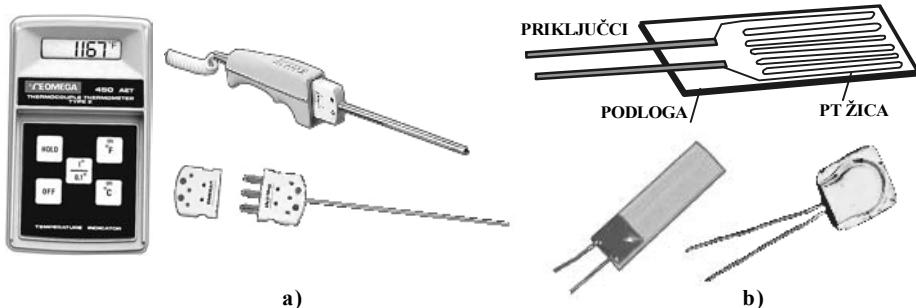
Platinski termootpornik upotrebljava se za merenje temperature u opsegu od -260°C do 650°C (maksimalno do 1500°C), a u opsegu od $182,96^\circ\text{C}$ do $630,74^\circ\text{C}$, prema IPTS-68 i ITS-90, upotrebljava se kao temperaturni standard. Odnos otpora na 100°C i 0°C je $R_{100}/R_0 = 1,385 \div 1,391$ i specificiran je za industrijsku primenu sa tačnošću od $\pm 0,2\%$. Nelinearnost statičke karakteristike je $\pm 0,2 - 0,4\%$, a ponovljivost $0,001 - 0,1^\circ\text{C}$.

Termootpornički senzor je pasivan i kroz njega mora prolaziti neka struja da bi se dobio napon koji se može meriti. Medutim, prolaskom struje kroz termootpornik nastaje Džulova toplota I^2R , koja ga dodatno zagrejava. Ovaj najveći nedostatak termootporničkih senzora ispoljava se kod plavinskog kao sistemskog greška $\pm 0,2 - 0,5^\circ\text{C}$ pri $I^2R = 10\text{mW}$.

Termootpornički senzor od Ni-žice. Nikl, železo i neke njihove legure imaju slične osobine kada je u pitanju mogućnost izrade termootpornika. Na primer, nikl ima linearni temperaturni koeficijent otpora $\alpha = 0,00586 \text{ } 1/\text{ } ^\circ\text{C}$ i relativno visok specifični otpor, $\rho = 12,8 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$. Merni opseg temperature je od -50°C do 250°C , a maksimalno mogući od -200°C do 430°C . Odnos otpora na 100°C i na 0°C je $R_{100}/R_0 = 1,664 \div 1,668$ sa tačnošću od $\pm 0,35\%$. Na višim temperaturama javljaju se korozija i oksidacija. Statička karakteristika je nelinearnija nego kod plavinskog termootpornika. Uz to je nestabilna i nereproducibilna, pa zato termootpornici od nikla i železa nisu standardizovani. Zbog pristupačne cene najveću primenu imaju u tehničkih KGH (Klimatizacija, Grejanje, Hladjenje) za merenje temperature vazduha, za merenje jačine veta i za merenje Sunčevog zračenja.

Termootpornički senzor od Cu-žice. Bakar je jeftin metal, može se dobiti sa visokim procentom čistoće, ima linearni temperaturni koeficijent otpora $\alpha = 0,0042 - 0,00427 \text{ } 1/\text{ } ^\circ\text{C}$ i mali specifični otpor, $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$. Termootpornik od Cu-žice ima $R_{100}/R_0 = 1,426 \div 1,428$ (sa tačnošću do $\pm 0,6\%$), stabilnu i reproducibilnu statičku karakteristiku, te linearnost nešto slabiju od plavinskog termootpornika.

Primenjuje se za merenje temperature u opsegu od -50°C do 180°C , a maksimalno od -200°C do 260°C . Na višim temperaturama javljaju se oksidacija i korozija bakra.



Slika 21.18. Termootpornički senzori: a) senzorske sone, i ručni displej, b) površinska senzori

Vrednost termootpora na $T=0^{\circ}\text{C}$ je standardizovana i može da iznosi od 10Ω do $25\text{k}\Omega$. Najčešća vrednost je 100Ω , pa otuda naziv platina sto (Pt 100), nikl sto (Ni 100) i bakar sto (Cu 100).

Tenzootpornik kao senzor temperature. Tenzoelementi u obliku lepljene folije pogodni su za merenje temperature. Najčešće se označavaju akronimom *TG* (Temperature Gage). Po svom izgledu, načinu lepljenja na podlogu, kao i po načinu priključivanja na mernu šemu oni se ne razlikuju od običnih tenzoelemenata. U odnosu na termootpore od Pt, Ni ili Cu-žice, imaju brži odziv i znatno su jeftiniji. Namenjeni su za merenje površinske temperature. Tačnost merenja je ista kao i kod običnog tenzoelementa.

TG-senzor obično se pravi od nikla i njegovih legura. Platina nije pogodna zbog visoke osetljivosti na mehanička naprezanja. Mehaničko naprezanje podloge pri merenju temperature za *TG*-senzor je smetnja koja se manifestuje kao sistemska greška. Za njenu korekciju služi dijagram temperatura – mehaničko naprezanje, koji se dobija eksperimentalno.

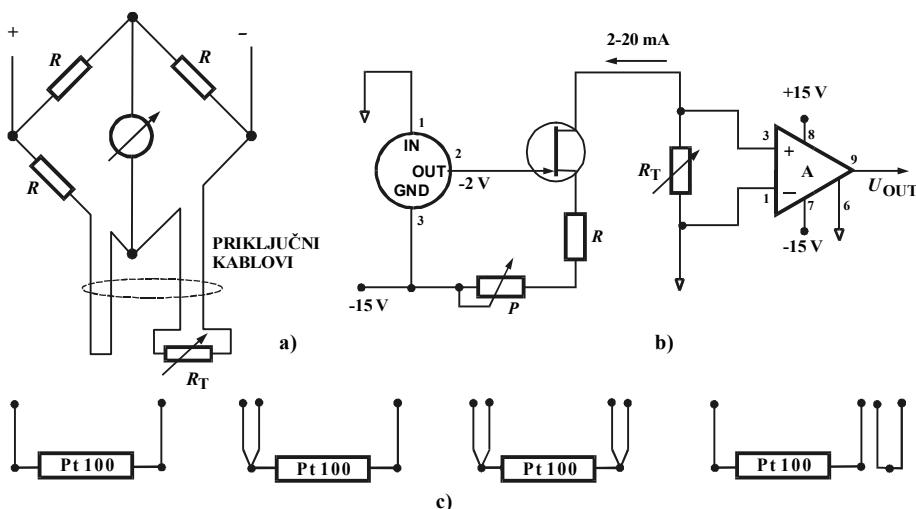
TG-senzorom može se istovremeno meriti i mehaničko naprezanje podloge. U tom slučaju neophodno je posebno otporničko kolo, čija je funkcija da statičku karakteristiku senzora otpor – temperatura transformiše u karakteristiku mehaničko naprezanje – temperatura za dati faktor osetljivosti senzora.

Tankoslojni termootpornički senzori temperature dobijaju se naparivanjem metala, najčešće platine, na keramičku podlogu (slika 21.18b). Senzor ima veliki odnos između površine i zapremine, što omogućava brz odziv pri merenju površinske temperature. Neravnometerno nanošenje metalnog filma na podlogu može da izmeni statičku karakteristiku u odnosu na žičani termootpornik od istog materijala. Rezolucija merenja temperature je $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.

Problem priključnih vodova. Omski otpor priključnih vodova utiče na tačnost merenja. Ako se promena otpora detektuje *U*-metodom, *I*-metodom ili po-

moću logometra, tada je otpor priključnih vodova normiran na 10Ω primenom justirnog otpornika. Navedenim metodama ne može se rešavati problem promene otpora priključnih vodova zbog delovanja temperature.

Kod jednostavnog priključivanja termootporničkog senzora u Vitstonov most promena otpora priključnih vodova usled temperature u celosti se odražava u jednoj grani mosta. To može znatno uticati na tačnost merenja, što je razmatrano na primeru tenzoclemenata (slika 18.19). Bolje rešenje je trožično priključenje termootportnika u most, ali se tada povećava opterećenje galvanometarskog nul-indikatora, što je takođe nepovoljno sa aspekta tačnosti. Za industrijske termootportnike najbolje je četvorozično priključivanje u merni most (slika 21.19a). Kao što se vidi, otpor priključnih vodova jednak je raspoređen u dve susedne grane mosta, a nul-indikator nije opterećen dodatnim otporom kao kod trožičnog spoja. S obzirom na dužinu i cenu kablova, četvorozična mosna šema je skuplja.



Slika 21.19. Priključivanje termootportničkih senzora: a) četvorozični mosni spoj, b) četvorozični sa strujnim izvorom, c) konfiguracije senzora za različite načine priključivanja

Četvorozična šema sa strujnim izvorom je savremeno rešenje (slika 21.19b). Jačina struje je $2-20\text{ mA}$ da samozagrevanje ne bi unelo grešku u merenje. Regulator napona daje stabilan izlaz od -2 V koji se dovodi na gejt FET tranzistora. Struja drejna se pomoću otpornika R i potenciometra P podesi na potrebnu vrednost od nekoliko miliampera. Napon na termootportniku R_T se pojačava instrumentacionim pojačavačem i vodi na indikacioni instrument ili A/D konvertor.

Termootportnički senzori isporučuju se sa dve tri ili četiri žice, a na korisniku je da odabere varijantu saglasno šemi u koju je senzor uključen (slika 21.19c).

Merenje temperaturne razlike. Pomoću metalnih termootportnika mogu se meriti i razlike temperature. Potrebna su dva termootportnika istih, približno linearnih karakteristika, $R_T = R_0(1 + \alpha T)$. Obično su spojeni u most u susednim granama mosta, mada mogu biti i u paralelnim granama. Na primer, za spoj dva termootportnika u susednim granama mosta izlazni signal je:

$$U_i = \frac{R_{T2} - R_{T1}}{2(R_{T2} + R_{T1})} U. \quad (21.43)$$

Nepovoljna strana diferencijalnog spoja sa dva termootpornika je opadanje osetljivosti sa porastom temperature.

Prednosti metalnih termootporičkih senzora temperature su:

- visoka tačnost i merenje apsolutne temperature, jer nema kompenzacije kao kod termoelemenata;
- stabilna i reproducibilna statička karakteristika;
- velika linearnost, veća nego kod termoelementa;
- brz odziv;
- male dimenzije i pristupačna cena.

Nedostaci metalnih termootpornika su:

- potreban je vanjski izvor energije jer se radi o pasivnom senzoru;
- mala promena otpora ΔR ;
- mala nominalna vrednost otpora na 0°C ;
- pojava samozagrevanja;
- osetljivost pojedinih izvedbi na mehaničke udare i lom.

21.4.2. Poluprovodnički otpornički senzori temperature

Termistor je temperaturno osetljivi otpornik, koji se pravi od čistog germanijuma, oksida metala hroma, kobalta, železa, nikla i drugih. Promena otpora sa temperaturom izrazito je nelinearna i u širem temperaturnom opsegu (od -50°C do 100°C) može se opisati eksponencijalnom jednačinom:

$$R_T = AT^b e^{B/T}, \quad (21.44)$$

gde su: T apsolutna temperatura u [K], A , b i B konstante zavisne od vrste materijala i konstrukcije termistora. U užem temperaturnom opsegu (od -50°C do 100°C) promena otpora opisuje se jednostavnijom jednačinom:

$$R_T = R_0 e^{B(1/T - 1/T_0)}, \quad (21.45)$$

gde je R_0 otpor termistora na nominalnoj temperaturi od 20°C (293 K).

Tipična vrednost R_0 je $1 - 10\text{ k}\Omega$, a koeficijenta B $1500 - 6000\text{ K}$ (najčešće 4000 K). Ove vrednosti se daju sa tačnošću od $\pm 20\%$, odnosno $\pm 17\%$. Tačne vrednosti R_0 i B mogu se odrediti metodom parametarskog merenja, odnosno testiranjem termistora na dvema poznatim temperaturama i potom rešavanjem dveju odgovarajućih jednačina (21.45).

Osetljivost termistora. Promena otpora u merenom temperaturnom intervalu 0 – 100 °C za termootpornik od platine iznosi samo 39% njegove nominalne vrednosti, za termootpornik od bakra 43% i od nikla 66%. Za termistore je promena otpora u istom temperaturnom intervalu čak 10–70 puta veća od njihove nominalne vrednosti (slika 21.20a).

Osetljivost termistora označava se kao temperaturni koeficijent α . Njegova vrednost nije konstantna već zavisi od merene temperature:

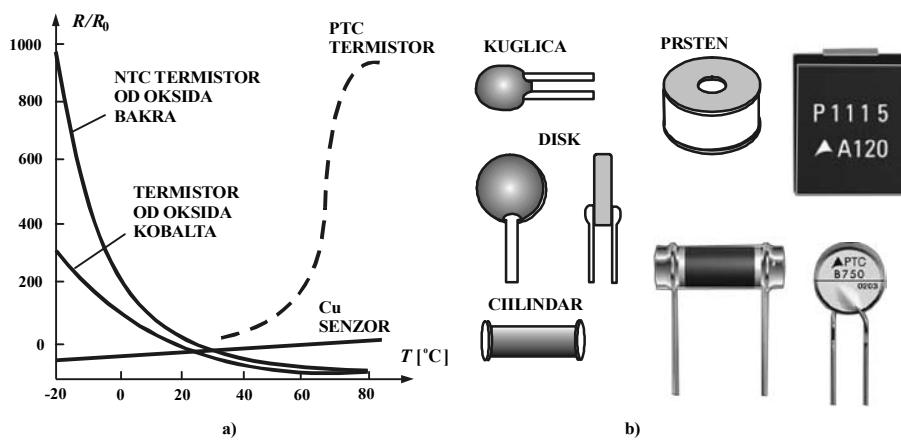
$$\alpha = \frac{dR_T/R}{dT} = -\frac{B}{T^2}. \quad (21.46)$$

Uobičajene vrednosti za α su od $-2\%/\text{°C}$ do $-5\%/\text{°C}$ pri 20 °C i daje se sa tačnošću od $\pm 0,2\%$.

Vrste termistora. Za razliku od žičanih termootpornika, za većinu termistora otpor opada sa porastom temperature, što znači da je temperaturni koeficijent otpora negativan. Takvi termistori često se nazivaju *NTC-otpornici* (*Negative Temperature Coefficient*). Temperaturni koeficijent termistora, međutim, može biti pozitivan, kao što je kod metala. Tada je reč o *PTC-otporima* (*Positive Temperature Coefficient*). Na strmom delu karakteristike osetljivost je izrazito velika, što je dobro za uključivanje ili isključivanje u odnosu na kritičnu temperaturu. Termistori najčešće imaju oblik diska, prstena ili cilindra (slika 21.20b).

Dobre osobine svih termistora su:

- visoka osetljivost na temperaturne promene
- male dimenzije i velika brzina odziva, od 1 ms do 150 s (najčešće 30 s)
- velika vrednost nominalnog otpora na 20 °C , $10\text{ k}\Omega$ – $10\text{ M}\Omega$
- neosetljivost na otpor priključnih vodova
- stabilnost sa starenjem, manje od $0,03\text{ °C/god}$ za period od 12 godina
- niska cena.



Slika 21.20. Termistor: a) tipične staticke karakteristike, b) izgled

Loše osobine termistora su:

- izrazito nelinearna karakteristika
- velike varijacije parametara, pa je eventualna zamena drugim termistorom uvek problematična
- mali temperaturni opseg
- nestabilnost na višim temperaturama
- povećano samozagrevanje zbog velikog otpora i malih dimenzija, zbog čega termistori rade sa manjom strujom nego žičani termootpornici ($< 100 \mu\text{A}$), (ova osobina karakteriše se disipacionom konstatom, snagom potrebnom da se termistor zagreje za 1°C iznad okoline - tipično $1 - 10 \text{ mW}/1^\circ\text{C}$).

Korekcija statičke karakteristike termistora. Statičke karakteristike nominalno istih termistora razlikuju se zbog velikih varijacija njihovih parametara, pa je neophodna korekcija prilikom zamene jednog termistora drugim. Linearizacija statičke karakteristike takođe se provodi korekcijom.

Suština korekcije sastoji se u serijskom ili paralelnom priključivanju dodatnih otpornika koji su termički nezavisni. Za serijski spoj termistora $R_T(T)$ i korekcionog otpora R_k statička karakteristika se pomera duž ordinate za iznos R_k :

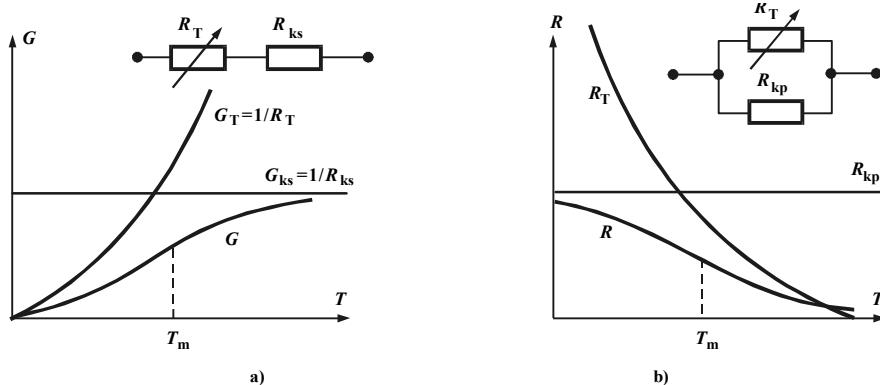
$$R(T) = R_T(T) + R_{ks}. \quad (21.47)$$

Pri tome otpor R_k ne utiče na prirast otpora: $\Delta R(T) = \Delta R_T(T)$, ali se zato menja provodnost kola $\Delta G(T)$.

Za paralelni spoj termistora i otpora R_{kp} provodnost je:

$$G(T) = \frac{1}{R_T(T)} + \frac{1}{R_{kp}}. \quad (21.48)$$

Prema tome, statička karakteristika provodnost – temperatura pomera se duž ordinatne ose za iznos $1/R_{kp}$ (slika 21.21). Prirast provodnosti kola ne zavisi od vrednosti paralelno priključenog otpora R_{kp} , tj. $\Delta G(T) = \Delta G_T(T)$, ali zato zavisi prirast otpora kola $\Delta R(T)$.



Slika 21.21. Linearizacija statičke karakteristike termistora: a) primena serijskog korekcionog otpornika R_{ks} , b) primena paralelnog korekcionog otpornika R_{kp}

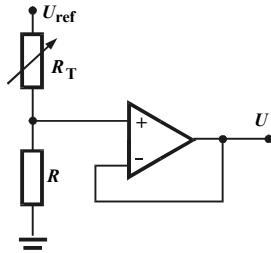
Serijskim i paralelnim priključivanjem temperaturno nezavisnih otpornika dobija se linearija statička karakteristika. Treba napomenuti da je osetljivost sa korekcionim otpornicima manja nego osetljivost samog termistora. Linearnost korigovane karakteristike najveća je na sredini mernog opsega, za temperaturu T_m gde je $R_{kp} \approx R_T(T_m)$.

Merne šeme sa termistorima. Standardne merne šeme ne razlikuju se od šema za žičane termootpornike. U praksi su najčešće šeme sa Vitstonovim mostom i bistabilnim multivibratorom kao oscilatorom. Na Vitstonov most termistor se priključuje samo sa dva voda. Tačnost merenja praktično ne zavisi od temperaturnih varijacija otpora vodova zbog visoke nominalne vrednosti otpora termistora. Termistor u tzv. četvrtinskom mostu meri absolutnu temperaturu, a dva termistora identičnih karakteristika u polomostu služe za merenje razlike dveju temperatura.

Termistori se priključuju u merni most ili naponski delitelj (slika 21.22). Termistor ima negativan temperaturni koeficijent, tako da napon U_{ul} na ulazu pojačavača raste sa porastom merene temperature. U opštem slučaju, promena napona U_{ul} je nelinearna, ali se u jednom užem temperaturnom području može aproksimirati pravcem. Otpor R određuje se tako da kriva napon–temperatura seče idealni pravac na početku (0%), na sredini (50%) i na kraju definisanog opsega (100%). Iz navedenih uslova dobija se jednačina:

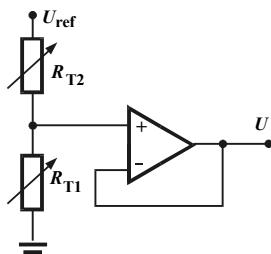
$$R = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 - 2 R_1 R_3}{R_1 + R_3 - 2 R_2}, \quad (21.49)$$

gde su R_1, R_2 i R_3 otpori termistora na temperaturama T_1, T_2 i T_3 , koje predstavljaju 0%, 50% i 100% datog mernog opsega. Rezultati proračuna za tipične merne opsege prikazani su u tabeli pored šeme na slici 21.22a. Maksimalno odstupanje od pravca

 $R_T = 2\,252\Omega$ na $25^\circ C$

OPSEG [°C]	$R [\Omega]$	EKVIVALENTNA POZICIJA KLIZAČA [%]	ODSTUPANJE OD LINEARNOSTI [%]
20-30	1670	37,36-48,04	+0,01
10-40	1731	27,86-59,06	+0,2
0-50	1763	19,34-68,49	+1,0
0-70	1164	13,66-74,69	+2,3

a)

 $R_T = 2\,252\Omega$ na $25^\circ C$

POČETNA RAZLIKA [°C]	OSETLJIVOST % / °C ZA TEMPERATURU		
	0 °C	-5 °C	+5 °C
0	1,28	1,29	1,22
40	1,01	1,02	0,97
70	0,86	0,87	0,83

b)

Slika 21.22. Merne šeme: a) termistor kao senzor absolutne temperature, b) termistor kao senzor razlike temperature

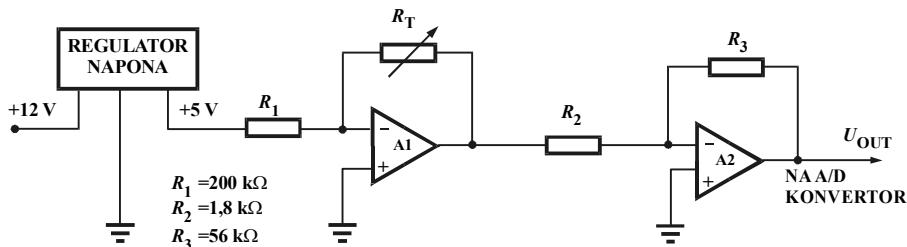
po pravilu je najveće u blizini 25% i 75% opsega. Ispod 0% i iznad 100% opsega nelinearnost se naglo povećava. Za proračunatu vrednost otpora R izlazni napon je:

$$U_i = \frac{R}{R + R_T} U_{\text{ref}}, \quad (21.50)$$

što odgovara ekvivalentnom položaju klizača potenciometra $R/(R + R_T)$.

Naponski delitelj sa dva termistora upotrebljava se za merenje razlike temperatura (slika 21.22b). Početna (nulta) temperaturna razlika odgovara tada sredini mernog opsega (50%), pa oba termistora imaju jednake vrednosti. Sa porastom temperature T_2 otpor termistora R_{T2} opada i izlazni napon raste. Ukoliko se povećava temperatura T_1 , otpor termistora R_{T1} opada, a takođe i izlazni napon. Prema tome, izlazni napon je proporcionalan razlici temperature $T_2 - T_1$. U tabeli pored dijagrama date su vrednosti za temperaturnu osetljivost. Na primer, za nultu temperaturnu razliku osetljivost je 1,28%/°C, odnosno 1,29%/°C za negativno odstupanje od -5°C od nulte i 1,22%/°C za pozitivno odstupanje od $+5^{\circ}\text{C}$ od nulte. Postoci se odnose na ekvivalentni položaj potenciometra sa klizačem.

Na slici 21.23 prikazana je jednostavna šema za priključivanje termistora na mikroprocesor. Izvod sa $+12\text{ V}$ naponskog izvora u računaru spojen je na regulator napona koji na svom izlazu daje stabilan napon $+5\text{ V}$. FET operacioni pojačavači imaju veliku ulaznu impedansu, $\sim T\Omega$, tako da se kroz regulator formira mala struja $i = 5/R_1 = 25\text{ }\mu\text{A}$ kao izvor konstantne struje koja je manja od $100\text{ }\mu\text{A}$ i neće bespotrebno zagrevati termistor. Izlazni pojačavački stepen daje potrebnii opseg napona za merni opseg temperature. Pomoću odgovarajućeg programa može se provoditi automatska kalibracija, u dve ili tri tačke, korekcija odziva i dr.



Slika 21.23. Šema za priključivanje termistora na mikrokontroler

Linearni termistori su specijalne konstrukcije termistora, koje se odlikuju linearnom promenom otpora sa promenom temperature. Linearni termistori prave se na principima linearizacija pomoću dodatnih elemenata. Dve ili tri termistorske folije formiraju jedinstvenu strukturu sa kompenzacionim otpornicima. Izlazni signal linearног termistora je napon ili otpor u funkciji temperature (slika 21.24).

Za sondu sa dva paralelna termistora na slici 21.24a izlazni napon je:

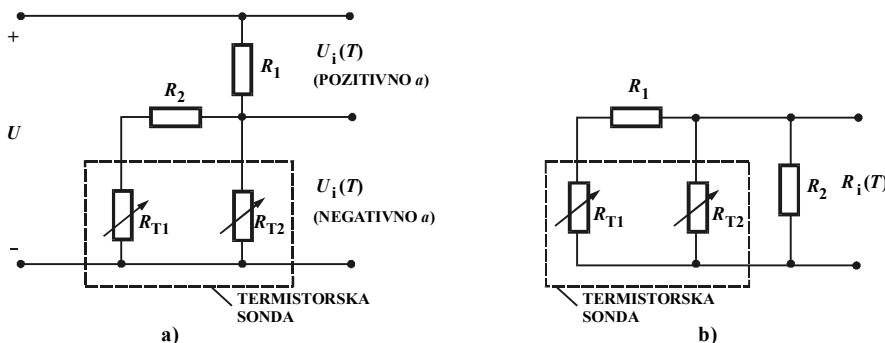
$$U_i = \frac{UR}{R_i + R} = \pm aT + b, \quad (21.51)$$

gde su a osetljivost $V/^{\circ}C$, T temperatura u $^{\circ}C$ i b vrednost izlaznog napona za $T=0^{\circ}C$. Osetljivost je pozitivna kada je delitelj zatvoren preko otpornika $R_i=R_1$, a negativna kada je delitelj zatvoren preko otpornika R_2 .

Kada je izlazna veličina otpor linearног termistora, tada je:

$$R_i = \pm a' T + b', \quad (21.52)$$

gde su R_i ukupni otpor linearног senzora [Ω], a' osetljivost [$\Omega/^{\circ}C$] i b' ukupni otpor pri $T=0^{\circ}C$. Osnovne odlike linearног termistora su: linearna karakteristika, složen proračun, visoka osetljivost, te veći temperaturni opseg nego kod običnog termistora.



Slika 21.24. Linearni termistor: a) izlazna veličina napon, b) izlazna veličina ukupni otpor

Silicijumski senzori temperature. Silicijumski senzori temperature imaju pozitivan temperaturni koeficijent otpora sa približno linearnom karakteristikom, što ih izdvaja u odnosu na konvencionalne PTC termistore. Senzor ovoga tipa pravi se od n -Si dopiranog sa primesama koje mu daju nominalnu otpornost od 1000Ω na $25^{\circ}C$. Osnovna konstrukcija sastoji se od kristala silicijuma veličine $0,5 \times 0,5 \times 0,24\mu m$ (slika 21.25a). Donja strana kristala je u celosti metalizirana, a na gornjoj strani je mala kružna elektroda prečnika $20\mu m$. Između dveju elektroda gustina struja menja se sa rastojanjem između elektroda radikalno zahvaljujući radikalno širenju otpora. Zavisnost senzora od temperature opisuje se sledećom jednačinom:

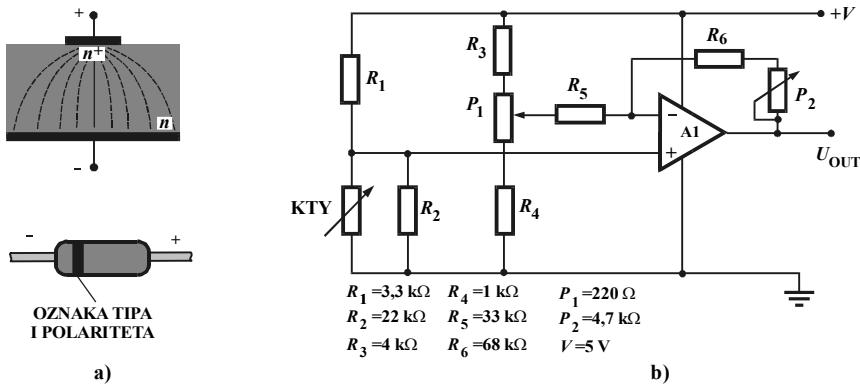
$$R(T) = R_{ref} \left[1 + A(T - T_{ref}) + B(T - T_{ref})^2 \right], \quad (21.53)$$

gde je R_{ref} otpor na referentnoj temperaturi T_{ref} , a A i B konstante.

Karakteristika $R(T)$ je skoro linearna u području od $-50^{\circ}C$ do $150^{\circ}C$, tačnost $\pm 0,5 - 3\%$. Dodatna linearizacija može se postići dodavanjem paralelnog ili serijskog kompenzacionog otpornika, slično kao kod termistora. Senzor je cilindričan (dužine $3 - 5 mm$, prečnika $1,5 - 3 mm$), sa dva izvoda na koja se priključuje struja specificirane jačine $I = 1 mA$. Najpoznatiji silicijumski senzori temperature su Filipsovi KTY81 (do KTY101).

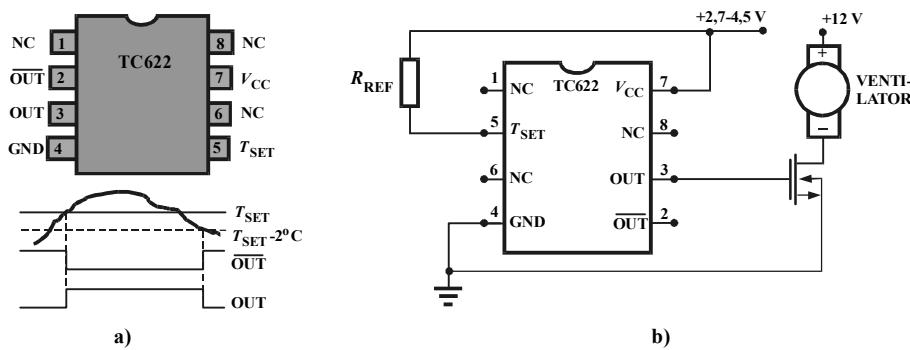
Silicijumski senzor temperature može se priključiti u Vitstonov most (slika 21.25b). Vrednosti otpornika u mostu odabrane su da obezbede linearnost i struju od

1 mA. Prilikom kalibracije prvo se na 0 °C pomoću P_1 podesi nula na $U_{\text{OUT}} = 0,2V = 1 \text{ V}$, a zatim se pomoću potenciometra P_2 na temperaturi 100 °C podesi $U_{\text{OUT}} = 0,6V = 3 \text{ V}$.



Slika 21.25. Silicijumski senzor temperature: a) princip rada i izgled, b) merno kolo

Integrисани silicijumski senzori pored temperaturno osetljivog elementa sadrže i kola za dobijanje termostatskih izlaza. Na primer, 8-pinski senzor TC622 (Microchip) aktivira izlaze OUT i $\overline{\text{OUT}}$ kada je merena temperatura veća od zadane. Setovanje se postiže eksternim otpornikom priključenim između pinova T_{SET} i V_{CC} , a njegova vrednost se određuje iz relacije $R_{\text{SET}} = 0,5997 \cdot T_{\text{ZAD}} \cdot \exp(2,1312)$. Na slici 21.26 prikazano je kolo koje se primjenjuje u PC računarima: čim je temperatura veća od zadate, izlaz OUT uključuje MOSFET prekidač i ventilator za hlađenje procesora. Interno je podešen histerezis na 2 °C.



Slika 21.26. Integrисани silicijumski senzor TC622: a) raspored pinova, b) termostatska zaštita

21.5. POLUPROVODNIČKI SENZORI TEMPERATURE

21.5.1. Dioda kao senzor temperature

Princip rada. Pri konstantnoj vrednosti napona polarizacije V_D struja diode I_D zavisi od temperature:

$$I_D = I_S [e^{qU_D/\eta kT} - 1], \quad (21.54)$$

gde su q nanelektrisanje elektrona i k Boltzmanova konstanta. Faktor η zavisi od brzine rekombinacije nosilaca nanelektrisanja uslovljene temperaturnom zavisnošću pokretljivosti manjinskih nosilaca. Za silicijum se uzima $\eta=1$ kada je napon polarizacije $U_D = 0, 7 - 1 \text{ V}$, a $\eta=2$ kada je $U_D < 0, 6 \text{ V}$.

Napon polarizacije u praksi se uvek bira da je veći od termičkog šuma: $U_D > \eta kT/q$. Direktna struja diode tada ima jednostavniji oblik:

$$I_D = I_S \exp(qU_D/2kT). \quad (21.55)$$

Inverzna struja zasićenja takođe se menja sa temperaturom:

$$I_S = BT^r e^{-E_G/\eta kT}. \quad (21.56)$$

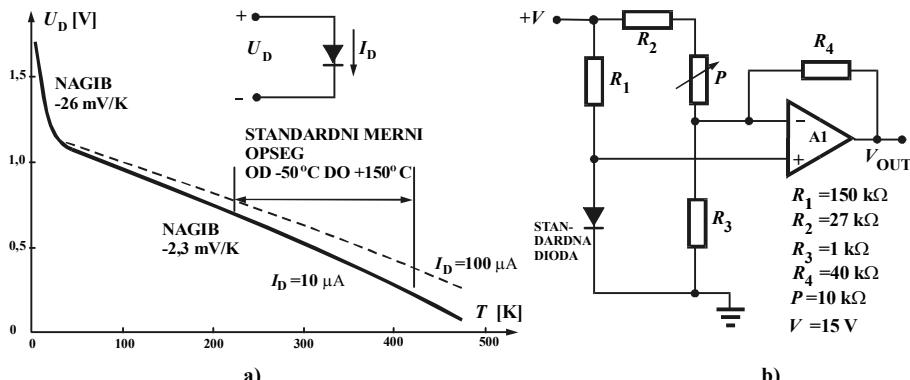
gde je E_G širina zabranjene zone za Si na 0 K, B konstanta kojom se uzima u obzir geometrija diode i $r=1,5$ temperaturni koeficijent pokretljivosti manjinskih nosilaca.

Struje I_D i I_S su male za praktična merenja, pa se zato meri napon direktnе pretpolarizacije U_D koji se pri konstantnoj struci I_D menja sa temperaturom kao što je prikazano na dijagramu 21.27a. Karakteristika $U_D=f(T)$ je nelinearna i proizvodači je daju u formi Čebiševljevog polinoma devetog reda, sa vrednostima koeficijenata koji su određeni prema mernim područjima. Na primer za senzor CY7 (Omega) definisana su četiri područja: 2 – 12 K, 12 – 24,5 K, 24,5 – 100 K i 100 – 475 K.

Uvrštavanjem jednačine (21.56) u (21.55) dobija se zavisnost $U_D=f(T)$. Obične komercijalne diode upotrebljavaju se kao senzori temperature od -50°C do $+150^\circ\text{C}$. U tom opsegu funkcija $U_D=f(T)$ približno je linearna:

$$U_D \approx k_1 - k_2 T, \quad (21.57)$$

gde je $k_1 = U_D(0) = 1,27 \text{ V}$, a konstanta osjetljivosti $k_2 = 2 - 3 \text{ mV/K}$, zavisno od jačine struje I_D . Za $I_D = 10 \mu\text{A}$ osjetljivost je $2,24 \text{ mV}^\circ\text{C}$, a za $I_D = 1 \text{ mA}$ osjetljivost je $2,3 \text{ mV}^\circ\text{C}$.

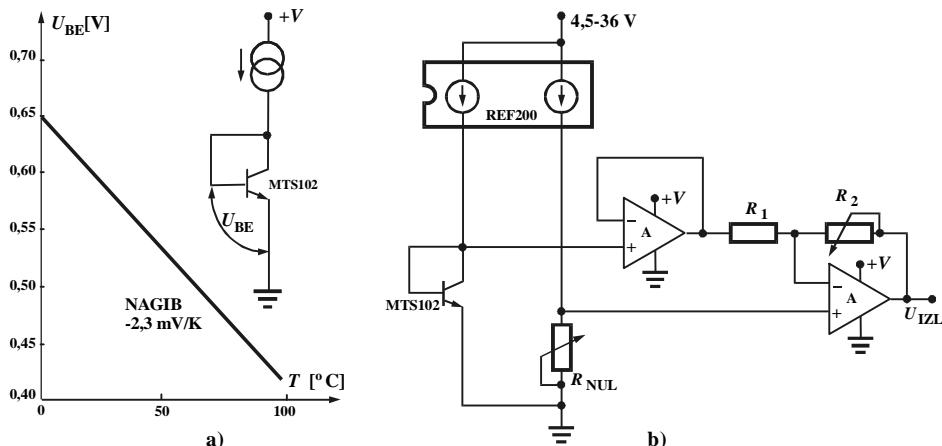


Slika 21.27. Diodni senzor temperature: a) karakteristika, b) dioda u mernom mostu

Sa običnim silicijumskim diodama (1N914, 1N4148) postiže se tačnost merenja do $\pm 2^\circ\text{C}$, a sa namenskim diodnim senzorima (DT670, CY7, GA300) do $\pm 0,25 - 1^\circ\text{C}$, zavisno od opsega.

Merne šeme. Najprostiji temperaturni senzor sa standardnom diodom (1N914 ili 1N4148) dobija se njenim uključenjem u merni most (slika 21.27b). Otpornik R određuje jačinu radne struje: $R_1 = V/I_D$. Bolji kvalitet merenja postiže se ako se struja diode drži na konstantnoj vrednosti pomoću tranzistora ili posebnog regulatora jednosmerne struje (REF200, MAX603, LM334). Može se primeniti i naponski regulator (LM234, LM340) čiji se regulirani naponski izlaz V_{REG} optereti otpornikom R tako da kroz njega teče stabilna struja $I = V_{REG}/R$.

Tranzistorska dioda. Pored običnih temperaturno osetljivih dioda, upotrebljavaju se i tranzistorske diode, koje se dobijaju kada se kolektor tranzistora kratko spoji sa bazom. Tranzistorska dioda sadrži dobre konstrukcione osobine obične diode i dobru ponovljivost karakteristika tranzistora, što omogućava njenu široku primenu u merenju temperature. Može se upotrebiti bilo koji tranzistor, ali su razvijeni posebni tipovi kao temperaturni senzori (MTS102-105). Osnovne šeme sa takvima senzorima praktično se ne razlikuju od šema koje se primenjuju za obične diodne temperaturne senzore (slika 21.28a). Za temperaturni opseg $0 - 100^\circ\text{C}$, napon U_{BE} opada od $0,7\text{ V}$ do $0,47\text{ V}$, tj. $-2,3\text{ mV}^\circ\text{C}$.



Slika 21.28. Tranzistor kao diodni senzor temperature: a) karakteristika i osnovni spoj, b) šema sa nezavisnim podešavanjem pojačanja i nule

Napon U_{BE} je funkcija apsolutne temperature T . Zato je za merenje na užem opsegu, na primer $0 - 100^\circ\text{C}$, potrebno da merna šema ima mogućnost podešavanja nule i da izlazni napon raste sa temperaturom. Na slići 21.18b prikazana je šema sa strujnim izvorom REF200 (Burr-Brown) sa dva izlaza od $100\text{ }\mu\text{A}$. Jedna struja se zatvara kroz temperaturni senzor a druga kroz potenciometar R_{NUL} za nameštanje nule. Izlazni napon je:

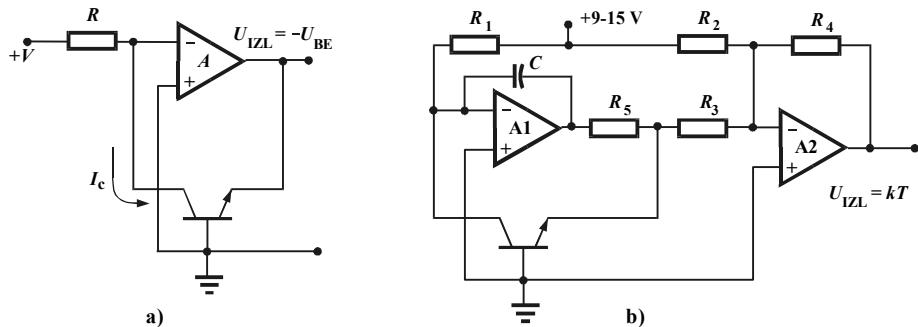
$$U_{IZL} = 100 \mu\text{A} \cdot R_{NUL} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - U_{BE} \frac{R_2}{R_1}. \quad (21.58)$$

Na temperaturi $T_{\text{MIN}} = 0^{\circ}\text{C}$ pomoću potenciometra R_{NUL} podeši se izlazni napon na vrednost $U_{\text{IZL,MIN}} = 0,5 \text{ V}$, a zatim se pomoću R_2 (ili R_i) podeši potrebno pojačanje da izlaz bude na granici linearног režima pri maksimalnoj merenoj temperaturi $T_{\text{MAX}} = 100^{\circ}\text{C}$. Tačnost koja se postiže je $\pm 2\%$ mernog opsega.

21.5.2. Tranzistor kao senzor temperature

Princip rada. Porast temperature utiče na smanjivanje inverzne struje I_{CBO} kroz spoj kolektor-baza, na isti način kao na pn spoju diode. Tipične vrednosti ovih struja za silicijumske tranzistore su $1 \mu\text{A}$, a za germanijumske $100 \mu\text{A}$ na temperaturi od 20°C . One se udvostručavaju za porast temperature od 10°C , ali bez obzira na visoke vrednosti linearног temperaturnog koeficijenta struje I_{CBO} , teško je meriti tako male struje. Veću primenu u merenju temperature ima zavisnost napona baza-emiter U_{BE} pri konstantnoj kolektorskoj struci I_{C} . Opadanje napona U_{BE} sa porastom temperature T je nelinearno, ali se u dosta širokom opsegu od -50°C do 150°C (za Si) može aproksimirati linearном funkcijom $U_{\text{BE}} = k_1 - k_2 T$, gde je $k_1 = U_{\text{BE}(0)} = 1,27 \text{ V}$ konstanta nezavisna od procesnih parametara, jačine struje I_{C} i geometrije tranzistora, a k_2 linearni temperaturni koeficijent napona baza-emiter čija je tipična vrednost $2,3 \text{ mV}^{\circ}\text{C}$. Statička karakteristika $U_{\text{BE}}(T)$ eksperimentalno se može odrediti na osnovu samo jednog merenja na proizvoljnoj temperaturi $T = T_{\text{ref}} [\text{K}]$ jer je vrednost $U_{\text{BE}(0)}$ poznata.

Merne šeme. Osnovna šema tranzistorskog senzora temperature sastoji se od operacionog pojačavača sa tranzistorom u povratnoj sprezi (slika 21.29a). Neinvertujući ulaz pojačavača je uzemljen, tako da je i potencijal invertujućeg ulaza nula (na virtualnoj masi). Kada tranzistor radi, napon kolektor-baza približno je jednak nuli i u ulaznom kolu formira se strujni izvor jednak kolektorskoj struci $I_{\text{C}} = E/R$, a na izlazu je $U_{\text{i}} = -U_{\text{BE}}$.



Slika 21.29. Tranzistor kao senzor temperature: a) osnovna šema, b) šema sa podešavanjem nule

Slično kao i kod diodnog senzora neophodno je nezavisno pojačanje i podešavanje nule, kao i izlaz koji je proporcionalan sa temperaturom, u datom mernom opsegu. Prvi stepen na slici 21.29b isti je kao na osnovnoj šemi: stabilni otpornik R_1 biraju se da struja kolektora bude oko $100 \mu\text{A}$, a izlaz iz A_1 je napon $-U_{\text{BE}}$. Pojačavač A_2 daje potrebno pojačanje R_4/R_3 , sa R_2 postiže se podešavanje nule pri $T = T_{\text{MIN}}$, a otpornik R_5 i kondenzator C radi prevencije od oscilacija.

21.5.3. Integrisani senzori

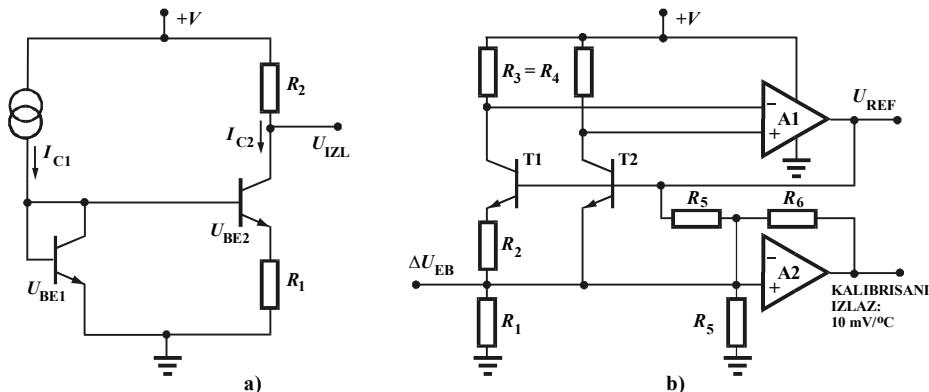
PTAT senzori temperature. U poređenju sa termoelementima i otporničkim senzorima, diode i tranzistori imaju manje dimenzije i znatno veću osetljivost na većem opsegu, ali im je ponovljivost slabija. Na primer, današnji tranzistori proizvode se sa tolerancijom V_{BE} od $\pm 3 \text{ mV}$, a nestabilnost V_{BE} usled termičkih ciklusa na mernom opsegu unosi dodatnu grešku od $\pm 0,15 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Navedeni nedostaci praktično se poništavaju kada se primenjuju dva tranzistora i meri razlika njihovih napona baza-emiter koja je proporcionalna absolutnoj temperaturi: $\Delta U_{BE} = CT$. Odatle akronim PTAT (*Proportinal To the Absolute Temperature*). PTAT senzori zajedno sa pojačavačima i kolima za podešavanje opsega integrisani su u senzorske monolitne čipove: analognе ili digitalne IC (*integrated circuits*) senzore temperature.

Principijelna šema za dobijanje napona ΔU_{BE} proporcionalnog absolutnoj temperaturi prikazana je na slici 21.30a. Silicijumski tranzistori T_1 i T_2 su identični i na istoj temperaturi, a priključeni su tako da su im struje kolektora različite. Struja baze je zanemarljivo mala u poređenju sa strujom kolektora, pa na osnovu jednačine (21.55) sledi da je napon baza-emiter:

$$\Delta U_{BE} = U_{BE1} - U_{BE2} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{C1}}{I_{C2}} . \quad (21.59)$$

Sve dok je odnos struja I_{C1}/I_{C2} konstantan, razlika ΔU_{BE} je proporcionalna absolutnoj temperaturi i nezavisna od napona napajanja i karakteristika tranzistora. Razlika $\Delta U_{BE} = U_{BE1} - U_{BE2}$ meri se na otporniku R_1 jer je:

$$R_1 I_{C2} = U_{BE1} - U_{BE2} . \quad (21.60)$$



Slika 21.30. Osnova integrisanih senzora temperature: a) PTAT princip, b) kolo za merenje temperature i dobijanje referentnog napona

Šeme sa internim referentnim naponom. Kolo koje pripada pojačavaču A1 generiše konstantan referentni napon U_{REF} nezavisno od temperature. Pojačavač održava jednaku vrednost naponu na kolektorima tranzistora T1 i T2. Otpornici R_3 i R_4 su jednaki, a tranzistori napravljeni tako da je površina emitera T1 multipl

površine T₂, obično 8 ili 16. Taj multipl određuje odnos kolektorskih struja, pa se zbog toga javlja nejednak napon baza-emiter, a na otporniku R₂ napon PTAT:

$$U_{R2} = U_{BE2} - U_{BE1} = \Delta U_{BE} = (kT/q) \cdot \ln(I_{C1}/I_{C2}) = (kT/q) \ln 8 . \quad (21.61)$$

Kroz otpornik R₂ teče struja I_{R2} = ΔU_{BE}/R₂, jednaka I_{E1}, koja je jednaka struji I_{E2}. Odатле је:

$$U_{R1} = I_{R1}R_1 = 2I_{R2}R_1 = 2R_1 \cdot \Delta U_{BE}/R_2 . \quad (21.62)$$

Na šemi se vidi da je U_{REF} = U_{BE2} + U_{R1}, odnosno sukcesivnim uvrštavanjem prethodne dve jednačine dobija se:

$$U_{REF} = U_{BE2} + 2 \frac{R_1}{R_2} (kT/q) \cdot \ln 8 . \quad (21.63)$$

Prvi član u referentnom naponu linearno opada -2,2 mV/°C, a drugi linearno raste 2(R₁/R₂₂) · 179 µV/°C sa porastom temperature na takav način da U_{REF} ima konstantnu vrednost, 1,25 V, nezavisnu od temperature. Opisano kolo ima veliki značaj jer se nalazi skoro u svim integriranim kolima. Kao što je rečeno, u takvom kolu uvek postoji (interni) senzor apsolutne temperature PTAT. Stvar je dalje jednostavna da se pomoću adekvatnog pojačavača A2 realizuje potrebno pojačanje i definiše nula mernog opsega.

Osnovni tipovi IC senzora temperature. U tehničkoj praksi značajna je primena tranzistora, dioda i tranzistorskih dioda u merenju temperature. Njihova prednost u odnosu na standardne otporničke i termoelektrične senzore je kompatibilnost sa elektronskim kolima, bez upotrebe kola za linearizaciju, preciznih pojačavača, otporničkih mernih kola i kompenzacije temperature hladnog kraja. Prvi IC senzori imali su unutrašnju strukturu vrlo sličnu opisanim diskretnim varijantama, sa naponskim ili strujnim izlaznim signalom proporcionalnim merenoj temperaturi.

Postoje dva osnovna tipa IC senzora: analogni i digitalni. Proizvodači ih klasificuju prema vrsti napajanja (strujni, naponski) i načinu dobijanja izlaznog signala (analogni napon, analogna struja, termostatski logički izlaz, serijski digitalni interfejs). Senzori su pakovani u standardnim kućištima: tranzistorskim (TO), ravnim (FLATPACK) ili u obliku kovčega (DIL), (slika 21.31a).

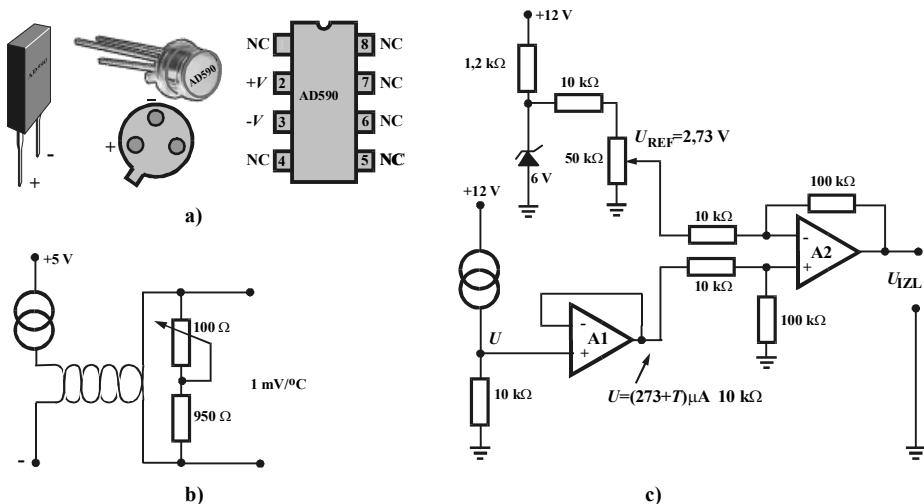
Digitalni IC senzori u svoj strukturi imaju A/D konvertor čime je omogućen bolji interfejs sa mikrokontrolerom. Koriste se različiti interfejsi: jednožični sa impulsno-širinskom modulacijom (PWM), dvožični I²C i SMBus i trožično/četverozični SPI protokoli. PWM senzori imaju niz četvrtki kod kojih je odnos signal/pauza proporcionalan temperaturi. Ovakav signal povezuje se na tajmer mikrokontrolera, a temperatura se računa iz funkcije odnosa vremena trajanja za visoki i niski signal. Time se eliminisu greške koje mogu da nastanu zbog upotrebe mikrokontrolera sa različitom frekvencijom kloka. Dvožični serijski interfejsi (I²C i SMBus) primenjuju se u zahtevnijim profesionalnim aplikacijama za povezivanje sa PC računarima. SPI protokol je trožični (ili četverozični) serijski interfejs za dvosmernu komunikaciju između mikrokontrolera i senzora u okruženjima bez PC računara. U tabeli 21.6 dat je pregled reprezentativnih tipova IC senzora i njihovih osnovnih karakteristika.

PROIZVODAČ TIP SENZORA	MERI TEMP.	IZLZNI SIGNAL	OSNOVNE KARAKTERISTIKE
ANALOG DEVICE AD590	KUĆIŠTA	ANALOGNI STRUJNI	Stabilan izlaz, imun na pad napona pri prenosu na daljinu, slaba osetljivost na smetnje.
MAXIM MAX675, REF-02 ANALOG DEVICE AD590 NATIONAL SEMICONDUCTOR LM45	KUĆIŠTA	ANALOGNI NAPONSKII	Senzor je kombinovan sa referentnim naponom ili drugim kolom, izlazni napon impedantno rastavljen.
MAXIM MAX6502 ANALOG DEVICE TMP01 MICROCHIP TC620	KUĆIŠTA	LOGIČKI (TERMOSTAT)	Ugrađeni analogni komparatori, mogućnost podešavanja histerezisa
DALLAS SEMICONDUCTOR DS1621 NATIONAL SEMICONDUCTOR LM75 LINEAR TECHNOLOGY LT1392	KUĆIŠTA	SERIJSKI DIGITALNI INTERFEJS	I C, SPI i SMBus interfejsi. Senzori mogu biti deo višefunkcionalnog A/D konvertora ili integriranog kola.
MAXIM MAX1617	VANJSKA DIODA	SERIJSKI DIGITALNI INTERFEJS	SMBus interfejs. Moguća direktna ugradnja na CPU.

Tabela 21.6. Pregled osnovnih tipova IC senzora

Senzor AD590 ima odlične karakteristike: merni opseg od -55°C do 150°C , linearnost $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ na opsegu, napon napajanja 4 – 30 V. Izlaz je strujni (nominalna vrednost $298,2 \mu\text{A}$ na 25°C , osetljivost $1 \mu\text{A}/^{\circ}\text{C}$, izlazna otpornost $> 10 \text{ M}\Omega$), što omogućava široku primenu u distacionim merenjima. Senzor je dvoterminalni, sa opteretnim otpornikom u izlaznom krugu. Kalibracija senzora se provodi na 25°C priključivanjem opteretnog otpornika od 950Ω i trimera od 100Ω . Kada je kalibriran, senzor daje na opterećenju $0,298 \text{ mV}$, odnosno $1 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ (slika 21.31b).

Da bi se dobio termometar koji pokazuje Celzijusove stepene, senzor AD590 je najpre kalibriran i onda opterećen sa $10 \text{ k}\Omega$ da bi se dobilo $U = (0,273 + T) \mu\text{A} \cdot 10 \text{ k}\Omega / V$, gde je T temperatura u stepenima Celzijusa. Na invertujući ulaz pojačavača A2 doveden je referentni $U_{\text{REF}} = 2,73 \text{ V}$. Kada je $T = 0^{\circ}\text{C}$, izlazni napon je nula, a izlaz se zatim menja za $10 \text{ mV}/10^{\circ}\text{C}$ (slika 21.31b).



Slika 21.31. Senzor AD590: a) pakovanje, b) osnovna šema, c) Celzijusov termometar

21.6. SENZORI INFRACRVENOG ZRAČENJA

21.6.1. Zakoni zračenja

Senzori infracrvenog zračenja poznati su pod različitim nazivima: IC senzori, senzori termičkog zračenja, pirometri i optički pirometri. Oni služe za beskontaktno merenje površinske temperature tela, bez narušavanja njegovog temperaturnog polja. Talasna dužina zračenja većine čvrstih tela je od 0 do ∞ , ali su za merenje temperature najbitniji vidljivi spektar ($\lambda = 0,40 - 0,75 \mu\text{m}$) i infracrveni spektar ($\lambda = 0,75 - 400 \mu\text{m}$).

Kirhofov zakon zračenja realnog tela predstavlja relaciju između zračenja koje pada na telo ϕ i zračenja koje telo apsorbuje ϕ_a , zračenja koje ono reflektuje ϕ_r i zračenja koje ono propušta ϕ_p :

$$\phi = \phi_a + \phi_r + \phi_p . \quad (21.64)$$

Kirhofov zakon zračenja poznatiji je u relativnom obliku

$$1 = \frac{\phi_a}{\phi} + \frac{\phi_r}{\phi} + \frac{\phi_p}{\phi} \quad \text{ili} \quad 1 = \alpha_a + \alpha_r + \alpha_p , \quad (21.65)$$

gde su $\alpha_a = \phi_a/\phi$ koeficijent apsorpcije, $\alpha_r = \phi_r/\phi$ koeficijent refleksije i $\alpha_p = \phi_p/\phi$ koeficijent propuštanja.

Infracrveni metodi merenja temperature. Telo koje ima koeficijent apsorpcije jednak jedinici naziva se apsolutno crno telo i na određenoj temperaturi ono zrači maksimalnu energiju. To je idealni radijator: apsorbuje sve zračenje koje padne na njega i, takođe, za datu temperaturu emituje maksimalno moguću količinu toplotnog zračenja. Pirometarski metodi merenja temperature temelje se na zakonima koji predstavljaju vezu između energije koju zrači crno telo i njegove temperature.

Plankov zakon predstavlja vezu između apsolutne temperature T i spektralne gustine zračenja $E(\lambda, T)$, tj. energije koje crno telo zrači na talasnoj dužini λ pri temperaturi T :

$$E(\lambda, T) = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} , \quad (21.66)$$

gde su: $E(\lambda, T)$ spektralna gustina zračenja [W/m^3], $C_1 = 2\pi hc^2 = 3,7415 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^2$ prva i $C_2 = ch/k = 0,01438786 \text{ m}\cdot\text{K}$ druga radiaciona konstanta ($h = 6,6260755 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ Plankova konstanta, $k = 1,380658 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ Boltmanova konstanta i $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ brzina svetlosti u vakuumu).

Vinov zakon zračenja je poseban slučaj Plankovog zakona jer uzima u obzir samo male vrednosti proizvoda λT . Ako je $\lambda T < 0,002 \text{ Km}$, jednačina (21.66) može se sa tačnošću od 0,1% zameniti Vinovom jednačinom:

$$E(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} e^{-C_2/\lambda T} . \quad (21.67)$$

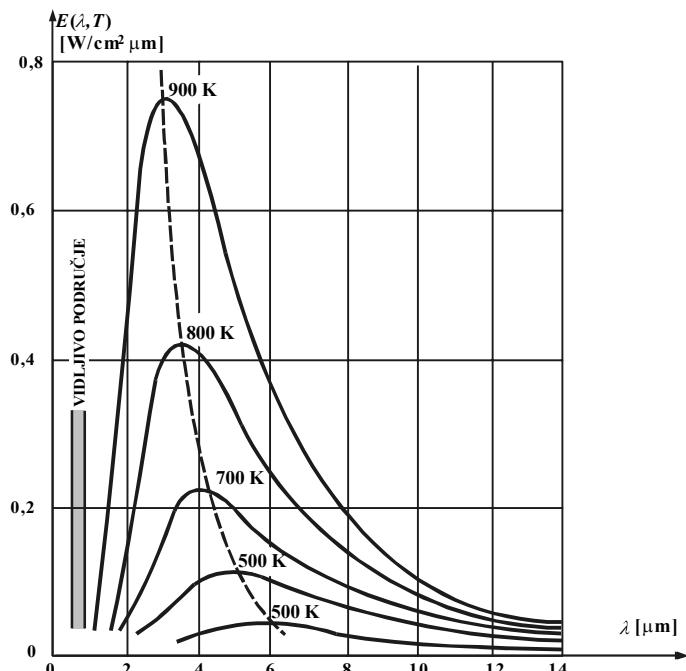
Iz familije krivih $E(\lambda, T)$ dobijenih na osnovu Plankove formule (21.66) za različite vrednosti temperature T , može se zaključiti:

- spektralna gustina zračenja $E(\lambda, T)$ zavisi od talasne dužine zračenja i povećava se sa porastom temperature
- u vidljivom delu spektra (šrafirana oblast na slici 21.32) spektralna gustina raste znatno brže nego temperatura, što je osnova za merenje viših temperaturi
- sa smanjenjem temperature maksimumi krivih $E(\lambda, T)$ pomjeraju se prema infracrvenom području i većim talasnim dužinama, što je osnova za merenje nižih temperatura nego u vidljivom delu spektra (pri tome se talasna dužina λ_{\max} koja odgovara maksimumu krive $E(\lambda, T)$ računa prema Vinovom zakonu pomaka $\lambda_{\max}T = b$, gde je $b = 2,896 \cdot 10^{-3}$ Km; na slici 21.32 Vinov zakon je prikazan crtanom linijom).

Štefan-Bolcmanov zakon predstavlja vezu između temperature i gustine zračenja za sve frekvencije elektromagnetskog zračenja crnog tela. To je tzv. integralna gustina zračenja i dobija se integralenjem Plankove jednačine za talasne dužine od 0 do ∞ , odnosno

$$E = \sigma T^4, \quad (21.68)$$

gde je $\sigma = 5,6696 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ Štefan-Bolcmanova konstanta.

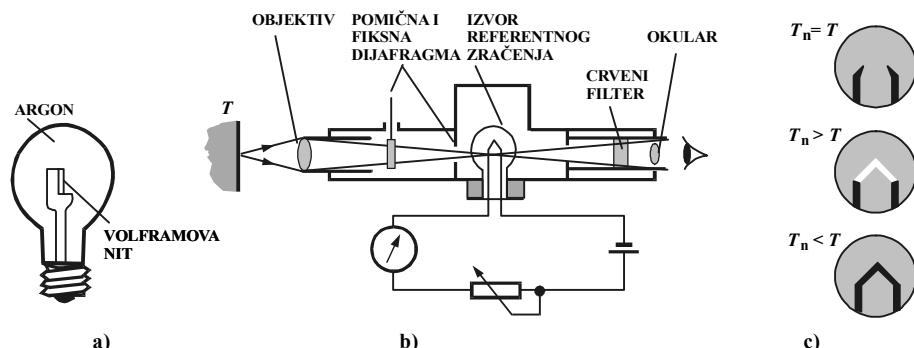


Slika 21.32. Zavisnost gustine zračenja od talasne dužine zračenja

21.6.2. Pirometri spektralnog zračenja

Pirometri – senzori zračenja (radijacioni senzori). Zakoni zračenja crnog tela predstavljaju osnovu za gradnju temperaturnih senzora infracrvenog zračenja. Ovi senzori nazivaju se pirometrima. Razlikuju se: pirometri spektralnog zračenja, pirometri određenog spektra zračenja, radijacioni pirometri totalnog zračenja i radijacioni pirometri odnosa dvaju spektralnih zračenja.

Optički (vizuelni) pirometar služi za merenje spektralne gustine zračenja unutar uskog opsega talasnih dužina $\lambda = (0,656 \pm 0,008) \mu\text{m}$. Zato se ovaj pirometar naziva i monohromatski. Radi na principu upoređivanja spektralne gustine zračenja tela čija se temperatura meri i spektralne gustine zračenja baždarenog (referentnog) izvora zračenja. Izvor referentnog zračenja je sijalica sa užarenom volframovom žicom (slika 21.33.a). Za nju je karakteristično da za temperature do 1500°C ima stabilnu zavisnost intenziteta zračenja od struje koja kroz nju teče. Detektor koji upoređuje navedena zračenja je ljudsko oko.



Slika 21.33. Optički pirometar: a) izvor referentnog zračenja, b) optički pirometar sa isčezavajućom niti, c) isčezavajuća nit

Najpoznatija je konstrukcija optičkog pirometra sa isčezavajućom niti (slika 21.33.b). Pomoću objektiva pirometar se usmerava na telo čija se temperatura meri. Na fonu objekta istovremeno se uočava i užarena niti referentnog izvora. Upoređivanje spektralnih gustina zračenja objekta i referentnog izvora ostvaruje se na talasnoj dužini $\lambda = 0,656 \mu\text{m}$ zahvaljujući crvenom filteru postavljenom ispred okulara. Pomerajući klizač potenciometra, operator menja struju kroz užarenu niti sijalice sve dok se ne ostvari jednakost spektralnih gustina zračenja tela i sijalice. U tom trenutku niti sijalice ne razlikuje se od fona objekta, što operator detektuje kao isčezavanje (prekid) niti (slika 21.33.c). Očitana temperatura niti T_n tada je jednaka temperaturi ispitivanog objekta T . Fiksna dijafragma ispred sijalice i pomična dijafragmana okularu menjaju ulazni i izlazni ugao pirometra, tako da se odabrani segment tela čija se temperatura meri u celosti nalazi u vidnom polju. Na taj način merenje temperature ne zavisi od rastojanja između pirometra i tela koje zrači.

Zračenje realnih (sivih) tela meri se u odnosu na idealni radiator, tj. u odnosu na crno telo. Između ovih zračenja postoji veza:

$$E_r = \epsilon E_{ct}, \quad (21.69)$$

gde je $0 < \varepsilon < 1$ koeficijent emisije, koji zavisi od temperature tela i vrste materijala od kojeg je telo napravljeno. Pošto je $E_r < E_{ct}$, zaključuje se da će pirometar detektovati manju temperaturu od one koju ima crno telo sa istom spektralnom gustinom zračenja. Kaže se da temperatura užarene niti T_n odgovara jednoj uslovnoj temperaturi objekta koja se naziva temperatura sjaja T_s ; $T_s < T$. Kada je, dakle, jednaka osvetljenost objekta na temperaturi T i niti na temperaturi sjaja $T_n = T_s$, tada je ostvarena jednakost njihovih spektralnih gustina zračenja $\varepsilon E_{ct}(\lambda, T) = E(\lambda, T_s)$, odnosno:

$$\frac{\varepsilon C_1}{\lambda^5(e^{C_2/\lambda T} - 1)} = \frac{C_1}{\lambda^5(e^{C_2/\lambda T_s} - 1)}. \quad (21.70)$$

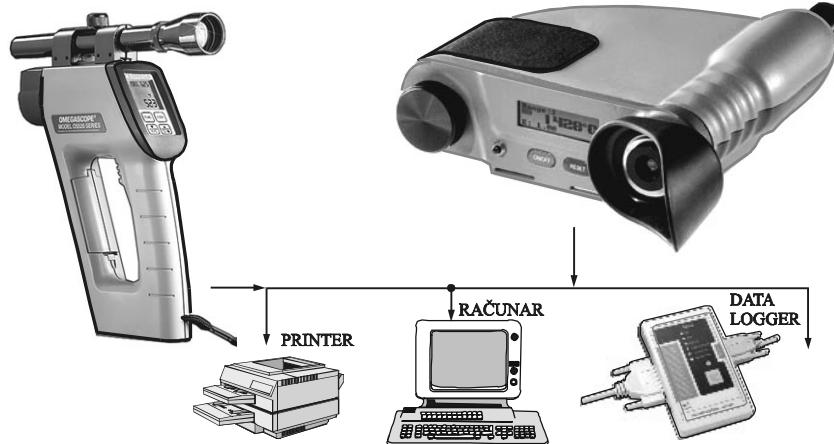
Za temperature ispod 4000°C je $e^{C_2/\lambda T} \gg 1$ i $e^{C_2/\lambda T_s} \gg 1$, tako da prethodna jednačina postaje

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_s} = \frac{\lambda \ln \varepsilon}{C_2}. \quad (21.71)$$

Očitavanjem temperature $T_n = T_s$ i njenim uvrštavanjem u izraz (21.71), određuje se temperatura objekta T . Razlika $T - T_s$ javlja se kao sistematska greška, koja je veća što god je koeficijent ε manji. Kada bi objekat bio idealno crno telo ($\varepsilon=1$), tada bi indicirana temperatura sjaja bila jednaka stvarnoj temperaturi objekta. Vrednosti ε obično se daju tabelarno za razne metale, a pri talasnoj dužini $\lambda = 0,656 \mu\text{m}$. Nedovoljno poznavanje ε i osjetljivost pirometra na zračenja u širem opsegu talasnih dužina glavni su izvori grešaka. Tipična tačnost optičkog pirometra je $\pm 1,5\text{--}4\%$, a opseg je obično podeljen u dva dela. Prvi deo je $800\text{--}1200^\circ\text{C}$. Proširenje opsega na $1200\text{--}2000^\circ\text{C}$ ili više postiže se pomoću sivog filtera, koji umanjuje spektralnu gustinu zračenja tela nekim višekratnikom, umesto da se za taj isti višekratnik poveća spektralna gustina referentnog izvora. Na taj način gornja granica optičkog pirometra može se pomeriti do 8000°C . Na tačnost merenja utiče položenje nečistoće na filterima i objektivu, te prisustvo dima ili pare između pirometra i objekta merenja. Najmanja površina tela u vidnom polju zavisi od njegovog rastojanja od pirometra. Na rastojanju $1\text{--}2\text{ m}$ ta površina je prečnika $30\text{--}50\text{ mm}$, a za 4 m prečnika $100\text{--}200\text{ mm}$. Na većini pirometara postoji mogućnost prilagodavanja okulara dioptriji od -3 do $+3$.

Optički pirometar sa optoelektronskim senzorima zračenja. Umesto ljudskog oka kao kod optičkog pirometra, za senzore zračenja mogu se upotrebiti senzori svetlosnog zračenja (fotodiode, fotoelementi, fotopotenciometri, fototranzistori) i bolometri, tj. senzori toplotnog zračenja (termoelementi, termootpornici, piroelektrici, Golejeva ćelija). Kako je izlazni signal ovih senzora proporcionalan sa zračenjem, pomoću njih se mogu praviti pirometri direktnog tipa. Takva konstrukcija pogodna je za pirometre delimičnog i totalnog zračenja, za specijalne senzore u sistemima zaštite objekata i ljudi, a može se priključiti i u akvizicioni merni sistem (slika 21.35).

Zahvaljujući optoelektronskim senzorima zračenja moguće je realizovati optičke pirometre kompenzacionog tipa, gde detekcija zračenja nije ograničena na vidljivi spektar. Poznato je da su kompenzacione strukture složenije od direktnih, ali da omogućavaju veću tačnost merenja. Pirometar sa automatskom kompenzacijom na opsegu $800\text{--}2000^\circ\text{C}$ ima tačnost $\pm 1\%$, a na opsegu $2000\text{--}8000^\circ\text{C}$ tačnost je $\pm 1,5\%$.



Slika 21.34. Akvizicioni sistem sa optičkim pirometrom

21.6.3. Pirometri odnosa spektralnih zračenja

Pirometri odnosa spektralnih zračenja mere temperaturu tela na bazi odnosa spektralnih gustina zračenja na dvema talasnim dužinama, λ_1 i λ_2 . Prema Vinovoj jednačini (21.67) ovaj odnos je:

$$\ln \frac{E(\lambda_1, T)}{E(\lambda_2, T)} = \frac{C_2}{T} \left[\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right] + 5 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}. \quad (21.72)$$

Pirometar kalibriran na temelju odnosa spektralne gustine zračenja crnog tela ne pokazuje stvarnu temperaturu tela T , već uslovnu temperaturu, koja se označava kao temperatura boje T_b . Razlog je što koeficijent emisije realnog tela zavisi od talasne dužine zračenja, pa je u opštem slučaju $\varepsilon_{\lambda,1} \neq \varepsilon_{\lambda,2}$. Temperatura boje definiše se kao temperatura realnog tela na kojoj crno telo ima odnos spektralnih gustina zračenja $E_{ct}(\lambda_1, T_b)/E_{ct}(\lambda_2, T_b)$ jednak odnosu spektralnih gustina zračenja realnog tela $E_r(\lambda_1, T)/E_r(\lambda_2, T)$ na stvarnoj temperaturi T . Imajući u vidu da zračenje realnog i crnog tela povezuje relacija (21.70), definisani odos može se napisati na sledeći način:

$$\frac{E_{ct}(\lambda_1, T_b)}{E_{ct}(\lambda_2, T_b)} = \frac{\varepsilon_{\lambda,1} E_{ct}(\lambda_1, T)}{\varepsilon_{\lambda,2} E_{ct}(\lambda_2, T)}. \quad (21.73)$$

Uvrštavanjem Vinove jednačine dobija se prošireni oblik prethodne jednačine:

$$\frac{C_1 \lambda_1^{-5} e^{-C_2/\lambda_1 T_b}}{C_1 \lambda_2^{-5} e^{-C_2/\lambda_2 T_b}} = \frac{\varepsilon_{\lambda,1} C_1 \lambda_1^{-5} e^{-C_2/\lambda_1 T}}{\varepsilon_{\lambda,2} C_1 \lambda_2^{-5} e^{-C_2/\lambda_2 T}}. \quad (21.74)$$

odakle je:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_b} = \frac{\ln(\varepsilon_{\lambda,1}/\varepsilon_{\lambda,2})}{C_2(1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)}. \quad (21.75)$$

Razlika između stvarne temperature tela T i izmerene temperature boje T_b predstavlja sistematsku grešku pirometra. Ona je veća što god je izraženija promena faktora emisije sa talasnom dužinom zračenja. Ukoliko je na datom segmentu spektra $\varepsilon_{\lambda_1} \approx \varepsilon_{\lambda_2}$, tada je desna strana jednačine (21.75) jednaka nuli, pa je $T_b = T$. U praktičnim realizacijama nastoji se da razlika $\lambda_2 - \lambda_1$ bude što veća, tako da je $T_b \approx T$.

Način gradnje. Prema načinu merenja odnosa dva spektralna zračenja razlikuju se jednokanalni i dvokanalni pirometri. Kod dvokanalnih pirometara izdvajaju se merni signali dvaju monohromatskih zračenja talasnih dužina λ_1 i λ_2 i detektuju u nezavisnim kanalima, da bi se u sklopu za računanje odredio njihov odnos. Dvokanalni pirometri su složeniji, ali imaju veću brzinu odziva.

Kod jednokanalnih pirometara odnosa spektralnog zračenja na fotoprijemnik naizmenično dolaze dva monohromatska signala. To se obično postiže pomoću modulatora, napravljenog u obliku diska, na kome su ugrađena dva filtera: crveni i sivi. Disk se okreće konstantnom ugaonom brzinom, tako da se na fotoelementu javljaju trapezasti impulsi U_1 i U_2 proporcionalni odgovarajućim spektralnim zračenjima.

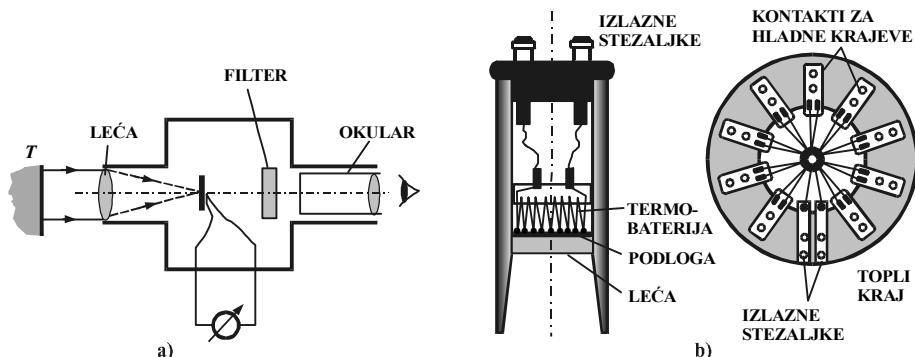
21.6.4. Radijacioni pirometri

Radijacioni pirometri mere temperaturu tela na bazi ukupnog zračenja tela na svim talasnim dužinama od 0 do ∞ . Prema tome, osnova rada je Štefan-Bolcmanov zakon (21.68). U praksi je ovaj uslov teško ostvariti. Zato većina radijacionih parametara meri temperaturu tela na osnovu zračenja u ograničenom delu spektra, u kojem treba da se nalazi najmanje 90% ukupnog zračenja. Kao senzori zračenja u radijacionim pirometrima upotrebljavaju se isključivo senzori termičkog (infracrvenog) zračenja. Optoelektronski kvantni senzori nisu pogodni jer su oni osjetljivi na uzak spektar zračenja. Konstrukcija radijacionog pirometra treba da omogući zahvatanje zračenja u što širem spektru, te da ga koncentriše na senzor pomoću odgovarajućeg optičkog sistema sa lećama ili ogledalima.

Radijacioni pirometar refraktorskog tipa. Zračenje tela fokusira se optičkim sistemom leća na senzor termičkog zračenja. Najčešće je to termistor ili termo-element. Da bi se dobio veći termonapon, primenjuje se termobaterija – serijski spoj više termoelemenata. Termobaterija ima zvezdastu strukturu, sa centrom u kome su topli krajevi termoelementa. Termoelementi su obično K -tipa i napravljeni su od žice prečnika $60 - 70 \mu\text{m}$. Na tačnost pirometra sa refrakcijom utiče refleksija zračenja od leće. (Koefficijent refleksije od 0,05 za optičko staklo do 0,15 za talijum-bromid.) Osim toga, materijal od kojeg se prave leće uvek prigušuje jedan deo spektra.

Radijacioni senzori reflektorskog tipa. Zračenje objekta prima se kroz prozor od kvaraca i potom pomoću ogledala koncentriše na mesto gde se nalazi senzor toplotnog zračenja (slika 21.35). Okular služi za fokusiranje objekta merenja.

Radijacioni pirometri upotrebljavaju se za beskontaktno merenje temperature u opsegu od -50°C do 3500°C , sa tačnošću $\pm 1 - 1,5\%$. Brzina odziva je $0,3 - 1,5\text{s}$. Čestice prašine ili vlage između objekta merenja i pirometra apsorbuju deo zračenja, što se odražava na smanjenje tačnosti. Visoka temperatura okoline takođe negativno utiče na tačnost merenja.



Slika 21.35. Radijacioni pirometar reflektorskog tipa: a) principijelna konstrukcija, b) termobaterija sa zvezdastom strukturom za detekciju upadnog zračenja

Sistematska greška radijacionog pirometra. Radijacioni pirometar kalibriše se na osnovu zračenja crnog tela. Međutim, pošto realno telo zrači u ograničenom delu spektra, izmerena temperatura će biti manja od stvarne. Izmerena temperatura je uslovna temperatura i označava se kao radijaciona temperatura T_r . Definiše se kao temperatura na kojoj realno telo (čija je stvarna temperatura T) ima isto ukupno zračenje kao i crno telo. Iz jednačine za zračenje realnih tela (21.69) dobija se da je:

$$\sigma T_r^4 = \varepsilon \sigma T^4, \quad (21.76)$$

odakle je stvarna temperatura:

$$T = T_r \sqrt[4]{1/\varepsilon}. \quad (21.77)$$

Zaključak je da se stvarna temperatura tela T može izmeriti na bazi radijacione temperature T_r ukoliko je poznata vrednost koeficijenta emisije ε . Razlika između T i T_r predstavlja sistematsku grešku radijacionog pirometra. Greška je manja što god je vrednost ε bliža jedinici.

21.7. SPECIJALNI SENZORI TEMPERATURE

21.7.1. Infracrvena termovizija

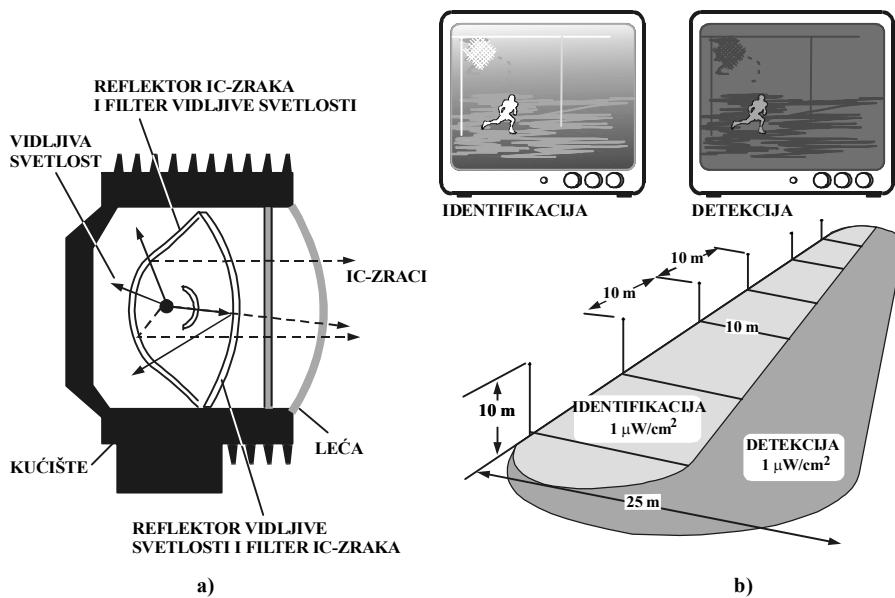
Temperaturno polje. Automatska regulacija temperature obično se vrši na osnovu pretpostavke da je temperatura reguliranog objekta ista u svim njegovim tačkama. Za takvu regulaciju dovoljno je merenje temperature samo u jednoj tački. Realni tehnički objekti, međutim, imaju prostorne osobine, pa njihovo stanje nije samo funkcija vremena t , već i svake tačke fizičkog prostora koji opisuje dati objekt. U tom slučaju temperatura je raspodeljena po objektu čineći tako njegovo temperaturno polje. Nastanak temperaturnog polja objašnjava se nejednakom raspodelom primesa i prisustvom lokalnih efekata u strukturi materijala.

Vizuelizacija temperaturnog polja. Informacije o temperaturnom polju dobijaju se na osnovu infracrvenog (termičkog) zračenja objekta. Zračenje se prati istovremeno za sve tačke objekta (paralelni metod) ili se prati sukcesivno od jedne do druge tačke (metod skeniranja). Za registraciju merne informacije o temperaturnom polju upotrebljavaju se fotopapir, filmska traka, ploče sa fotoelementima ili tankim slojem tečnog kristala, piroelektrika i dr. Nastali zapis označava se kao termička slika, a sam uređaj koji služi za njeno dobijanje naziva se termograf ili termovizija.

Aktivni i pasivni IC-senzori. IC-senzori mogu biti aktivni ili pasivni. Aktivnim se nazivaju senzori osetljivi na IC-zračenje posebnog izvora koje je reflektovano od mernog objekta. Pasivni senzori registruju direktno zračenje objekta. Kao izvor IC-zračenja u veoma bliskom ($\lambda = 0,76 - 1\mu\text{m}$), bliskom ($\lambda = 1 - 3 \mu\text{m}$) i srednjem ($\lambda = 3 - 8 \mu\text{m}$) infracrvenom području primenjuju se sijalice sa užarenom niti, poluprovodnički IC-reflektori i laserske diode.

Posebni problem primene kako pasivnih tako i aktivnih IC-senzora je obezbeđenje prostora, opreme i ljudi. Sistemi tehničke zaštite sa aktivnim IC-senzorima sadrže predajnik i prijemnik zračenja. Prolaskom nepoželjnog objekta, preseca se IC-zrak, pa fotoprijemnik menja svoje stanje i aktivira elektronska kola alarma i zaštite. Pasivni IC-senzori, kao što su infracrvene fotodiode, detektuju nailazak objekta na osnovu njegovog zračenja ili kao kontrast u odnosu na zračenje pozadine.

Na slici 21.36 prikazana je zona oko štićenog objekta, koja je osvetljena specijalnim IC-reflektorima. Reflektorske površine premazane su tankim slojevima koji omogućavaju da se IC-svetlost usmeri napred, dok se vidljiva i dugotalasna IC-svetlost usmerava iza sijalice. Karakteristike reflektora su: neprekidni rad 2 000 –



Slika 21.36. Infracrveni reflektor: a) konstrukcija IC-reflektora, b) osvetljenost zona duž perimetra štićenog objekta

4000 sati, nepostojanje ventilatora i otvora za hlađenje, mogućnost primene u svim klimatskim uslovima zahvaljujući oklopu od aluminijuma ili nerđajućeg čelika, te lagana zamena sijalice i održavanje. Zemljište oko štićenog objekta podeljeno je u tri zone prema intenzitetu zračenja. Infracrvena foto-kamera snima događaje na štićenoj zoni i prosledjuje tehničku sliku do kontrolnog punkta. U zoni slabe osetljivosti ($1 - 2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) samo se detektuje prisustvo toplih objekata, u zoni srednje osetljivosti ($4 - 5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) prepoznaju se njegove konture, dok se u zoni najveće osetljivosti ($7 - 8 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) uočavaju pojedini detalji i objekat identificuje.

Prostiranje IC-zračenja. Između predajnika i prijemnika IC-zračenja nalazi se medij koji apsorbuje, reflektuje i rasipa deo zračenja. Nastale promene u raspodeli energije u spektru zračenja opisuje jednačina

$$\phi(\lambda) = \phi_0(\lambda)e^{-\alpha_a(\lambda)L}, \quad (21.78)$$

gde su $\phi_0(\lambda)$ intenzitet zračenja na izvoru, $\phi(\lambda)$ intenzitet zračenja nakon prolaska kroz medij koji ima debljinu L i koeficijent apsorpcije $\alpha_a(\lambda)$.

Za izradu IC-senzora neophodno je izučavanje prolaska IC-zračenja kroz vazduh, staklo, kristale, te prozirne plastične materijale. Analiza spektralnog koeficijenta apsorpcije $\alpha_a(\lambda)$ za vazduh pokazuje da on zavisi od molekularne apsorpcije i raspršenosti molekula gasova koji ulaze u sastav atmosfere, te od apsorpcije aerosola. Zbog toga dolazi do selektivne apsorpcije, naročito u području iznad $1\mu\text{m}$. Na primer, ugljendioksid i vodena para su izraziti apsorberi u područjima $\lambda = 3,5 - 5\mu\text{m}$ i $\lambda = 8 - 14\mu\text{m}$. Azot, kiseonik i neutralni gasovi propuštaju IC-zračenje. Ostali gasovi imaju izrazito uske apsorpcijske linije, pa u vazduhu postoje područja, tzv. infracrveni prozori, koji dobro propuštaju IC-zračenje.

Za izradu optičkih sistema u IC-senzorima upotrebljavaju se posebna stakla sa dodatkom oksida teških metala, što omogućava propuštanje zračenja u bliskom i srednjem infracrvenom području. U ovim područjima primenjuju se i prozirni plastični materijali. Za dugotalasno ($\lambda = 8 - 14\mu\text{m}$) i daleko infracrveno područje ($\lambda > 14 - 40\mu\text{m}$) upotrebljavaju se kristalni materijali (od kvarca, germanijuma, silicijuma i dr.). Za izradu reflektirajućih površina upotrebljavaju se metali kao materijali sa velikom refleksijom, pri čemu se presvlače slojem za zaštitu od oksidacije.

Termovizijske metode zasnivaju se na primeni optoelektronskih detektora IC-zračenja, i to kvantnih (fotodioda, CCD, fotootpornik, fotoelement) i termičkih (termoclement, termistor, bolometar – temperaturno osetljivi otpornik, piroelektrik). Zbog dobrih osobina najviše se upotrebljavaju fotootpornici od indijum-antimonida (kao kratkotalasni detektori, $3,5 - 6,6\mu\text{m}$) i živa-kandijum-telurida (kao dugotalasni detektori, $8 - 14\mu\text{m}$), koji imaju vremensku konstantu oko $1\mu\text{s}$.

Izrada kvantnih detektora IC-zračenja nije jednostavna. Kao što je poznato, energija upadnog fotona $E = hv$ mora biti veća od širine zabranjene zone E_g da bi foton bio apsorbovan: $E \geq E_g$. Međutim, energija fotona obrnuto je proporcionalna talasnoj dužini: $E = hv = hc/\lambda$. Zbog toga minimalna energija fotona koja može da proizvede slobodne nosioce nabroja u poluprovodniku određuje maksimalnu talasnu dužinu na koju detektor od takvog poluprovodnika reaguje. Ali, sa povećanjem

energije fotona, tj. sa smanjenjem talasne dužine zračenja, opada sposobnost poluprovodnika da zaustavi fotone i proizvede slobodne nosioce naboja. Izmedu ove dve granice je relativno usko područje osetljivosti poluprovodnika na zračenje.

Tehnologija izrade *Si*-poluprovodnika za vidljivo i veoma blisko IC-područje razrađena je veoma dobro. Tehnologija izrade poluprovodnika za IC-područja većih talasnih dužina još uvek se razvija. Osnovni problem je da se dobije poluprovodnik sa malom širinom zabranjene zone koja će biti manja ili jednaka energiji fotona upadnog zračenja. Na primer, za talasnu dužinu zračenja $3-4 \mu\text{m}$ energija fotona je svega $0,25-0,08 \text{ eV}$. Poluprovodnici sa tako malom širinom zabranjene zone prave se od heterospojeva: binarnih, pseudobinarnih i tercijarnih struktura visoke homogenosti – i to samo za usko područje prijema. Za termovizijsku tehniku važno je napomenuti da su kvantni detektori IC-zračenja zbog male širine zabranjene zone osjetljivi na termički šum, naročito na višim temperaturama, pa se pomoću termostatskog sistema mora obezbediti radna temperatura na kojoj je $h\nu >> kT$. Pored povećanja odnosa signal/šum na taj način postiže se i bolja detektivnost prijemnika. U tabeli 21.7 dat je uporedni pregled osnovnih karakteristika kvantnih i termičkih detektora IC-zračenja koji su najviše zastupljeni u termovizijskoj tehnici.

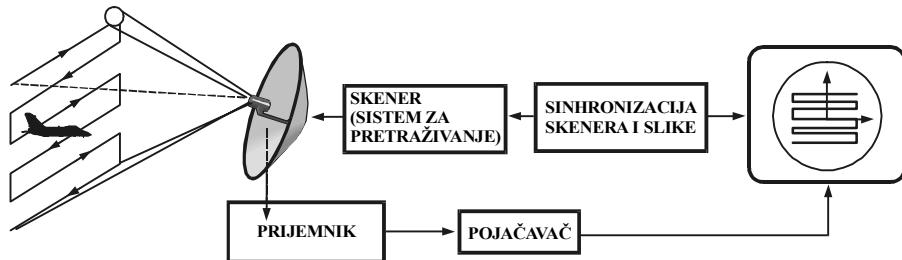
DETEKTORI IC-ZRAČENJA	MATERIJAL	TALASNA DUŽINA $\lambda [\mu\text{m}]$	RADNA TEMPERATURA T [K]	SPECIFIČNA DETEKTIVNOST $D^* [\text{cm Hz}^{-1} \text{ W}^{-1}]$
KVANTNI:				
- FOTODIODE	Si	1	300	$3 \cdot 10^{13}$
	GaAs	0,8	300	10^{12}
	InSb	5	77	$5 \cdot 10^{11}$
- FOTOOPTORNICI	PbS	2,5	300	10^{12}
	HgCdTe	8-12	77	$2 \cdot 10^{11}$
	GaAs	4,2	100	$2 \cdot 10^{12}$
TERMIČKI:				
- BOLOMETAR	Ge		2,15	$8 \cdot 10^{11}$
	Ge		300	$5 \cdot 10^9$
- PIROELEKTRIK	PVF ₂		300	10^8
- TERMOELEMENT	(p)Si/Al		300	10^8

Tabela 21.7. Karakteristike kvantnih i termičkih detektora IC-zračenja

Prvi termovizijski sistemi napravljeni su na principu skeniranja temperaturnog polja. Pomoću optičkog sistema, zračenje objekta fokusira se na senzor. Dobijeni električni signal sinhronizuje se sa uredajem za skeniranje, tako da na ekranu – indikatoru nastaje crno bela ili kolor slika temperaturnog polja objekta. Na slici 21.37 prikazan je sistem za automatsko otkrivanje toplog objekta, na primer aviona. Pretraživanje se vrši uskim snopom po trajektoriji skeniranja, koja može biti

kontinualna kriva ili skup diskretnih tačaka. Pored metroloških i eksploatacionih karakteristika, za termovizijske sisteme sa skeniranjem definišu se i parametri skeniranja: tip trajektorije, period skeniranja, dijametar d mrlje kojom se skenira objekat, koeficijent trenutnog viziranja (nišanjenja) $p = d/R$, gde je R rastojanje između objekta i prijemnika (za dati sistem $p = \text{const}$ jer je $d_1/R_1 = d_2/R_2 = \dots = d_i/R_i = p$), koeficijent integralnog viziranja $P = (L+d)/R$ gde je L dužina trajektorije skeniranja, rezolucija skeniranja $r = P/p$, vreme zadržavanja u jednoj tački temperaturnog polja.

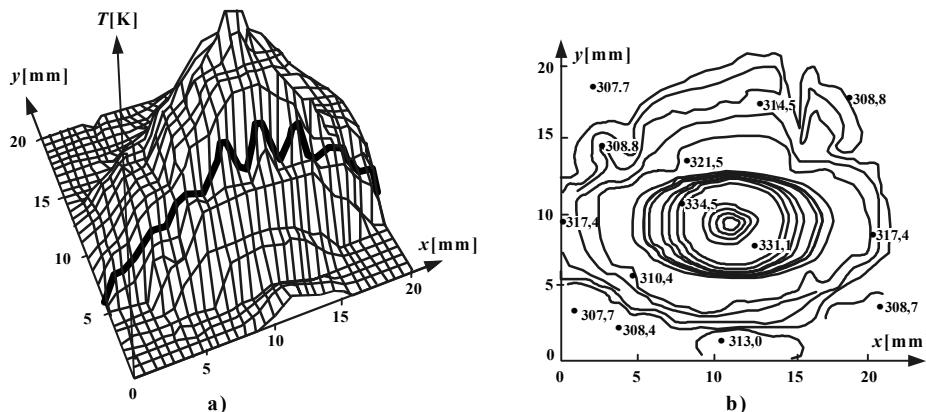
Tačnost merenja temperature je $\pm 0,05 - 0,2\%$, merni opseg od 20°C do



Slika 21.37. Princip termovizijskog sistema sa skeniranjem

nekoliko stotina $^\circ\text{C}$, a temperaturna rezolucija $0,1 - 0,3^\circ\text{C}$ (maksimalno do $0,5^\circ\text{C}$). Poseban problem je merenje nižih temperatura jer tada termički šum na detektoru zračenja ima veliki uticaj. Zato se termostatskim sistemom, na primer pomoću termos-boce sa tečnim azotom, radna temperatura detektora stabišće na 70 K . Pored povećanja odnosa signal/šum, kao što je rečeno, na taj način se dobija i bolja spektralna osetljivost detektora. Skenerska jedinica u termovizijskom sistemu ima izgled kamere i sastoji se, dakle, od mehaničko-optičkog modulatora, detektora zračenja, posude sa tečnim azotom, te kontrolne elektronike i pretpojačavača.

Dobijanje termovizijske slike. Signal iz skenera vodi se na displej, gde se pojačava i obraduje kao video-signal. Na televizijskom ekranu dobija se crno-bela slika, a za sliku u boji potreban je poseban konvertor. Pomoću njega se nijansama

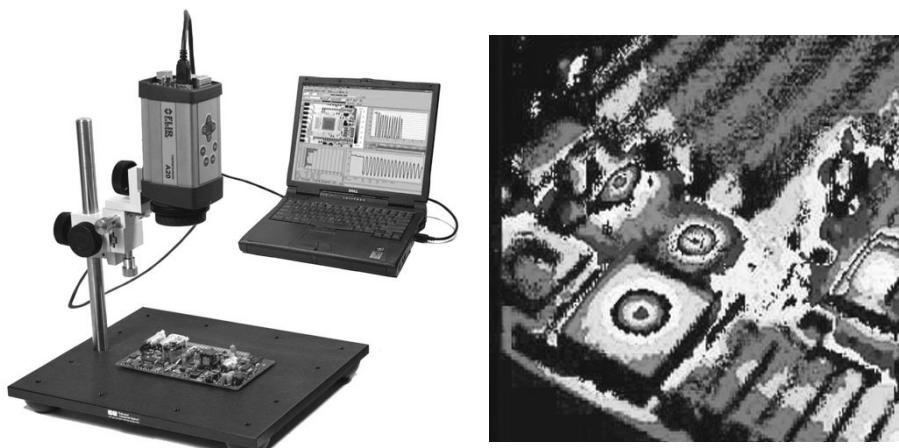


Slika 21.38. Temperaturno polje integralnog kola: a) prostorna raspodela temperature, b) temperaturna slika sa izotermama

crno-bele slike pridružuju odredene boje, pri čemu jednoj nijansi sivog uvek odgovara ista boja. Površine sa istom nijansom (bojom) odgovaraju izotermičkim mestima temperaturnog polja objekta (slika 21.38a).

Koliko će biti izotermi zavisi od konkretnog eksperimenta. Pored predstavljanja temperaturnog polja u obliku izotermi, primenjuje se i prostorno predstavljanje, koje daje vernu informaciju o raspodeli temperature po površini složenog objekta (slika 21.38b). Primena termovizijskog sistema omogućava da se izučavaju i prelazni procesi nestacionarnih temperaturnih polja, na primer, pri uključivanju i isključivanju elektronskog kola, te da se tako procene mesta otkaza.

Za analizu termovizionske slike neophodna je specijalna softverska podrška, koja se sastoji iz većeg skupa programa. Osnovni programi namenjeni su: za manipulaciju mernim podacima skeniranog temperaturnog polja i dobijanje crno-bele ili kolor slike, za dinamičku analizu na osnovu sukcesivnih slika polja, te za analizu spektralnih karakteristika objekata i prenosnih medija (atmosfere). Program za digitalnu obradu slike određuje kontrast slike, izdvaja konture posmatranog temperaturnog polja, pravi različite histograme, vrši filtraciju slike, provodi aritmetičke operacije nad slikom, pravi geometrijske transformacije slike, odstranjuje šum i dr. Termovizijijski sistemi koji imaju mogućnost digitalne obrade slike, pored kamere (skenera) sastoje se od računarske jedinice, monitora i plotera (slika 21.39).



Slika 21.39. Termovizionski sistem za snimanje termičkih slika integralnih kola

21.7.2. Infracrveni senzori temperature sa optičkim vlaknom

Senzori sa fluorescencijom. Senzor temperature sa optičkim vlaknom inicijalno je napravljen za upravljanje mikrotalasnom hipertermijom kod tretmana kancerogenog tkiva. Međutim, termistor ili termoelement ovde ne daje dobre rezultate zato što menja upadno elektromagnetsko zračenje, pa se tkivo neravno- merno greje. Zbog potpune neosetljivosti na elektromagnetsne smetnje, senzor sa optičkim vlaknom pokazao se ovde kao odlično rešenje. Iz istih razloga njegova primena proširena je i

na druge oblasti gde su prisutne takve smetnje, na primer, upotrebljava se za merenje temperature namotaja generatora, transformatora ili motora velike snage.

Kao primarni senzorski element služe prirodni fosfor ili kristal GaAs, jer su izraziti luminifori. Svetlost koju emitiše LED dioda prolazi optičkim vlaknom do primarnog elementa i izaziva njegovu fotoluminiscenciju, tj. dovodi do emitovanja hladne svetlosti nakon apsorbovanja energije fotopobude. Kada je pobuda jedan kratki impuls, intenzitet fotoluminiscenčnog signala opada eksponencijalno a vreme njegovog trajanja proporcionalno je temperaturi T (slika 21.40). Intenzitet izmeren u trenutku t_1 i u trenutku t_2 je:

$$I(t_1) = I_0 \cdot e^{-t_1/\tau(T)} + C \quad (21.79)$$

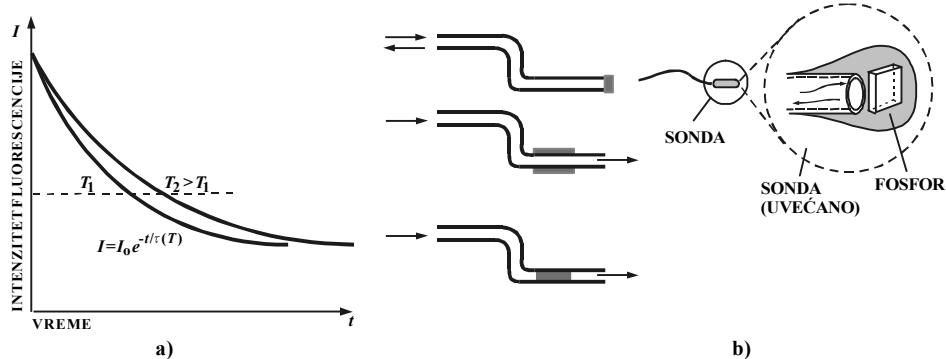
$$I(t_2) = I_0 \cdot e^{-t_2/\tau(T)} + C,$$

gde je C offset zbog uticaja pozadine i ambijentnog zračenja.

Informacija o temperaturi dobija se iz odnosa izmerenih intenziteta I_1/I_2 :

$$\tau(T) = \frac{t_2 - t_1}{\ln I_1/I_2}. \quad (21.80)$$

Fluorescentni signal kreće se kroz vlakno zahvaljujući višestrukoj totalnoj refleksiji koja nastaje zbog većeg indeksa prelamanja u jezgru nego u omotaču vlakna. Ako se komad omotača vlakna zameni luminiforom (GaAlInP, Si staklo dopirano retkim elementima), tada će se narušiti uslovi totalne refleksije i jedan deo zraka će se, zavisno od temperature, probiti i raspršavati u sloju, tako da do prijemnika stiže slabiji intenzitet svetlosti. Treći tip fluorescentnog senzora dobija se kada se jedan deo kabla zameni temperaturno osjetljivim luminiforom (GaAs, CdTe). Promena temperature povećava apsorpciju i smanjuje intenzitet svetlosti na mestu prijema (slika 21.40b).



Slika 21.40. Senzor temperature na bazi fluorescencije: a) odziv na impulsnu pobudu, b) konstrukcija

Merni opseg senzora temperature sa optičkim vlaknom i fluorescentnim primarnim elementom ima merni opseg od -50°C do 250°C , tačnost do $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ i brzinu odziva $0,5\text{s}$. Odlikuje se malim dimenzijama, visokom pouzdanošću i osjetljivošću, otpornošću na fizička oštećenja.

21.7.3. Kvarcni senzor temperature

Termofrekventni metod merenja temperature zasniva se na uticaju temperature na frekvenciju mehaničkih, gasnih ili atomskih rezonatora, zatim na brzinu prostiranja zvučnih i ultrazvučnih oscilacija, te na parametre RC i RL -kola sa termistorima. Statička karakteristika $f(T)$ u opštem slučaju nelinearna je i može se predstaviti u obliku:

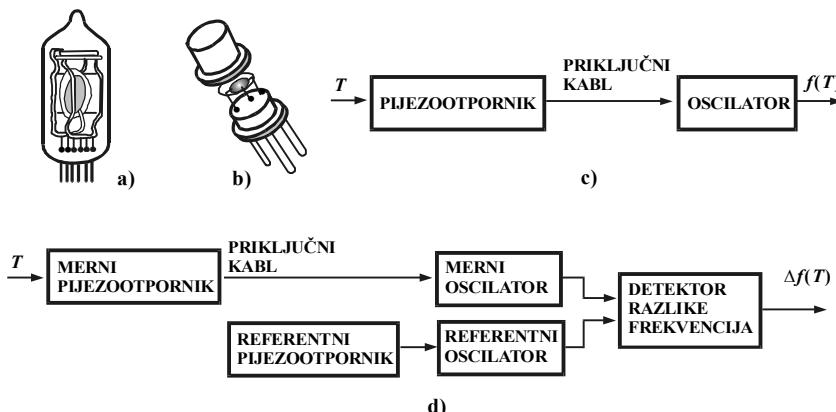
$$f = f_0 [1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2 + \dots], \quad (21.79)$$

gde su: f i f_0 frekvencije na temperaturama T i T_0 , te α , β , ... koeficijenti zavisnosti od fizikalnih i konstrukcionih osobina rezonatora. Za većinu senzora sa ovakom statičkom karakteristikom potrebna je linearizacija.

Kvarcni senzor temperature menja rezonantnu frekvenciju u funkciji temperature. U praksi se primenjuju i pijezokeramički materijali sa linearnom i nelinearnom temperaturno-frekventnom karakteristikom. Prvi su pogodniji jer se kalibracija vrši samo u dve reperne tačke. Linearni koeficijent frekventne zavisnosti kvarcnih senzora je velike vrednosti (do $0,0001 \text{ } 1/\text{K}$), prag osetljivosti je do $10^{-6} - 10^{-4} \text{ K}$ (maksimalno do 10^{-7} K), osetljivost $20 - 3000 \text{ Hz/K}$, linearost $0,02 \text{ } ^\circ\text{C}$ na opsegu $0 - 100 \text{ } ^\circ\text{C}$, frekventni opseg sa nižim radnim frekvencijama je $0,5 - 1 \text{ MHz}$, standardni frekventni opseg je $5 - 30 \text{ MHz}$, a izuzetno $5 - 100 \text{ MHz}$. Vremenska konstanta je relativno velika – od nekoliko desetina sekundi do nekoliko minuta, najviše zbog prelaza topote od zaštitnog oklopa do osetljivog elementa. Merni opseg ograničen je Kirijevom temperaturom pijezomaterijala i iznosi od $-60 \text{ } ^\circ\text{C}$ do $125 \text{ } ^\circ\text{C}$, a maksimalno mogući dijapazon merenja je od $-40 \text{ } ^\circ\text{C}$ do $230 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Dobre osobine kvarcnog senzora temperature su slab uticaj otpora priključnih vodova i šumova zbog frekventno modulisanog izlaza, te visoka tačnost. Loše osobine su veće dimenzije, veća cena i manja tačnost nego kod otporničkih senzora ili termoelemenata.

Način gradnje. Kvarcni (pijezokeramički) senzor temperature smešten je u vakuumskom balonu radi većeg faktora dobrote i sporijeg starenja (slika 21.41a).

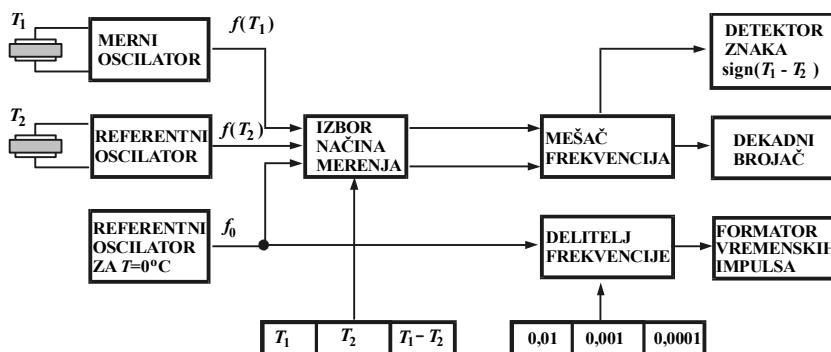


Slika 21.41. Kvarcni senzor temperature: a) kvarc u vakuumskom balonu, b) kvarc u kompaktnom kućištu, c) principijelna merna šema, d) diferencijalna merna šema

Kompaktno kućište omogućava manje dimenzije rezonatora, ali je starenje veće i faktor dobrote manji (slika 21.41b). Hermetički zatvoreni balon može biti napunjen helijumom, koji ima dobru topotnu vodljivost, čime se povećava brzina odziva.

U praksi je najrasprostranjenija struktura sa jednim rezonatorom, sa kojeg se neposredno uzima izlazni signal. Ukoliko radna temperatura ne dozvoljava da se elektronske komponente oscilatora postave uz rezonator, tada se za priključivanje na rastojanje do nekoliko metara upotrebljavaju uvrnuti kablovi, presvučeni materijalom za zaštitu od vlage. U diferencijalnoj šemi primenjuju se dva identična kvarcna rezonatora, pri čemu je jedan od njih izložen delovanju merene temperature, dok je referentni smešten u termostatiranom kućištu sa elektronikom. Signal razlike između ovih dvaju rezonatora ima frekvenciju u opsegu $50 - 100 \text{ kHz}$, što pojednostavljuje prenos i obradu takvog signala.

Digitalni kvarcni senzor temperature. Digitalna verzija senzora sa jednim rezonatorom je, zapravo, digitalni frekvenčmetar, u kome se vreme brojanja merenih impulsa bira u skladu sa statičkom karakteristikom rezonatora. Međutim, zbog nelinearnosti karakteristike i drifta nule primenjuju se složene šeme. Na slici 21.42 prikazan je digitalni kvarcni senzor temperature, kojim se omogućava merenje temperaturu T_1 i T_2 i njihove razlike $T_1 - T_2$. Rezolucija merenja $0,01^\circ\text{C}$, $0,001^\circ\text{C}$ ili $0,0001^\circ\text{C}$ bira se odgovarajućim povećanjem vremena merenja sa $0,1\text{s}$ na 1s , odnosno na 10s . Na mešać frekvencija dolaze signali $f(T_1)$ i $f(T_2)$ sa oba rezonatora ili signal sa jednog rezonatora i signal sa referentnog oscilatora $10 \cdot f_0$. Na ovoj osnovi grade se i višekanalni kvarcni senzori temperature u kombinaciji sa senzorima vlažnosti i pritiska.

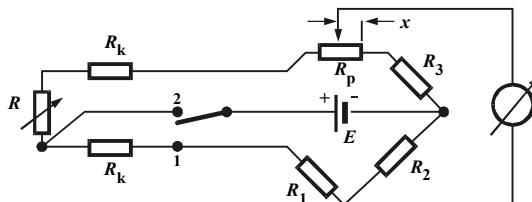


Slika 21.42. Kvarcni digitalni senzor temperature

PITANJA I ZADACI

- 1) Objasniti pojam intenzivnost temperature i problem definisanja etalona temperature.
- 2) Kako se definišu temperaturne skale, a kako termodinamička temperaturna skala? U kakvom su odnosu Celzijusova skala i termodinamička temperaturna skala?

- 3) Navesti karakteristike ekspanzionih i dilatacionih senzora temperature?
- 4) U čemu se sastoji efekat produžnih (kompenzacionih) vodova kojima se termoelementi priključuju na mernu šemu?
- 5) Uporediti metod hardverske sa metodom softverske kompenzacije temperature hladnog kraja.
- 6) Navesti osobine termootporničkih senzora od metalne žice i uporediti ih sa metrološkim karakteristikama termoelemenata.
- 7) Kako je adaptirana potenciometarska šema sa operacionim pojačavačem za priključivanje termistora?
- 8) Navesti osnovne tipove pirometara i fizikalnu osnovu njihovog rada. Posebno razmotriti pojavu sistematske greške pirometara zbog toga što je realni objekat sivo telo.
- 9) Objasniti suštinu pirometarskih metoda detekcije temperaturnih polja.
- 10) Odrediti grešku koja nastaje zbog samozagrejavanja termootporničkog senzora koji meri temperaturu vazduha. Senzor je napravljen od Pt-žice prečnika $d = 0,05 \text{ mm}$ i dužine $l = 10 \text{ mm}$. Koeficijent prenosa topote od žice prema vazduhu je $\alpha = 400 \text{ W/m}^2\text{K}$, struja kroz žicu je $I = 100 \text{ mA}$, a otpor senzora na radnoj temperaturi je $R_t = 0,54 \Omega$. Koji je najprostiji način smanjivanja ove greške?
Rešenje: Iz jednakosti $Q = I^2 R = \alpha S(T_v - T_s) = \alpha S \Delta T$ dobija se $\Delta T = 8,6^\circ\text{C}$.
- 11) Termootpornički senzor priključen je na Vitstonov most pomoću kablova čiji je otpor $R_k = 2,5 \Omega$, tako da se most nalazi u ravnoteži. Kolika će biti promena pokazivanja mosta x ukoliko se zbog temperature okoline otpor priključnih vodova poveća za $0,5 \Omega$ u slučaju kada je prekidač u položaju 1, odnosno kada je prekidač u položaju 2 (slika 21.43)? Objasniti rezultat.
Rešenje: Za $\Delta R_k = 0$ ravnoteža mosta je u položaju $x = 0,250$. U prvom slučaju $\Delta x = 0,0125$ ili $\Delta x/x = 5\%$, a u drugom je $\Delta x = 0,00245$ ili $\Delta x/x = 1,225\%$.



Slika 21.43

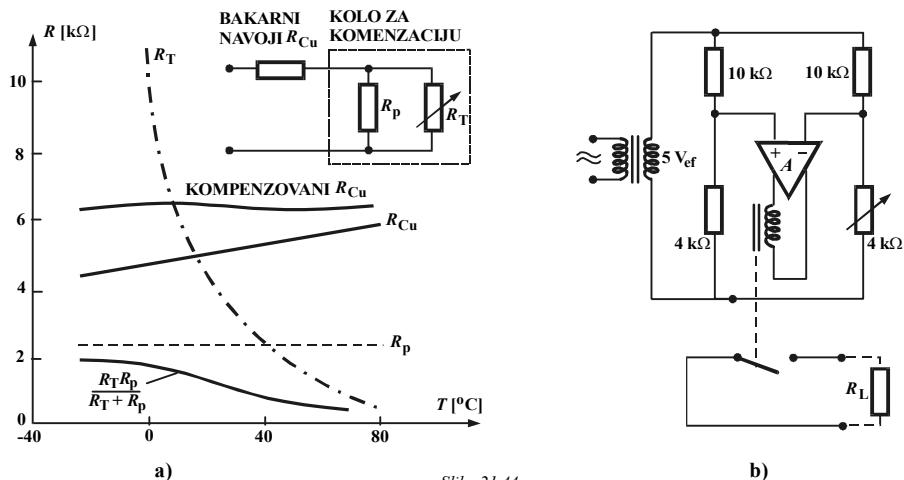
- 12) Otpor navoja od bakarne žice R_{Cu} menja se $0,4\%/1^\circ\text{C}$. Ako je $R_{Cu} = 5\,000 \Omega$ na radnoj radnoj temperaturi od 25°C , kolika je promena u intervalu $0 - 60^\circ\text{C}$. U cilju kompenzacije ove promene u seriju sa navojima dodat je termistor R_T sa fiksnim otporom u paraleli R_p . Pomoću dijagrama temperaturnih promena datih na slici 21.44a izračunati približnu promenu

otpora kola sa uključenom kompenzacijom u intervalu $0 - 60^\circ\text{C}$.

Rešenje: Bez kompenzacije: $4500 - 5700 \Omega$, sa kompenzacijom: $6300 - 6200 \Omega$.

- 13) Objasniti rad kola za automatsku regulaciju temperature na slici 21.44b. Kolo je uravnoteženo na temperaturi 25°C . Ako je temperaturna osetljivost termistora $\alpha = -2,5\%/\text{°C}$, kolika je osetljivost izlaza $\text{V}/\text{°C}$?
Rešenje: $\Delta U_{IZL} = (4/10) \cdot 5\text{V} \cdot 0,025/\text{°C} = 50 \text{mV}/\text{°C}$.

- 14) Između optičkog pirometra, pirometra odnosa i radijacionog pirometra odabratи



Slika 21.44

onaj koji ima najveću osetljivost u intervalu $1000 - 2000 \text{ K}$ pri talasnim dužinama zračenja $\lambda_1 = 0,65 \mu\text{m}$ i $\lambda_2 = 0,45 \mu\text{m}$. Rešenje:

Za optički pirometar je, na osnovu Plankove formule $E(\lambda_1, 2000)/(\lambda_2, 1000) = 63,685$, za pirometar odnosa je $[E(\lambda_2, 1000)]/[E(\lambda_1, 1000)]/[E(\lambda_2, 2000)/E(\lambda_1, 2000)] = 11,7$ i za radiacioni pirometar na osnovu Štefan-Bolcmanovog zakona je $E(2000)/E(1000) = 16$.

LITERATURA

1. OMEGA 2000 complete temperature measurement handbook and encyclopedie, OMEGA ENGINEERING, INC, Connecticut, USA, 1986.
2. Manuel on the use of thermocouples measurement, American Society for Testing and Materials, ASTM, Philadelphia, USA, 1979.
3. V.J. Kožuh: Avtomatičeskoe izmerenie raznosti temperatur, Energija, Moskva, 1969.
4. A.A Sačenko, V.J. Mil'čenko, V.V. Kočan: Izmerenie temperatury datčikami so vstroenymi kalibratorami, Energoatomizdat, Moskva, 1986.

5. R.K. Azimov: *Izmeritel'nye preobrazovateli teplovymi raspredelennymi parametrami*, Energija, Moskva, 1977.
6. M. Popović: *Automatsko upravljanje u velikim zgradama*, Svetlost, Sarajevo, 1988.
7. R.W. Coles: *Semiconductor update*, (Thermometer chip LM3911, Practical Electronic, 1977, p. 497.
8. H.D. Baker, E.A. Ryder, N.H. Baker: *Temperature measurement in engineering*, Vol. 1, Deals with thermocouple techniques for measuring temperature, 1975, OMEGA ENGINEERING.Inc, Connecticut, USA, 1975.
9. H.D. Baker, E.A. Ryder, N.H. Baker: *Temperature measurement in engineering*, Vol. 2, Deals with various methods of measuring law and very high temperatures in liquids, gases, flames and solid bodies, OMEGA ENGINEERING, Inc, Connecticut, USA, 1975.
10. M. Popović: *Prenosna svojstva mjernog pretvarača temperature*, Putevi i dostignuća, br. 3–4, Sarajevo, 1981, str. 95–107.
11. P.E. Gray: *The dynamic behaviour of thermoelectric devices*, Press of The Massachusetts Institute and John Wiley & Sons, New York, 1965.
12. Lj. Draganović: *Tehnička sredstva automatičke*, Elektrotehnički fakultet, Sarajevo, 1983.
13. *Bonded resistance temperature sensors and associated circuitry*, Measurements group, Inc, Tehn. note 506–1, North Carolina, USA, 1984.
14. H.L. Trietley: *Applying thermistors to process measurements and control*, Control Engineering, july 1989, p. 175–179.
15. A.A. Poskačej, E.P. Čubarov: *Optiko-elektronne sistemy izmerenija temperatury*, Energija, Moskva, 1979.
16. D.J. Svet: *Optičeskie metody izmerenija istinnyh temeperatur*, Nauka, Moskva, 1982.
17. V.L. Dragun, S.A. Filatov: *Teplovizionnye sistemy v issledovanijah teplovyh procesov*, Nauka i tehnika, Minsk, 1989.
18. P. Roelf: *Attention focuses on optical fibre biosensors*, Sensor Review, 7(3), p. 127–132.
19. *The ultimate in night vision*, Techn. note SP-IR-02 GTE Special Products, Security Lighting, Boston, USA, 1988.
20. V.F. Kosorotov, L.S. Kremenčugckij, V.B. Samojlov, L.V. Ščedrina: *Piroelektričeskij effekt i ego praktičeskie primenenija*, Naukova dumka, Kijev, 1989.
21. G. Danković: *Nova Medunarodna temperaturna skala*, JUKEM-90, Zb. str. 93–101, Sarajevo, 1990.
22. A. Šurlan: *Elektronski sistemi za obezbjedenje – elektronski uredaji*, Svetlost, Sarajevo, 1989.
23. *Micropower thermocouple cold junction compensator AC1226*, Analog Device, www.analog.com
24. *Temperature handbook*, 12th edition, Calex Electronics Ltd, www.calex.co.uk
25. *Could junction compensated K-thermocouple to digitalconverter*, Maxim Integrated Products, 2002 (www.maxim-ic.com/getds.cfm?ln=en&pk)
26. *An introduction to thermoelectrics*, Tellurex Corporation, www.tellurex.com, 2001.
27. *Principi rada i konstrukcije temperaturnih senzora*: www.tellurex.com, www.omega.com
28. R.M. Stitt, D. Kuns: *Diode-based temperature measurement*, Burr-Brown Application Bulletin, www.datasheetarchive.com
29. *Kompenzacija hladnog kraja*: www.ectron.con, www.analog.com
30. *Dokumentacija proizvodača*: www.temperatures.com/ligvendors.html, www.peltier-info.com
31. *Referentne tabele termoelemenata* :www.weedinstrument.com/industrial/pdfs/Thermocharts.pdf
www.temperatures.com/tctables
32. *IC senzori*: www.national.com/appinfo/tempsensors/products.htm#analog

DODATAK

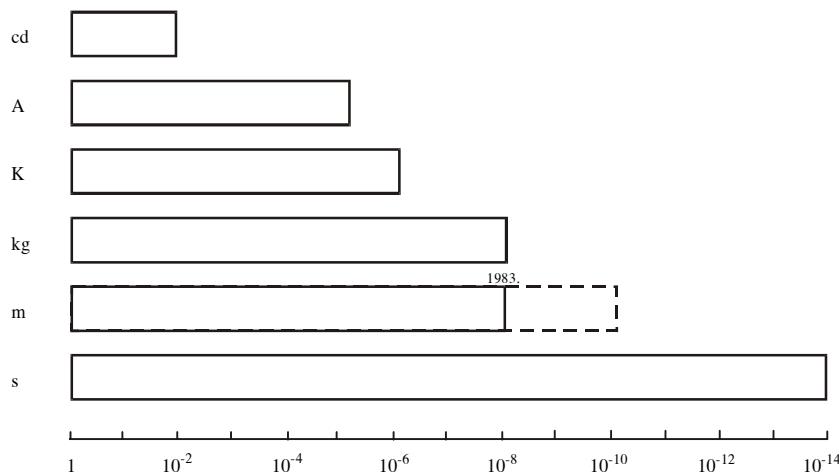
I

DODATAK

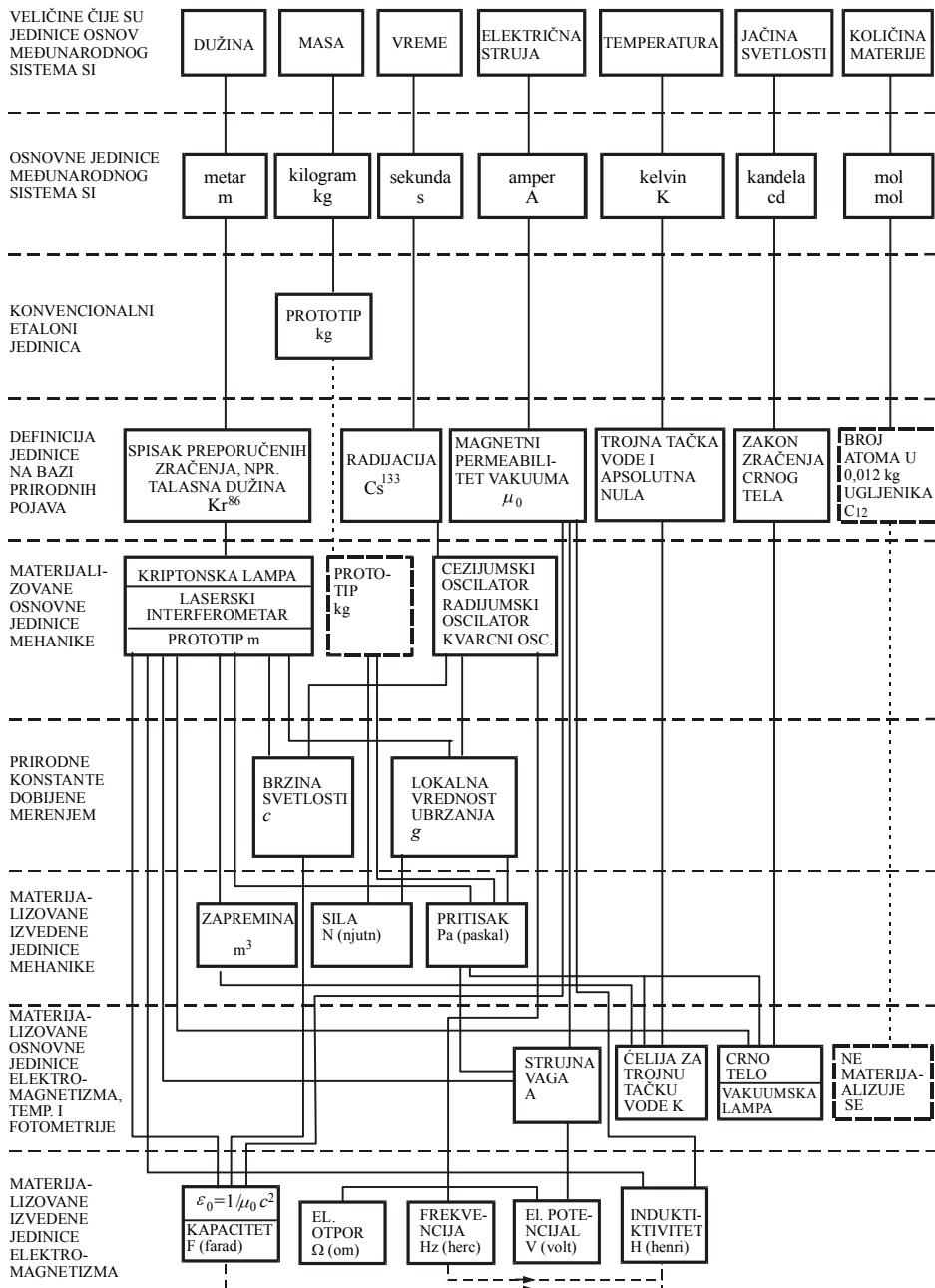
OSNOVNE JEDINICE MEĐUNARODNOG SISTEMA JEDINICA (SI)

JEDINICA	OZNAKA	DEFINICIJA	GODINA USVAJANJA
kilogram	kg	masa jednaka Međunarodnom prototipu kilograma	1889
metar	m	dužina koju svetlost pređe u vakuumu za $1/299\ 792\ 458$ sekunde	1983
sekunda	s	trajanje $9\ 192\ 631\ 770$ perioda radijacije koje odgovara prelazu između dva hiperfina nivoa osnovnog stanja cezijum 133	1967
amper	A	jačina stalne struje koja, prolazeći kroz dva beskonačno duga provodnika zanemarljivog poprečnog preseka, postavljena u vakuumu na rastojanju od 1 m, uzrokuje između tih provodnika silu $2 \cdot 10^{-7}$ N/m	1948
kelvin	K	termodynamička temperatura jednaka 1/273,16 termodynamičke temperature trojne tačke vode	1967
kandela	cd	svetlosna jačina izvora koji u određenom pravcu emituje monohromatsko zračenje frekvencije $540 \cdot 10^{12}$ herca, čija je energetska jačina u tom pravcu 1/683 vata po steradijanu	1979
mol	mol	količina materije sistema koji sadrži onoliko delova ^{*)} koliko ima atoma 0,012 kilograma ugljenika 12	1971
^{*)} delovi mogu biti atomi, molekuli, joni, elektroni, druge čestice ili odredene grupe takvih čestica			

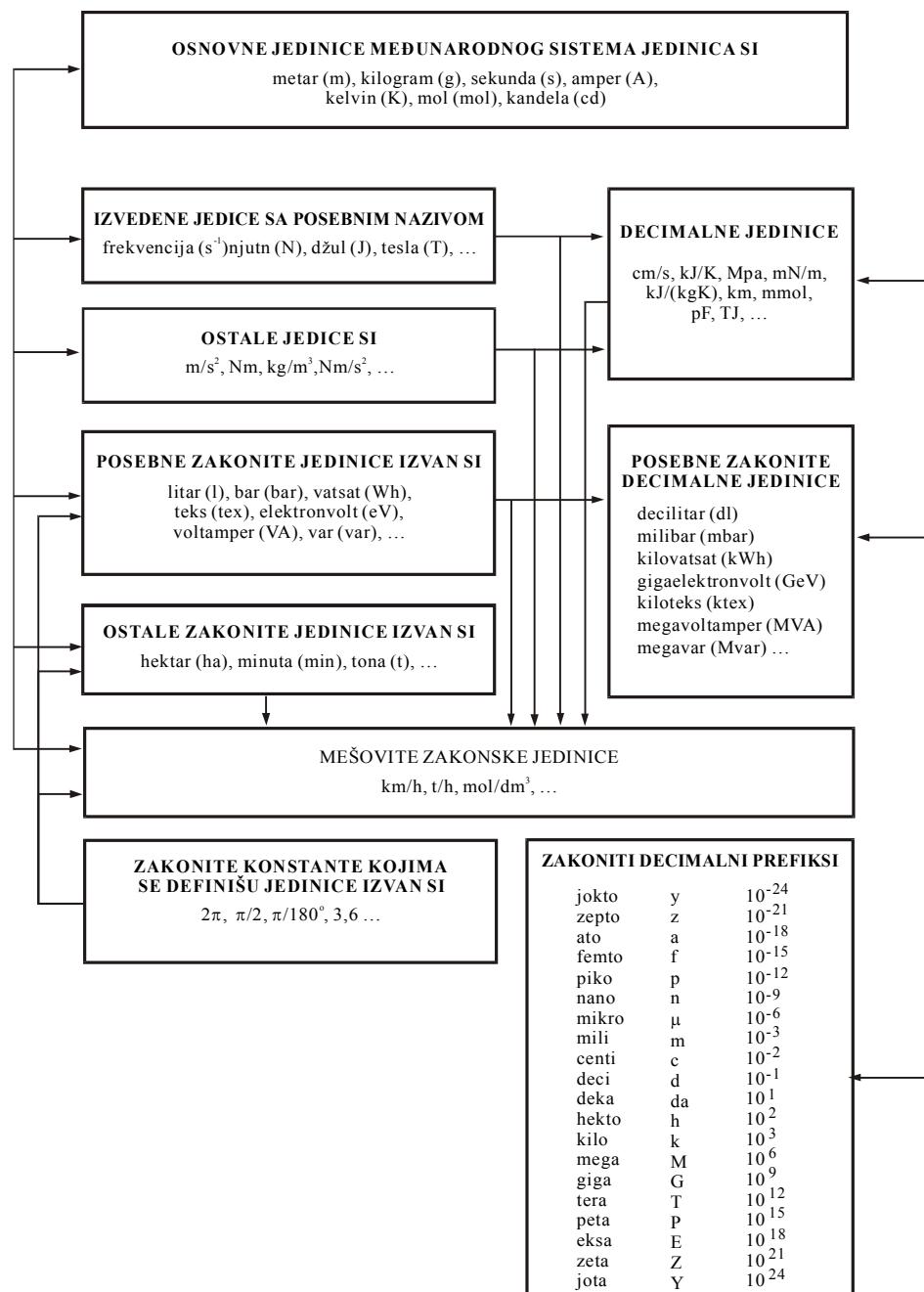
DOSTIGNUTE GRANICE NESIGURNOSTI PRI MATERIJALIZACIJI OSNOVNIH JEDINICA SI



ŠEMA MATERIJALIZACIJE SI



ŠEMA ZAKONSKIH MERNIH JEDINICA U SCG

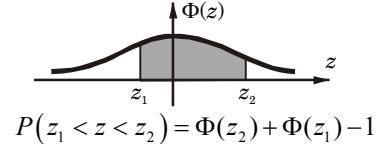
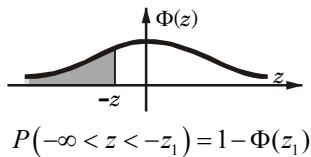
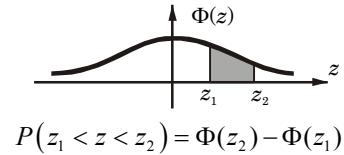
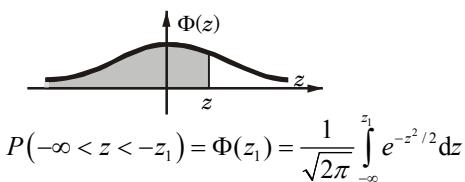


II

DODATAK

TABELA VREDNOSTI INTEGRALA $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-z^2/2} dz$

z	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,5000	0,5040	0,5080	0,5120	0,5160	0,5199	0,5239	0,5279	0,5319	0,5359
0,1	0,5398	0,5438	0,5478	0,5517	0,5557	0,5596	0,0636	0,5675	0,5714	0,5753
0,2	0,5793	0,5832	0,5871	0,5910	0,5948	0,5987	0,6026	0,6064	0,6103	0,6141
0,3	0,6179	0,6217	0,6255	0,6293	0,6331	0,6368	0,6406	0,6443	0,6480	0,6517
0,4	0,6554	0,6551	0,6628	0,6664	0,6700	0,6736	0,6772	0,6808	0,6844	0,6879
0,5	0,6915	0,6950	0,6985	0,7019	0,7054	0,7088	0,7123	0,7157	0,7190	0,7224
0,6	0,7257	0,7291	0,7324	0,7357	0,7389	0,7422	0,7454	0,7486	0,7517	0,7549
0,7	0,7580	0,7611	0,7642	0,7673	0,7703	0,7734	0,7764	0,7794	0,7823	0,7852
0,8	0,7881	0,7910	0,7939	0,7967	0,7995	0,8023	0,8051	0,8078	0,8106	0,8133
0,9	0,8159	0,8186	0,8212	0,8238	0,8264	0,8289	0,8315	0,8340	0,8365	0,8389
1,0	0,8413	0,8438	0,8461	0,8485	0,8508	0,8531	0,8554	0,8577	0,8599	0,8621
1,1	0,8643	0,8665	0,8686	0,8708	0,8729	0,8749	0,8770	0,8790	0,8810	0,8830
1,2	0,8849	0,8869	0,8888	0,8907	0,8925	0,8944	0,8962	0,8980	0,8997	0,90147
1,3	0,90320	0,90490	0,90658	0,90824	0,90988	0,91149	0,91309	0,91466	0,91621	0,91774
1,4	0,91924	0,92073	0,92220	0,92364	0,92507	0,92647	0,92785	0,92922	0,93056	0,93189
1,5	0,93319	0,93448	0,93574	0,93699	0,93822	0,93943	0,94062	0,94179	0,94295	0,94408
1,6	0,94520	0,94630	0,94738	0,94845	0,94950	0,95053	0,95154	0,95254	0,95352	0,95449
1,7	0,95543	0,95637	0,95728	0,95818	0,95907	0,95994	0,96080	0,96104	0,96246	0,96327
1,8	0,96407	0,96485	0,96562	0,96638	0,96712	0,96784	0,96856	0,96926	0,96995	0,97062
1,9	0,97128	0,97193	0,97257	0,97320	0,97381	0,97441	0,97500	0,97558	0,97615	0,97670
2,0	0,97725	0,97778	0,97831	0,97882	0,97932	0,97982	0,98030	0,98077	0,98124	0,98169
2,1	0,98214	0,98257	0,98300	0,98341	0,98382	0,98422	0,98461	0,98500	0,98537	0,98574
2,2	0,98610	0,98645	0,98679	0,98713	0,98745	0,98778	0,98809	0,98840	0,98870	0,98899
2,3	0,98928	0,98956	0,98983	0,99007	0,990358	0,990613	0,990863	0,991106	0,991344	0,991576
2,4	0,991802	0,992024	0,992240	0,992451	0,992656	0,992857	0,993053	0,993244	0,993431	0,993613
2,5	0,993790	0,993963	0,994132	0,994297	0,994457	0,994614	0,994766	0,994915	0,995060	0,995201



III

DODATAK

TABELA DVOSTRANIH ODNOSA JEDINICA PRITiska

JEDINICA	OZNAKA	Pa	bar	mbar	atm	lb/in^2	mm Hg	mm H_2O	mm H_2O
paskal	Pa	1	10^{-5}	10^{-2}	$9,86923 \cdot 10^{-6}$	$1,01972 \cdot 10^{-5}$	$1,45038 \cdot 10^{-4}$	$7,50062 \cdot 10^{-3}$	$0,101972 \cdot 10^{-3}$
bar	bar	10^5	1	103	0,986923	1,01972	14,5038	$750,062 \cdot 10^{-2}$	$10197,2 \cdot 10^{-2}$
milibar	mbar	100	10^{-3}	1	$9,86923 \cdot 10^{-4}$	$1,01972 \cdot 10^{-3}$	$0,0145038$	$0,750062$	$10,1972$
standardna atmosfera	atm	$1,01325 \cdot 10^5$	$1,01325$	$1,01325 \cdot 10^3$	1	1,01323	14,6959	760	10332,3
technička atmosfera	at	9,8066510	0,980665	980,665	0,967841	1	14,2233	735,559	10^4
pound-force per square inch	lbf/in^2	6894,76	$6,89476 \cdot 10^{-2}$	68,9476	0,068046	0,070307	1	51,7149	70,3069
milimetric žive	mm Hg	133,322	$1,33322 \cdot 10^{-2}$	1,33322	$1,31579 \cdot 10^{-3}$	$1,35951 \cdot 10^{-3}$	$1,93368 \cdot 10^{-2}$	1	13,5951
milimetric vodenog stupa	mm H_2O	9,80665	$9,80665 \cdot 10^{-5}$	$9,80665 \cdot 10^{-2}$	$9,67841 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}	$1,42233 \cdot 10^{-3}$	$7,35559 \cdot 10^{-2}$	1
inč vodenog stupa	in H_2O	249,089	$2,49089 \cdot 10^{-3}$	2,49089	$2,45831 \cdot 10^{-3}$	$2,54 \cdot 10^{-3}$	$3,61272 \cdot 10^{-2}$	1,86832	25,4
inč živog stupa	in Hg	3386,39	$3,38639 \cdot 10^{-2}$	33,8639	$3,34211 \cdot 10^{-2}$	$3,45316 \cdot 10^{-2}$	$0,491154$	25,4	$3,45316 \cdot 10^2$
									13,5951
									1

IV

DODATAK

TABLICA TERMOELEMENATA:

TIP E (kromel/konstantan)
 TIP J (železo/konstantan)
 TIP K (kromel/alumel)
 TIP R (platina-13%rodij/platina)
 TIP S (platina-10%rodij/platina)
 TIP T (bakar/konstantan)

TEMP. [°C]	TIP E [mV]	TIP J [mV]	TIP K [mV]	TIP R [mV]	TIP S [mV]	TIP T [mV]
-270	-9,835		-6,458			-6,258
-260	-9,797		-6,441			-6,232
-250	-9,718		-6,404			-6,180
-240	-9,604		-6,344			-6,105
-230	-9,455		-6,262			-6,007
-220	-9,274		6,158			-5,888
-210	-9,063	-8,095	-6,035			-5,753
-200	-8,825	-7,890	-5,891			-5,603
-190	-8,561	-7,659	-5,730			-5,439
-180	-8,273	-7,403	-5,550			-5,261
-170	-7,963	-7,123	-5,354			-5,070
-160	7,632	-6,821	-5,141			-4,865
-150	-7,279	-6,500	4,913			-4,648
-140	-6,907	-6,159	-4,669			-4,419
-130	-6,516	-5,801	-4,411			-4,177
-120	-6,107	-5,426	-4,138			-3,923
-110	-5,681	-5,037	-3,852			-3,657
-100	-5,237	-4,633	-3,554			-3,379
-90	-4,777	-4,215	-3,243			-3,089
-80	-4,302	-3,786	-2,920			-2,788
-70	-3,811	-3,344	-2,587			-2,476
-60	-3,306	-2,893	-2,243			-2,153
-50	-2,787	-2,431	-1,889	-0,226	-0,236	-1,819
-40	-2,255	-1,961	-1,527	-0,188	-0,194	-1,475
-30	-1,709	-1,482	-1,156	-0,145	-0,150	-1,121
-20	-1,152	-0,995	-0,778	-0,100	-0,103	-0,757
-10	-0,582	-0,501	-0,392	-0,051	-0,053	-0,383
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

TEMP. [°C]	TIP E [mV]	TIP J [mV]	TIP K [mV]	TIP R [mV]	TIP S [mV]	TIP T [mV]
10	0,591	0,507	0,397	0,054	0,055	0,391
20	1,192	1,019	0,798	0,111	0,113	0,790
30	1,801	1,537	1,203	0,171	0,173	1,196
40	2,420	2,059	1,612	0,232	0,235	1,612
50	3,048	2,585	2,023	0,296	0,299	2,036
60	3,685	3,116	2,436	0,363	0,365	2,468
70	4,330	3,650	2,851	0,431	0,433	2,909
80	4,985	4,187	3,267	0,501	0,502	3,358
90	5,648	4,726	3,682	0,573	0,573	3,814
100	6,319	5,269	4,096	0,647	0,646	4,279
110	6,998	5,814	4,509	0,723	0,720	4,750
120	7,685	6,360	4,920	0,800	0,795	5,228
130	8,379	6,909	5,328	0,879	0,872	5,714
140	9,081	7,459	5,735	0,959	0,950	6,206
150	9,789	8,010	6,138	1,041	1,029	6,704
160	10,503	8,562	6,540	1,124	1,110	7,209
170	11,224	9,115	6,941	1,208	1,191	7,720
180	11,951	9,669	7,340	1,294	1,273	8,237
190	12,684	10,224	7,739	1,381	1,357	8,759
200	13,421	10,779	8,138	1,469	1,441	9,288
210	14,164	11,334	8,539	1,558	1,526	9,822
220	14,912	11,889	8,940	1,648	1,612	10,362
230	15,664	12,445	9,343	1,739	1,698	10,907
240	16,420	13,000	9,747	1,831	1,786	11,458
250	17,181	13,555	10,153	1,923	1,874	12,013
260	17,945	14,110	10,561	2,017	1,962	12,574
270	18,713	14,665	10,971	2,112	2,052	13,139
280	19,484	15,219	11,382	2,207	2,141	13,709
290	20,259	15,773	11,795	2,304	2,232	14,283
300	21,036	16,327	12,209	2,401	2,323	14,862
310	21,817	16,881	12,624	2,498	2,415	15,445
320	22,600	17,434	13,040	2,597	2,507	16,032
330	23,386	17,986	13,457	2,696	2,599	16,624
340	24,174	18,538	13,874	2,796	2,692	17,219
350	24,964	19,090	14,293	2,896	2,786	17,819
360	25,757	19,642	14,713	2,997	2,880	18,422
370	26,552	20,194	15,133	3,099	2,974	19,030
380	27,348	20,745	15,554	3,201	3,069	19,641
390	28,146	21,297	15,975	3,304	3,164	20,255
400	28,946	21,848	16,397	3,408	3,259	20,872

TEMP. [°C]	TIP E [mV]	TIP J [mV]	TIP K [mV]	TIP R [mV]	TIP S [mV]	TIP T [mV]
410	29,747	22,400	16,820	3,512	3,355	
420	30,550	22,952	17,243	3,616	3,451	
430	31,354	23,504	17,667	3,721	3,548	
440	32,159	24,057	18,091	3,827	3,545	
450	32,965	24,610	18,516	3,933	3,742	
460	33,772	25,164	18,941	4,040	3,840	
470	34,579	25,720	19,366	4,147	3,938	
480	35,387	26,276	19,792	4,255	4,036	
490	36,196	26,834	20,218	4,363	4,134	
500	37,005	27,393	20,644	4,471	4,233	
510	37,815	27,953	21,071	4,580	4,332	
520	38,624	28,516	21,497	4,690	4,432	
530	39,434	29,080	21,924	4,800	4,532	
540	40,243	29,647	22,350	4,910	4,632	
550	41,053	30,216	22,776	5,021	4,732	
560	41,862	30,788	23,203	5,133	4,833	
570	42,671	31,362	23,629	5,245	4,934	
580	43,479	31,939	24,055	5,357	5,035	
590	44,286	32,519	24,480	5,470	5,137	
600	45,093	33,102	24,905	5,583	5,239	
610	45,900	33,689	25,330	5,697	5,341	
620	46,705	34,279	25,755	5,812	5,443	
630	47,509	34,873	26,179	5,926	5,546	
640	48,313	35,470	26,602	6,041	5,649	
650	49,116	36,071	27,025	6,157	5,753	
660	49,917	36,675	27,447	6,273	5,857	
670	50,718	37,284	27,869	6,390	5,961	
680	51,517	37,896	28,289	6,507	6,065	
690	52,315	38,512	28,710	6,625	6,170	
700	53,112	39,132	29,129	6,743	6,275	
710	53,908	39,755	29,548	6,861	6,381	
720	54,703	40,382	29,965	6,980	6,486	
730	55,497	41,012	30,382	7,100	6,593	
740	56,289	41,645	30,798	7,220	6,699	
750	57,080	42,281	31,213	7,340	6,806	
760	57,870	42,919	31,628	7,461	6,913	
770	58,659		32,041	7,583	7,020	
780	59,446		32,453	7,705	7,128	
790	60,232		32,865	7,827	7,236	
800	61,017		33,275	7,950	7,345	

TEMP. [°C]	TIP E [mV]	TIP J [mV]	TIP K [mV]	TIP R [mV]	TIP S [mV]	TIP T [mV]
810	61,801		33,685	8,073	7,454	
820	62,583		34,093	8,197	7,563	
830	63,364		34,501	8,321	7,673	
840	64,144		34,908	8,446	7,783	
850	64,922		35,313	8,571	7,893	
860	65,698		35,718	8,697	8,003	
870	66,473		36,121	8,823	8,114	
880	67,246		36,524	8,950	8,226	
890	68,017		36,925	9,077	8,337	
900	68,787		37,326	9,205	8,449	
910	69,554		37,725	9,333	8,562	
920	70,319		38,124	9,461	8,674	
930	71,082		38,522	9,590	8,787	
940	71,844		38,918	9,720	8,900	
950	72,603		39,314	9,850	9,014	
960	73,360		39,708	9,980	9,128	
970	74,115		40,101	10,111	9,242	
980	74,869		40,494	10,242	9,357	
990	75,621		40,885	10,374	9,472	
1000	76,373		41,276	10,506	9,587	
1010			41,665	10,638	9,703	
1020			42,053	10,771	9,819	
1030			42,440	10,905	9,935	
1040			42,826	11,039	10,051	
1050			43,211	11,173	10,168	
1060			43,595	11,307	10,285	
1070			43,978	11,442	10,403	
1080			44,359	11,578	10,520	
1090			44,740	11,714	10,638	
1100			45,119	11,850	10,757	
1110			45,497	11,986	10,875	
1120			45,873	12,123	10,994	
1130			46,249	12,260	11,113	
1140			46,623	12,397	11,232	
1150			46,995	12,535	11,351	
1160			47,367	12,673	11,471	
1170			47,737	12,812	11,590	
1180			48,105	12,950	11,710	
1190			48,473	13,089	11,830	
1200			48,838	13,228	11,951	

TEMP. [°C]	TIP E [mV]	TIP J [mV]	TIP K [mV]	TIP R [mV]	TIP S [mV]	TIP T [mV]
1210			49,202	13,367	12,071	
1220			49,565	13,507	12,191	
1230			49,926	13,646	12,312	
1240			50,286	13,786	12,433	
1250			50,644	13,926	12,554	
1260			51,000	14,066	12,675	
1270			51,355	14,207	12,796	
1280			51,708	14,347	12,917	
1290			52,060	14,488	13,038	
1300			52,410	14,629	13,159	
1310			52,759	14,770	13,280	
1320			53,106	14,911	13,402	
1330			53,451	15,052	13,523	
1340			53,795	15,193	13,644	
1350			54,138	15,334	13,766	
1360			54,479	15,475	13,887	
1370			54,819	15,616	14,009	
1380				15,758	14,130	
1390				15,899	14,251	
1400				16,040	14,373	
1410				16,181	14,494	
1420				16,323	14,615	
1430				16,464	14,736	
1440				16,605	14,857	
1450				16,746	14,978	
1460				16,887	15,099	
1470				17,028	15,220	
1480				17,169	15,341	
1490				17,310	15,461	
1500				17,451	15,582	
1510				17,591	15,702	
1520				17,732	15,822	
1530				17,872	15,942	
1540				18,012	16,062	
1550				18,152	16,182	
1560				18,292	16,301	
1570				18,431	16,420	
1580				18,571	16,539	
1590				18,710	16,658	
1600				18,849	16,777	

TEMP. [°C]	TIP E [mV]	TIP J [mV]	TIP K [mV]	TIP R [mV]	TIP S [mV]	TIP T [mV]
1610				18,988	16,895	
1620				19,126	17,013	
1630				19,264	17,131	
1640				19,402	17,249	
1650				19,540	17,366	
1660				19,677	17,483	
1670				19,814	17,600	
1680				19,951	17,717	
1690				20,087	17,832	
1700				20,222	17,947	
1710				20,356	18,061	
1720				20,488	18,174	
1730				20,620	18,285	
1740				20,749	18,395	
1750				20,877	18,503	
1760				21,003	18,609	

SPISAK OZNAKA

OSNOVNE OZNAKE

<i>a, b</i>	konstante	<i>I</i>	jačina struje, A
<i>c</i>	specifični toplotni kapacitet, J/kgK ; brzina prostiranja elektromagnetskog talasa u vakuumu $299\ 792\ 458\ m/s$	<i>J</i>	moment inercije, $kg\ m^2$
<i>d</i>	razmak (prečnik, debljina), m	<i>K</i>	koeficijent statičkog prenosa
<i>e</i>	greška (razlika dveju vrednosti)	<i>L</i>	induktivnost, H; dužina, m
<i>f</i>	frekvencija, Hz	<i>O</i>	opseg
<i>g</i>	ubrzanje Zemljine teže $9,81\ m/s^2$	<i>P</i>	snaga, W; verovatnoća, %; pouzdanost, %
<i>h</i>	nivo, m; koeficijent prelaza toplote, W/m^2K ; Plankova konstanta $6,6260755 \cdot 10^{-34}\ Js$	<i>Q</i>	protok: maseni kg/s , volumenski m^3/s ; nepouzdanost, %
<i>j</i>	imaginarna jedinica	<i>P</i>	snaga, W; verovatnoća, %; pouzdanost, %
<i>j</i>	koeficijent statičkog prenosa (pojačanje); Bolzmanova konstanta $1,380658 \cdot 10^{-23}\ J/K$	<i>S</i>	površina, m^2 ; osetljivost; suma
<i>l</i>	rastojanje (dužina), m	<i>T</i>	termodinamička temperatura, K; vremenska konstanta, s; period, s mehaničko naprezanje, Pa, N/m^2
<i>m</i>	masa, kg	<i>U</i>	istosmerni napon, V
<i>n</i>	prirodan broj	<i>V</i>	volumen, m^3
<i>p</i>	pritisak, Pa	<i>W</i>	toplotski tok, W
<i>q</i>	električni naboј, C	α, β, γ	koeficijenti (konstante); ugao, ° ili rad
<i>s</i>	kompleksna promenljiva Laplasa; put, m	δ	debljina (zazor), m; promena (varijacija)
<i>t</i>	temperatura, °C; vreme, s	η	dinamička viskoznost, Nm^2s , $Pa \cdot s$
<i>u</i>	promenljivi napon $u=u(t)$, V	ε	dielektrična konstanta, F/m; deforma- cija, m/m; koeficijent emisije (sivila), rad/s
<i>v</i>	brzina, m/s	λ	talasna dužina, m; intenzitet otkaza, s^{-1}
<i>w</i>	ugaona brzina, rad/s; kružna frekvencija, Hz, rad/s	μ	magnetni permeabilitet, H/m ; Poasonov broj
<i>x, y, z</i>	koordinate	ν	kinemska viskoznost, m^2/s
<i>A</i>	pojačanje, amplituda	θ	temperatura, K
<i>B</i>	magnetna indukcija, T	ρ	specifična otpornost, Ωm , gustina, kg/m^3
<i>C</i>	kapacitivnost, F	σ	normalno mehaničko naprezanje, Pa, N/m^2 ; Štefan-Bolzmanova konstanta $5,67051 \cdot 10^{-8} W/K^4 m^2$
<i>D</i>	detektivnost, W^{-1}	τ	vreme (vremenska konstanta), s; tangencijalno naprezanje, Pa, N/m^2
<i>E</i>	energija zračenja, J Jangov modul elastičnosti, N/m^3	ξ	koeficijent prigušenja
<i>F</i>	sila, N	ψ	gustina verovatnoće
<i>G</i>	greška, %	Φ	fluks zračenja, W
<i>H</i>	histerezis, %		

INDEKSI

a	aditivni	v	volumenski
g	granični	din	dinamički
i	redni broj	ems	elektromotorna sila
k	kontrolni	lok	lokalni
m	maseni; multiplikativni	max	maksimalni
n	nelinearni; prirodni broj	priv	prividni
o	stvarni (stacionarni, nominalni)	ref	referentni
p	periodični, preventivni	const	konstanta
r	relativni	1,2,3	redni broj

SIMBOLI

\approx	približno jednako
\neq	nije jednako
$[]$	jedinica mere
$\{ \}$	brojna vrednost

Δ	prirast (inkrement) veličine
Σ	suma
∂	parcijalni izvod

SKRAĆENICE

A/D	Analog-to-Digital Conversion	D/A	Digital-to-Analog Conversion
ALE	Adress Latch Enable	DIL	Dual-in-Line
ANSI	American National Standards Institute	EOC	End of Conversion
APD	Avalanche Photodiode	EPROM	Erasable Praogrammable Read-Only Memory
ASCII	American Standard Code for Information Interchange	FET	Field-Effect Transistor
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures	FFT	Fast Fourier Transform
BCD	Binary-Coded Decimal	IC	Integrated Circuits
CCD	Charge Coupled Devices	IEC	International Electrotechnical Commision
CCDM	Comité Consultatif pour la Définition du Metre	IR	Infrared
CCDS	Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde	IRLED	Infrared Light Emitting Diode
CCE	ComitéConsultatif d'Electricité	ISO	International Organisation for Standardization
CCEMRI	Comité Consultatif pour la Etalons de Mesure des Rayonments Ionisation	ITS	International Temperature Scale
CCM	Comité Consultatif pour la Définition pour la Madde grandeurs apartantées	KGH	Klimatizacija Grejanje Hlađenje
CCPR	Comité Consultatif dé Photométrie	LCC	Leadless Chip Carier
CCT	Comité Consultatif dé Thermométrie	LCD	Liquid Crystal Display
CCU	Comité Consultatif des Unites	LD	Laser Diode
CGPM	Conference Generale des Poids et Mesures	LDA	Laser Dopler Anemometer
		LED	Light Emitting Diode
		LSB	Least Significant Bit
		LVDT	Linear Variable Differential Transformer

MOSFET	Metal-Oxide/Semiconductor Field-Effect Transistor	PSD	Position Sensitive Detector
MSB	Master Significant Bit	PTAT	Proportional to the Absolute Temperature
NEP	Noise Equivalent Power	PTC	Positive Temperature Coefficient
NTC	Negative Temperature Coefficient	RAM	Random Acces Memory
OIML	Organisation International de Metrologie Legale	S/H	Sample-And-Hold
PCM	Pulse Code Modulation	SI	System International d'Unite
PWM	Pulse With Modulatioon	SOC	Start of Conversion
PIN	p-intrinsic photodiode	STG	Self Temperature Compensation
		TG	Temperature Gage

INDEKS POJMOVA

A

- AC1226 kompenzator hladnog kraja [426](#)
- AD590 temperaturni senzor [453](#)
- AD654 U/f konvertor [358](#)
- AD7545 D/A konvertor [226](#)
- AD0809 A/D konvertor [228](#)
- AD1154 S/H kolo [224](#)
- AD7824 A/D pretvarač [228](#)
- Aditivna greška [24](#)
- Akcelerometri [296](#)
 - digitalni [301](#)
 - inercioni [297, 298](#)
 - kompenzacioni [299](#)
 - kontaktni [296](#)
 - pijezoelektrični [305](#)
 - poluprovodnički [300](#)
- Akcelerometarski senzori sile [316](#)
- Aktivni senzori [75, 461](#)
- Akvizicija [206, 222, 457](#)
- Amplitudna modulacija [149](#)
- Analizator spektra [116](#)
- Analogno-digitalni pretvarači [226](#)
 - delta-sigma [230](#)
 - integracioni [228](#)
 - paralelni [229](#)
 - sa pretvaranjem napona u frekvenciju [229](#)
 - sa sukcesivnom aproksinamacijom [227](#)
- Antena [308](#)
- Apsolutna greška [23](#)
- Apsolutni enkoder [234](#)
- Apsolutno i relativno merenje dužine [241](#)
- Astabilni multivibrator [174](#)
- Autogeneratorski efekti [79](#)
- Automatizirani informacioni sistemi [16](#)
- Automatska
 - kalibracija [235](#)
 - korekcija
 - statičke tačnosti [108](#)
 - dinamičke tačnosti [114](#)
 - kompenzacija mernog mosta [131](#)
- Autometrija [8](#)

B

- Balansirani prenos [220](#)
- BCD-kod [232](#)
- Bezotkazni rad [59](#)
- Beskontaktni senzori momenta [322](#)
- Bežični
 - LED displej [50](#)
 - dataloger [223](#)
- Binarni kodovi [232](#)
- Bimetalični senzor [420](#)
- Bipolarni ulaz A/D konvertora [226](#)
- Bolometar [192, 457](#)
- Proj merenja i tačnost [31](#)
- Brojna
 - jednačina [10](#)
 - vrednost [10](#)

C

- Centrifugalni senzor [283](#)
- Cilindrični kapacitivni senzor [144, 153](#)
- CNY36 optokappler [293](#)
- CNY70 optokappler [203](#)
- Cilj merenja [21](#)

D

- Data logger [52, 223](#)
- Davač [72](#)
- Deflektori optičkog zračenja [181](#)
- Dekoder [52](#)
- Delta-sigma konvertor [230](#)
- Demultiplexer [222](#)
- Detektivnost [188](#)
- Detektor nule [293, 323, 389](#)
- Detekcija
 - pokretnih ciljeva [305](#)
 - smera kretanja [267, 294, 306](#)
- Diferencijalna metoda merenja [13](#)
- Dinamička greška senzora [107](#)
 - u frekventnom području [108](#)

- Digitalni senzori [206](#)
 direktni [207](#)
 kompenzacionog tipa [207](#)
 kvarcni senzor temperature [467](#)
 momenta [324](#)
 pritiska [354](#)
 temperature [436](#)
 protoka [236, 408](#)
- Digitalni termometar [436, 453](#)
 Digitalno-analogni množač [225](#)
 Digitalno-analogni pretvarači [224](#)
 Digitalizacija [208](#)
 vremensko-impulsna [209](#)
 frekventno-impulsna [209](#)
 prostornih parametara [209](#)
- Dijagram fizikalnih efekata [80](#)
- Dinamička greška
 analognog senzora [107](#)
 digitalnog senzora [211](#)
 u frekventnom području [108](#)
- Dinamičke karakteristike [93](#)
 u vremenskoj oblasti [93](#)
 u frekventnoj oblasti [99](#)
- Dinamika termoelementa [431](#)
- Dinamometarski metod [321](#)
- Dioda kao senzor temperature [447](#)
 merne šeme [449](#)
 tranzistorska dioda [449](#)
- Distancionalno merenje otpora [128](#)
- Doplerov senzor
 radarski [305](#)
 protoka [395](#)
 laserski anemometar [405](#)
- Drift
 nule [87, 342](#)
 osetljivosti [87, 342](#)
- DS1621 digitalni senzor temperature [453](#)
- Dužina [241](#)
- Dvomorfnii pijezelektrični senzori [170](#)
- E**
- Efekt
 akustičkooptički [181](#)
 dinamičkog rasejavanja [178, 181](#)
 Doplerov [78, 305, 395, 405](#)
 Faradejev magnetooptički [77](#)
 fotoprovodni [77, 184, 185, 199](#)
 fotonaponski [77, 184, 185, 199](#)
 Holov [77, 79, 295](#)
 Kerov elektrooptički [77, 180](#)
 Koton-Mutonov magnetooptički [77, 181](#)
 Peltijeov termoelektrični [77, 421](#)
 pijezelektrični [77, 162](#)
 pirolektrični [77, 165, 186, 193](#)
 Pokelsov elektrooptički [77, 180](#)
 Tomsonov termoelektrični [77, 421](#)
 Voltin elektrohemijiski [79](#)
 Zebekov termoelektrični [77, 421](#)
- Zemanov magnetooptički [77](#)
 Ekonomsko-tehnički parametri [92](#)
 Ekspanzioni senzori temperature [417](#)
 Ekvivalentna snaga šuma [188](#)
 Elastični senzori sile [317](#)
 Elektrodinamički indukcionii senzori [158](#)
 Elektromagnetični senzori [154](#)
 pomeraja [247](#)
 pritiska [332](#)
 reluktantni [289](#)
- Enkoder [230, 266](#)
- Entropija [163, 214](#)
- F**
- Faktor osetljivosti tenzoelementa [341](#)
- FFT [116](#)
- Fizikalni principi [76](#)
 Fizikalna veličina [9, 21](#)
- Fluorescencija [465](#)
 Fluorescentni senzori [465](#)
- Formati displeja [48](#)
- Fotoefekt [74, 184](#)
- Fotoelement [183, 186](#)
- Fotodioda [183, 185, 198, 199](#)
- Fotomultiplikator [183](#)
- Fotopotenciometar [190](#)
- Fototranzistor [196, 203](#)
- Frekventne karakteristike [100, 101](#)
 eksperimentalno određivanje [102](#)
- F/U pretvarač [136, 293](#)
- Funkcija raspodele [65](#)
- Funkcije frekventnog odziva [99](#)
- Funkcija raspodele otkaza [61, 65](#)
- Funkcionalna pouzdanost [60](#)
- G**
- Galvanometarski pisači [53](#)
- Gasni otpornički senzori [125](#)
- Grafička prezentacija rezultata [41](#)
- Grafički indikatori [48](#)
- Grafički
 displej [49](#)
 priček frekventnih karakteristika [99](#)
- Granična greška [32, 34](#)
- Granice nepouzdanosti rezultata [34](#)
- Grejov kod [233](#)
- Greška
 kvantovanja [210](#)
 parametarskih merenja [35](#)
- H**
- Hidrostatski senzori [364](#)
- Histerezis [88](#)
- Histogram [26](#)
- Hladni kraj [423](#)

Holografski senzor [263](#)

Hologram [263](#)

Holov senzor [295](#)

Holografski interferometar [263, 408](#)

I

I-metod [128](#)

Infracrveni senzori [454](#)

IC4530 dekoder [52](#)

ICL8038 generator funkcija [151](#)

Indikatori i displeji [47](#)

Indikatorski selsin [273](#)

Indukcioni senzori [158, 392](#)

Induktivni senzori [154](#)

Induktosin

linearni [256](#)

rotacioni [274](#)

Informacioni kapacitet senzora [213](#)

Infracrvena termovizija [460](#)

Inkrementalni enkoderi [266](#)

Instrumentacioni pojačavač [135, 353, 358](#)

Integral Laplasa [27](#)

Integrисани

kompenzatori hladnog kraja [426](#)

senzori temperature [451](#)

Integrodiferencijator [280](#)

Intenzitet otkaza [62, 65, 67](#)

Interferometar

laserski [261](#)

rendgenski [263](#)

Internacionalna temperaturna skala [415](#)

Interpolacija [14, 85, 86](#)

Iteraciona korekcija greški [112](#)

ITS-90 [415](#)

J

Jedinice SI sistema [11, 475, 476](#)

Jedinica mere [10](#)

Jednačine metrologije [9](#)

Jednačina Dusena [438](#)

Jednomorfni pijezelektrični senzori [170](#)

K

Kalibracija [28](#)

Kalibraciona kriva [29](#)

Karakteristična impedansa [220, 370](#)

Karakteristike

digitalnih senzora [210](#)

optičkih senzora [187](#)

Kapacitet prenosnog kanala [214](#)

Kapacitivni senzori [139](#)

diferencijalni [143, 145, 149](#)

cilindrični [144, 152](#)

nivoa [365](#)

pomeraja [246](#)

poludiferencijalni [144, 146](#)

pritiska [333, 354](#)

promenljive površine [142](#)

promenljivog razmaka [145](#)

promenljivog dielektrika [146](#)

statička karakteristika [141](#)

Klasa mernog instrumenta [32](#)

Klasifikacija

akcelerometara [279](#)

inžinjerskog eksperimenta [19, 20](#)

mernih grešaka [25](#)

optičkih senzora [183](#)

senzora [72](#)

tahometara [279](#)

KMZ Holov senzor [276](#)

Kocka fizičalnih efekata [80](#)

Kôd [231](#)

Kodna maska [233](#)

Koeficijent statičkog pojačanja [93, 97](#)

Količina

fluida [381](#)

informacije [213](#)

Kolo

sa otvorenim kolektorom [220](#)

za uzorkovanje i zadršku [223](#)

Kompenzacija [81](#)

hladnog kraja [425](#)

srednje snage zračenja [201](#)

strukturalna [108](#)

Kompenzacijono-mosne šeme [151](#)

Kompenzacioni senzori pritiska [337](#)

Konvertor f/U [136](#)

Korekcija dinamičke tačnosti [114](#)

u frekventnoj oblasti [116](#)

u kompleksnoj oblasti [115](#)

u vremenskoj oblasti [115](#)

Korelacioni senzor protoka [401](#)

Koriolisov senzor protoka [400](#)

KTY senzori temperature [446](#)

Kvalitet merenja [24](#)

Kvarcni senzor temperature [467](#)

L

Laserska dioda [201](#)

Laserski

Doplerov anemometar LDA [405](#)

interferometar [261](#)

LC-paralelni senzor [369](#)

LCD-displej [50](#)

LD-dioda [201](#)

LED-dioda [48, 200](#)

LED-displej [50](#)

LF198 S/H kolo [224](#)

Linearost [87](#)

Linerani pomeraj [241](#)

Logometar [132](#)
 Lokacioni senzori [259](#)
 Luminifor [466](#)
 Luminiscentni senzor [194](#)
 LT1025 integrисани kompenzator [426](#)
 LVDT [247](#)

M

Magnetna spojnica [286](#)
 Magnetni senzor [284](#)
 Magnetoelastični senzori [317](#)
 Magnetorezistivni senzori [275](#), [294](#)
 Maksimalna greška [34](#)
 Materijalizovana mera [13](#)
 Meduinduktivni senzori [157](#)
 Merenje
 i automatsko upravljanje [14](#), [71](#)
 i teorija eksperimenta [19](#)
 momenta [321](#)
 neelektričnih veličina [78](#), [239](#)
 protoka vodene pare [236](#)
 temperature [412](#)
 temperaturne razlike [440](#)

Merne šeme sa
 amplitudnom modulacijom [149](#)
 frekventnom modulacijom [136](#)
 elektromagnetskim senzorima [159](#)
 kapacitivnim senzorima [148](#)
 kompenzacijno-mosna [151](#)
 prosta [149](#)
 linearizacija izlaza [149](#)
 amplitudna modulacija [149](#)
 frekventna modulacija [150](#)
 optičkim senzorima [195](#)
 prijemnicima [196](#)
 izvorima [200](#)
 optokaplerima [202](#)
 otporničkim senzorima [126](#)
 pijezoelektričnim senzorima [171](#)
 termoelementima [434](#)

Merni

lanac [105](#)
 most [126](#), [346](#), [348](#)
 opseg [85](#)
 pretvarač [72](#)
 uređaj [13](#)

Merno područje [85](#)**Membrana** [329](#)**Metalni otpornički senzori** [437](#)**Metoda**

ekstrapolacije [14](#)
 interpolacija [14](#), [85](#), [86](#)
 ispitnih funkcija [111](#)
 koincidencije [14](#)
 komparacije [14](#)
 kompenzacije [131](#)
 mosnih pojačavača [132](#)

merenja smetnji [110](#)
 referentnih vrednosti [110](#)
 strukturne redundanse [108](#)
Metode
 izučavanja pouzdanosti [61](#)
 kvantitativne [61](#)
 merenja nivoa [362](#)
 povećanja pouzdanosti [67](#)
 povećanja tačnosti senzora [104](#)
Metrologija [7](#), [8](#)
 tehnička [13](#)
 zakonska [11](#)
Modulatori optičkog zračenja [178](#)
Moment [320](#)
Momentni senzor protoka [399](#)
Monostabilni multivibrator [136](#), [293](#)
Monitoring [15](#)
Mrtva zona [88](#)
Multipleks [221](#), [222](#)
 digitalni [222](#)
 sa lebdećim kondenzatorom [221](#)
Multiplikativna greška [24](#)

N

Način gradnje
 kapacitivnih senzora [142](#)
 induktivnih senzora [155](#)
 optičkih senzora [189](#)
 pijezoelektričnih senzora [168](#)
Naponska osetljivost [127](#), [166](#)
Nebalansirani prenos [220](#)
Nelinearna greška [24](#)
Nepodudarnost merenja [36](#)
Nepouzdanost [62](#)
Neraspoloživost [64](#)
Normalna raspodela [27](#)
Nulta metoda [14](#)
Numerička apertura [203](#), [204](#)

O

Obeležavanje
 optičkih senzora [196](#)
 otporničkih senzora [125](#)
Objektivnost [59](#)
Obrada rezultata [23](#)
 neposrednih merenja [25](#)
 parametarskih merenja [35](#)
 posrednih merenja [32](#)
Obrtni transformator [271](#)
Očuvanost [59](#)
Odnos sistematskih i slučajnih grešaka [28](#)
Odredive greške [25](#)
Odsečak dugog voda [370](#)
Odziv senzora
 nultog reda [93](#)
 prvog reda [94](#)
 drugog reda [95](#)

- Odzivnost fotodetektora [187](#)
 Ograničavajući otpornik [220](#)
 Organizacija eksperimenta [19](#)
 Optički i elektrooptički materijali [182](#)
 Optički
 prijemnici kao senzori [189](#)
 izvor kao senzor [191](#)
 parovi kao senzori [192](#)
 pisači [56](#)
 Optičko vlakno [192](#), [203](#)
 Optimalna korekcija [116](#)
 Optoelektronski senzori [177](#)
 pomeraja [252](#), [255](#)
 pritiska [335](#)
 ugaone brzine [291](#), [293](#)
 Optokapler [192](#), [202](#)
 Optimalni pravac [29](#)
 Osciloskop [97](#)
 Osetljivost [87](#)
 induktivnog senzora [155](#)
 kapacitivnog senzora [141](#)
 mernog mosta [127](#)
 termistora [442](#)
 Osnovi tehnike senzora [71](#)
 Osnovna jednačina merenja [9](#)
 Otpornički senzori [123](#)
 nivoa [367](#)
 pomeraja [243](#)
 temperature [437](#)
 Otvoreni kolektor [220](#)
- P**
- Paralelni A/D konvertor [229](#)
 Parametarska merenja [35](#)
 Parametri vibracija [303](#)
 Pasivni senzori [75](#), [461](#)
 Period oscilacija [98](#)
 Peltijeovi elementi [432](#)
 Pijezoelektrični
 akcelerometar [305](#)
 efekt [164](#)
 senzori [168](#)
 jednomorfini [170](#)
 dvomorfini [170](#)
 pomeraja [254](#)
 transformatorski [171](#)
 višestruki [169](#)
 tahometar [291](#)
 Pijezootpornik [352](#)
 Pijezorezistivni senzori pritiska [352](#)
 Pirometri [456](#)
 odnosa [458](#)
 optički [456](#)
 radiacioni [459](#)
 Pitova cev [391](#)
 Planiranje
 inžinjerskog eksperimenta [21](#)
- i organizacija merenja [19](#)
 Plovak [362](#)
 Pneumatski pojačavač [250](#)
 Pojačavač
 instrumentacioni [135](#), [353](#), [358](#)
 mosni [132](#)
 napona pijezoelektrika [172](#)
 nabuja pijezoelektrika [173](#)
 pneumatski [250](#)
 Pokazivanje instrumenta [39](#)
 Pokazatelji pouzdanosti [60](#)
 Polinom greške [235](#)
 Poluprovodnički
 senzori pritiska [351](#)
 termoelementi [432](#)
 Pomeraj [241](#)
 Potenciometar [129](#), [243](#)
 sa srednjim izvodom [244](#)
 Potenciometarski
 most [245](#)
 pisači [54](#)
 senzor
 pomeraja [243](#)
 pritiska [334](#)
 Povezivanje na mikrokontroler
 analognog senzora [217](#), [221](#)
 relejnog senzora [217](#)
 senzora pritiska [355](#), [356](#), [358](#)
 senzora temperature [435](#), [445](#)
 Pouzdanost [58](#), [60](#)
 Pozicija [241](#)
 Prag osetljivosti [89](#)
 Prenos digitalnog signala [219](#)
 Prenosne funkcije senzora [98](#)
 Preopterećenje [90](#)
 Preskok [98](#)
 Prezentacija rezultata [39](#)
 Prigušnica [383](#)
 Prijemnici svjetlosti [183](#), [189](#)
 Primarna obrada signala [217](#)
 Prikљučivanje optičkog vlakna [203](#)
 Principi
 diskretizacije [208](#)
 rada senzora [76](#)
 gradnje senzora
 brzine [280](#)
 pritiska [328](#)
 sile [312](#)
 Produžni vodovi [348](#), [424](#)
 Programska pouzdanost [60](#)
 Proksimiti senzor [293](#), [203](#)
 Promena
 faze [178](#)
 izlaznog opsega [234](#)
 polarizacije [178](#)
 Proračun zavisnih veličina [236](#)

- Protok
 fluida [381](#)
 informacija [47](#)
- Prostiranje IC zračenja [462](#)
- PSD senzor [252](#)
- PTAT senzori temperature [451](#)
- R**
- Radar [305](#)
- Radiacioni pirometri [459](#)
- Raspodela
 rezultata merenja [26](#)
 otkaza [61](#), [65](#)
- Raspoloživost [63](#)
- Rasutost rezultata merenja [28](#)
- Razdvojeno merenje [237](#)
- Refleksija signala [222](#)
- Refleksivni kod [233](#)
- Reflektor IC-zračenja [461](#)
- Registracija
 merne informacije [46](#)
 podataka [47](#), [52](#)
- Registratori [52](#)
- REF200 strujni izvor [449](#)
- Relativna greška [23](#)
- Rezolucija [89](#), [211](#),
- Rezonantni senzori [366](#)
 četvrtvalni senzor [371](#)
 koncentrisani RLC-parametri [368](#)
 odsečak dugog voda [370](#)
- RLC-serijski senzor [369](#)
- Ronilo [363](#)
- Rotacioni induktosin [274](#)
- Rotometar [385](#)
- RS-232C [220](#)
- RS-422 [220](#)
- RS-423 [220](#)
- RVDT [249](#), [299](#)
- S**
- Seizmički senzor [303](#)
- Selsin [271](#)
- Senzor [72](#)
 brzine i ubrzanja [279](#), [283](#)
 linearog pomeraja [243](#)
 nivoa [361](#)
 momenta [320](#)
 pozicije laserskog zraka [252](#)
 pritiska [326](#)
 protoka [380](#)
 sile [310](#)
 temperature [417](#), [420](#), [437](#), [447](#)
 termičkog zračenja [454](#)
 ugaonog pomeraja [265](#)
- vibracija [302](#)
 dinamičkih pomeraja [250](#)
- S/H kola [223](#)
- Signalizatori nivoa [377](#)
- Silicijumski senzori temperature [446](#)
 integrисани [447](#)
- Sipkasti materijal
 merenje nivoa [361](#)
 merenje protoka [382](#)
- Sistamske greške [25](#)
 posrednih merenja [33](#)
- Spektar zračenja [191](#)
- Specijalni senzori
 linearnog pomeraja [254](#)
 holograf [263](#)
 koordinatometri [254](#)
 laserski interferometar [261](#)
 linearni induktosin [257](#)
 lokacioni [259](#)
 rendgenski interferometar [263](#)
 difrakcioni [255](#)
 sa moar-prugama [256](#)
 sa optičkim vlaknom [264](#)
- Srednje vreme
 između dva otkaza [65](#)
 obnavljanja [64](#)
- Standardno odstupanje [27](#), [33](#)
- Statička greška
 mernog lanca [105](#)
 kompenzacijonog senzora [106](#)
 paralelnog senzora [106](#)
- Statička karakteristika
 digitalnih senzora [210](#)
 induktivnih senzora [154](#)
 kapacitivnog senzora [141](#)
 turbinskog protokometra [388](#)
- Statički prenos [83](#)
- Statistička greška [35](#)
- Stroboskopski senzor [294](#)
- Struktura
 digitalnih senzora [206](#)
 eksperimenta [23](#)
 senzora [80](#)
- Strukturna
 kompenzacija [109](#)
 pouzdanost [60](#)
 redundansa [108](#)
- Struna-senzor [250](#), [319](#), [337](#)
- Š**
- Šeme
 elektromagnetičnih senzora [159](#)
 pouzdanosti [66](#)
 frekventne modulacije [136](#), [151](#)
 kompenzacijono-mosne [152](#)
 optoelektronskih senzora [195](#)
 pijezoelektričnih senzora [171](#)
- Šestokomponentni senzor sile [312](#)

- Šmitov triger [136](#), [390](#)
 Standardno odstupanje [27](#)
- T**
 Tabelarni prikaz rezultata [40](#)
 Tačnost [85](#)
 statičkog prenosa [104](#)
 dinemičkog prenosa [107](#)
 Tahogenerator [286](#), [287](#)
 Tahometar [279](#)
 magnetni [284](#)
 pijezoelektrični [291](#)
 reluktantni [289](#)
 optoelektronski [291](#), [293](#)
 Tahometarski most [288](#)
 Tajmer [55](#), [174](#), [293](#)
 TB1010 akcelerometar [301](#)
 Tehnička
 metrologija [13](#)
 neraspoloživost [64](#)
 Tehničke karakteristike [83](#)
 Telemetrijski sistem [16](#), [223](#)
 Temperatura [412](#)
 termodynamička [414](#)
 senzori [412](#)
 dilatacioni [419](#)
 diiodni [447](#)
 ekspanzionni [417](#)
 gasni [417](#)
 integrisani [451](#)
 kvarcni [467](#)
 pirometri [454](#)
 termoelement [420](#)
 termistor [441](#)
 termootpor [437](#)
 Temperurne skale [414](#)
 Termistor [441](#)
 korekcija karakteristike [443](#)
 linearni [445](#)
 merne šeme [444](#)
 osetljivost [442](#)
 Termoelementi [420](#)
 izrada [427](#)
 karakteristike [430](#)
 merne šeme [434](#)
 označavanje [428](#)
 povezivanje sa računaram [435](#)
 problem hladnog kraja [423](#)
 termoelektrični efekti [420](#)
 vremenska konstanta [431](#)
 Termoelektrični grejači i hladnjaci [433](#)
 Temperaturno polje [460](#)
 Termootpor [437](#)
 metalni [437](#)
 poluprovodnički [441](#)
 Termovizija [460](#)
 Termofrekventni metod [467](#)
 Tenzoelement [249](#), [338](#)
 folija [339](#)
- kompenzacija drifta [343](#), [344](#)
 merni most [346](#)
 princip rada [340](#)
- Teorija
 eksperimenta [19](#)
 fundamentalna [7](#)
 merenja [7](#), [8](#)
 primenjena [7](#), [8](#)
- Termički senzori protoka [397](#)
 kalorimetrijski [397](#)
 termokonvektivni [398](#)
- Termoanemometar [402](#)
- Termometar [412](#)
- Termootpor [437](#)
- Termovizija [460](#)
- Test-signali [93](#)
- Transdijuter [72](#)
- Transformatorski pijezoelektrični senzor [170](#)
- Transformatorski selsin [273](#)
- Translatorna i ugaona brzina [279](#)
- Tranzistor kao senzor temperature [450](#)
- Treperenje releja [217](#)
- Turbinski protokometar [387](#)
- U**
 Ubrzanje [279](#)
 Ugaoni pomeraj [241](#)
 Ultrazvučni
 predajnik [174](#)
 prijemnik [175](#)
 senzori
 nivoa [376](#)
 protoka [393](#), [394](#), [395](#)
 U/f-pretvarač [323](#), [358](#)
 U/I-pretvarač [353](#), [391](#), [434](#)
 Unipolarni ulaz A/D konvertora [226](#)
 U-metod [129](#)
 Uticaj
 napajanja [89](#)
 preopterećenja [90](#)
 priključnih vodova [166](#), [348](#), [424](#), [439](#), [469](#)
 starenja [90](#)
 temperature [345](#), [367](#)
 vremena kašnjenja [96](#)
- V**
 Veličinska jednačina [10](#)
 Verovatnočna bezotkaznog rada [65](#)
 Vibracije [302](#)
 Višestruki pijezoelektrični senzori [169](#)
 Vitalnost [59](#)
 Vitstonov most [126](#)
 Vizuelizacija
 protoka [408](#)

- temperaturnog polja [460](#), [464](#)
- Vod
- odsečak dugog voda [370](#)
 - priklučni [348](#)
 - produžni [424](#)
 - sa malim gubicima [370](#)
- Volumenski protok [383](#), [387](#)
- Vreme
- aperture [212](#), [224](#)
 - kašnjenja [97](#)
 - preskoka [98](#)
 - step-odziva [97](#)
 - usporna [97](#)
 - uzorkovanja [223](#)
- uspostavljanja stacionarnog stanja [97](#)
- Vremenska konstanta [94](#), [97](#), [431](#)
- Vrste
- mernih grešaka [23](#)
 - pouzdanosti [60](#)
- Vrtložni senzori [396](#)
- Z**
- Zakonska metrologija [11](#)
- Zakon
- eksponencijalne raspodele otkaza [65](#)
 - Gausove raspodele [26](#)
 - o mernim jedinicima i merilima [13](#)
 - termoelektričnih kola [422](#)
 - homogenog kola [422](#)
 - međumetala [423](#)
 - aditivnosti [423](#)
- zračenja [454](#)
- Kirhofov [454](#)
 - Plankov [454](#)
 - Štefan-Bolcmanov [455](#)
 - Vinov [454](#)
- X**
- XY-pisač [55](#)

SADRŽAJ

PRVI DEO

PRINCIPI MERENJA

1. UVOD U MERENJE	7
1.1. METROLOGIJA-NAUKA O MERENJU	7
1.2. OSNOVNI POJMOVI I JEDNAČINE METROLOGIJE	9
1.3. ZAKONSKA METROLOGIJA	11
1.4. TEHNIČKA METROLOGIJA	13
1.5. MERENJE I AUTOMATSKO UPRAVLJANJE	14
PITANJA I ZADACI	18
LITERATURA	18
2. PLANIRANJE I ORGANIZACIJA MERENJA	19
2.1. MERENJE I TEORIJA EKSPERIMENTA	19
2.2. PLANIRANJE INŽINJERSKOG EKSPERIMENTA	21
PITANJA I ZADACI	22
LITERATURA	22
3. OBRADA MERNIH REZULTATA	23
3.1. VRSTE MERNIH GREŠAKA	23
3.2. OBRADA REZULTATA NEPOSREDNIH MERENJA	25
3.2.1. Obrada slučajnih grešaka kod neposrednih merenja	25
3.2.2. Odnos sistematskih i slučajnih grešaka	28
3.2.3. Broj merenja i tačnost	31
3.2.4. Granična greška i klasa mernog instrumenta	32
3.3. OBRADA REZULTATA POSREDNIH MERENJA	32
3.3.1. Slučajne greške posrednih merenja	32
3.3.2. Sistematske greške posrednih merenja	33
3.3.3. Granice nepouzdanosti rezultata posrednih merenja	34
3.4. OBRADA REZULTATA PARAMETARSKIH MERENJA	35
3.4.1. Parametarska merenja	35
3.4.2. Greške parametarskih merenja	35
PITANJA I ZADACI	37
LITERATURA	38
4. PREZENTACIJA REZULTATA EKSPERIMENTA	39
4.1. POKAZIVANJE INSTRUMENTA	39
4.2. TABELARNI PRIKAZ REZULTATA	40
4.3. GRAFIČKA PREZENTACIJA REZULTATA	41
PITANJA I ZADACI	45
LITERATURA	45
5. REGISTRACIJA PODATAKA	46
5.1. REGISTRACIJA MERNE INFORMACIJE	46
5.2. INDIKACIONI INSTRUMENTI	47
5.3. REGISTRATORI	51
5.3.1. Registracija podataka	51
5.3.2. Galvanometarski pisači	53
5.3.3. Potenciometski pisači	54
5.3.4. Optički pisači	56
PITANJA I ZADACI	57

LITERATURA.....	57
-----------------	----

6. POUZDANOST MERNIH UREĐAJA	58
6.1. OPŠTA SVOJSTVA POUZDANOSTI.....	58
6.2. VRSTE POUZDANOSTI	60
6.3. KVANTITATIVNE KARAKTERISTIKE I POKAZATELJI POUZDANOSTI	60
6.4. EKSPONENCIJALNI ZAKON RASPODELE	65
6.5. PRORAČUN POKAZATELJA POUZDANOSTI.....	66
6.6. METODE POVEĆAVANJA POUZDANOSTI MERNIH UREĐAJA.....	66
PITANJA I ZADACI	67
LITERATURA.....	68

DRUGI DEO

PRINCIPI TEHNIKE SENZORA

7. OSNOVI TEHNIKE SENZORA	71
7.1. SREDSTVAZA DOBIJANJE INFORMACIJA U SISTEMIMA AUTOMATSKOG UPRAVLJANJA	71
7.2. KLASIFIKACIJA SEZORA.....	72
7.3. FIZikalni PRINCIPI RADA SENZORA	76
7.4. STRUKTURA SENZORA	80
PITANJA I ZADACI	82
LITERATURA.....	82

8. TEHNIČKE KARAKTERISTIKE SENZORA	83
8.1. STATIČKE KARAKTERISTIKE.....	83
8.1.1. Statički prenos senzora.....	83
8.1.2. Parametri statičke karakteristike	85
8.1.3. Parametarske zavisnosti statičke karakteristike	89
8.1.4. Ekonomsko-tehnički parametri	92
8.2. DINAMIČKE KARAKTERISTIKE	92
8.2.1. Dinamičke karakteristike u vremenskoj oblasti	92
8.2.2. Parametri dinamičke karakteristike u vremenskoj oblasti	96
8.2.3. Prenosne funkcije senzora	97
8.2.4. Dinamičke karakteristike u frekventnoj oblasti	98
8.2.5. Odnos parametara dinamičkih karakteristika u vremenskoj i frekventnoj oblasti	103
8.3. METODI POVEĆANJA TAČNOSTI SENZORA	104
8.3.1. Tačnost statičkog prenosa	104
8.3.2. Tačnost dinamičkog prenosa	107
8.3.3. Automatska korekcija statičke tačnosti	108
8.3.4. Korekcija dinamičke tačnosti	114
PITANJA I ZADACI	117
LITERATURA.....	119

TREĆI DEO

OSNOVNI SENZORI

9. OTPORNIČKI SENZORI	123
9.1. PRINCIP RADA	123
9.2. MERNE ŠME SA OTPORNIČKIM SENZORIMA.....	126
PITANJA I ZADACI	136

LITERATURA.....	138
10. KAPACITIVNI SENZORI	139
10.1. PRINCIP RADA	139
10.2. NAČINI GRADNJE KAPACITIVNIH SENZORA	142
10.2.1. Kapacitivni senzori sa promenljivom površinom	142
10.2.2. Kapacitivni senzori sa promenljivim razmakom između ploča	145
10.2.3. Kapacitivni senzor sa promenljivim dielektrikom	147
10.3. MERNE ŠEME SA KAPACITIVnim SENZORIMA	148
PITANJA I ZADACI	152
LITERATURA.....	153
11. ELEKTROMAGNETNI SENZORI	154
11.1. INDUKTIVNI SENZORI	154
11.1.1. Princip rada	154
11.1.2. Način gradnje induktivnih senzora	155
11.2. MEĐUINDUKTIVNI SENZORI	157
11.3. INDUKCIONI SENZORI	158
11.4. MERNE ŠEME SA ELEKTROMAGNETnim SENZORIMA	159
PITANJA I ZADACI	160
LITERATURA.....	161
12. PIJEZOELEKTRIČNI SENZORI.....	162
12.1. PRINCIP RADA	162
12.2. NAČINI GRADNJE PIJEZOELEKTRIČNIH SENZORA	169
12.3. MERNE ŠEME SA PIJEZOELEKTRIČnim SENZORIMA	172
PITANJA I ZADACI	175
LITERATURA.....	176
13. OPTOELEKTRONSKI SENZORI.....	177
13.1. PRINCIP RADA	177
13.1.1. Fizikalni osnov	177
13.1.2. Modulatori i deflektori optičkog signala	178
13.1.3. Optički i elektrooptički materijali	183
13.2. KLASIFIKACIJA OPTIČKIH SENZORA	184
13.3. KARAKTERISTIKE OPTIČKIH SENZORA	188
13.4. NAČIN GRADNJE OPTIČKIH SENZORA.....	191
13.5. MERNE ŠEME SA OPTIČKIM SENZORIMA	198
13.5.1. Označavanje optičkih senzora.....	198
13.5.2. Merne šeme sa optičkim prijemnicima	199
13.5.3. Merne šeme sa optičkim izvorima	202
13.5.4. Priklučivanje optičkog vlakna	203
PITANJA I ZADACI	205
LITERATURA.....	205
14. DIGITALNI SENZORI	206
14.1. PRINCIP RADA	206
14.1.1. Struktura digitalnih senzora	207
14.1.2. Digitalizacija merene analogne veličine	208
14.2. KARAKTERISTIKE DIGITALNIH SENZORA	210
14.2.1. Statičke karakteristike	210
14.2.2. Dinamičke karakteristike	211
14.2.3. Informacione karakteristike	213
14.3. NAČIN GRADNJE DIGITALNIH SENZORA.....	215
14.3.1. Organizacija	215
14.3.2. Primarna obrada signala i povezivanje senzora sa mikrokontrolerom	217
14.3.3. Multipleksler	221
14.3.4. Kola za uzorkovanje i zadršku	223

14.3.5.	Digitalno-analogni pretvarači	224
14.3.6.	Analagno-digitalni pretvarači	226
14.4.	IZBOR KODA I NOSIOCA KODA	231
14.5.	PROŠIRIVANJE FUNKCIONALNIH MOGUĆNOSTI SENZORA	234
	PITANJA I ZADACI	237
	LITERATURA.....	238

ČETVRTI DEO

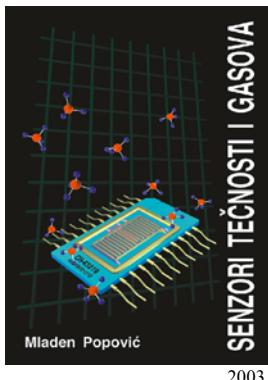
SENZORI I METODE MERENJA NEELEKTRIČNIH VELIČINA

15. SENZORI LINEARNOG I UGAONOG POMERAJA.....	241
15.1. DUŽINA, POZICIJA, POMERAJ.....	241
15.2. SENZORI LINEARNOG POMERAJA	243
15.3. SENZORI ZA DINAMIČKE POMERAJE.....	250
15.4. SPECIJALNI SENZORI LINEARNOG POMERAJA	254
15.5. SENZORI UGAONOG POMERAJA	265
PITANJA I ZADACI	277
LITERATURA.....	278
16. SENZORI BRZINE I UBRZANJA	279
16.1. FIZIKALNI OSNOVI MERENJA BRZINE I UBRZANJA	279
16.2. SENZORI UGAONE BRZINE.....	283
16.3. AKCELEROMETRI	296
16.4. SENZOR VIBRACIJA	302
16.5. RADARSKI SENZORI	305
PITANJA I ZADACI	309
LITERATURA.....	309
17. SENZORI SILE I MOMENTA	310
17.1. FIZIKALNA OSNOVA MERENJA SILE I MOMENTA.....	310
17.2. PRINCIPI GRADNJE SENZORA SILE I MOMENTA.....	312
17.3. SENZORI SILE.....	316
17.4. SENZORI MOMENTA	320
PITANJA I ZADACI	325
LITERATURA.....	325
18. SENZORI PRITiska.....	326
18.1. FIZIKALNA OSNOVA	326
18.2. PRINCIPI GRADNJE SENZORA PRITiska	328
18.3. TEHNIKA SENZORA PRITiska	332
18.3.1. Elektromagnetski senzori pritiska	332
18.3.2. Kapacitivni senzori pritiska	333
18.3.3. Potenciometarski senzor pritiska	324
18.3.4. Pijezoelektrični senzori pritiska	335
18.3.5. Optoelektronski senzori pritiska	335
18.3.6. Senzori sa strunom	336
18.3.7. Senzori sa kompenzacijom sile	337
18.4. TENZOMETARSKI SENZORI PRITiska	338
18.4.1. Tenzoelement	338
18.4.2. Prinzip rada tenzoelementa	340
18.4.3. Drift nule I drift osetljivosti	342
18.4.4. Merni mostovi sa tenzoelementima	346
18.5. POLUPROVODNIČKI SENZORI PRITiska	351
18.5.1. Poluprovodničke merne trake i pijezorezistivni senzori	351
18.5.2. Merne šeme sa poluprovodničkim senzorima	352

18.6.	DIGITALNI SENZORI PRITiska	354
18.6.1.	Inteligentni kapacitivni senzor pritiska	354
18.6.2.	Povezivanje sa mikrokontrolerom	355
18.6.3.	Direktno povizavanje na mikrokontroler	356
18.6.4.	Priklučivanje na eksterni A/D konvertor	356
18.6.5.	Priklučivanje preko U/f konvertora	358
	PITANJA I ZADACI	359
	LITERATURA.....	360
19. SENZORI NIVOA.....		361
19.1.	KARAKTERISTIKE MERENJA NIVOA.....	361
19.2.	TEHNIKA SENZORA NIVOA.....	362
19.2.1.	Senzori na principu plovka	362
19.2.2.	Senzori sa ronilom.....	363
19.2.3.	Hidrostatski senzori.....	364
19.2.4.	Električni senzori	365
19.2.5.	Rezonantni senzori sa koncentrisanim RLC-parametrima	368
19.2.6.	Rezonantni senzor kao odsečak dugog voda	370
19.2.7.	Ultrazvučni senzori nivoa	376
19.2.8.	Signalizatori diskretnih vrednosti nivoa	377
	PITANJA I ZADACI	379
	LITERATURA.....	380
20. SENZORI PROTOKA.....		381
20.1.	OSNOVI TEHNIKE MERENJA PROTOKA.....	381
20.2.	SENZORI VOLUMETRIJSKOG PROTOKA.....	383
20.2.1.	Princip volumetrijskog merenja protoka.....	383
20.2.2.	Senzori sa prigušnicom	383
20.2.3.	Rotametar	385
20.3.	VOLUMETRIJSKI SENZORI PROTOKA SA MERENJEM BRZINE FLUIDA	387
20.3.1.	Turbinski protokomer.....	387
20.3.2.	Pitoova cev	391
20.3.3.	Indukcioni senzori	392
20.3.4.	Ultrazvučni senzori protoka	393
20.3.5.	Vrtložni senzori	396
20.4.	SENZORI MASENOG PROTOKA	397
20.4.1.	Termički senzori.....	397
20.4.2.	Momentni senzori	399
20.5.	SPECIJALNI SENZORI PROTOKA.....	401
20.5.1.	Korelacioni senzor protoka	401
20.5.2.	Termoanemometri	402
20.5.3.	Laserski Doplerov anemometar	405
20.5.4.	Senzori brzine i protoka sa optičkim vlaknom	407
20.5.5.	Vizuelizacija protoka	408
	PITANJA I ZADACI	409
	LITERATURA.....	411
21. MERENJE TEMPERATURE.....		412
21.1.	METROLOŠKI OSNOVI MERENJA TEMPERATURE	412
21.2.	EKSPANZIONI SENZORI TEMPERATURE	417
21.3.	TERMOELEMENTI.....	420
21.3.1.	Termoelektrične pojave	420
21.3.2.	Empirijski zakoni termoelektričnih kola	422
21.3.3.	Problem hladnog kraja termoelementa	423
21.3.4.	Izrada termoelementa	427
21.3.5.	Statičke i dinamičke karakteristike termoelementa	430
21.3.6.	Poluprovodnički termoelementi	431
21.3.7.	Merne šeme sa termoelementima	434
21.3.7.	Praktični aspekti upotrebe termoelementa	436
21.4.	OTPORNIČKI SENZORI TEMPERATURE	437

21.4.1.	Metalni otpornički senzori	437
21.4.2.	Poluprovodnički otpornički senzori temperature.....	441
21.5.	POLUPROVODNIČKI SENZORI TEMPERATURE	447
21.5.1.	Dioda kao senzor temperasture	447
21.5.2.	Tranzistor kao senzor temperature	450
21.5.3.	Integrисani senzori	451
21.6.	SENZORI INFRACRVENOG ZRAČENJA	454
21.6.1.	Zakoni zračenja	454
21.6.2.	Pirometri spektralnog zračenja.....	456
21.6.3.	Pirometri odnosa spektralnih zračenja	458
21.6.4.	Radijacioni pirometri	459
21.7.	SPECIJALNI SENZORI TEMPERATURE	460
21.7.1.	Infracrvena termovizija	460
21.7.2.	Infracrveni senzori temperature sa optičkim vlaknom	465
21.7.3.	Kvarcni senzor temperature	467
	PITANJA I ZADACI	468
	LITERATURA	470
DODATAK	473
DODATAK I	475
Osnovne jedinice Međunarodnog sistema jedinica (SI)	475
Dostignute granice nesigurnosti pri materijalizaciji SI	475
Šema materijalizacije SI	476
Šema zakonskih mernih jedinica u SRJ	477
DODATAK II	478
Tabela vrednosti integrala $\Phi(z)$	478
DODATAK III	479
Tabela dvostranih odnosa jedinica pritiska	479
DODATAK IV	480
Tablica termoelemenata	480
SPISAK OZNAKA	486
INDEKS POJMOVA	489

OD ISTOG AUTORA



SENZORI TEČNOSTI I GASOVA

Knjiga „Senzori tečnosti i gasova“ je naučno-stručno delo koje sadrži pregled rezultata iz senzorike i tehnike merenja tečnosti i gasova. U prvom delu opisani su klasični analizatori sa izlaznim signalom u realnom vremenu. U drugom delu obrađeni su poluprovodnički senzori tečnosti i gasova, uključujući i biosenzore.

Knjiga ima 311 strana, 145 slika i bibliografiju sa 150 referenci. Knjiga sadrži CD-ROM sa elektronskim izdanjem knjige.

Izdavač: Zavod za udžbnike i nastavna sredstva, Srpsko Sarajevo

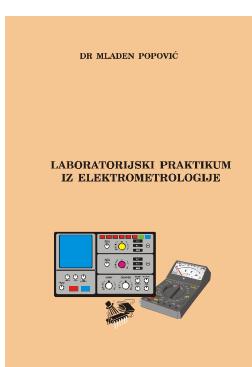


SENZORI U ROBOTICI

U knjizi „Senzori u robotici“ je dat pregled današnjeg stanja u tehnologiji izrade senzora u robotici i perspektive razvoja. Opisani su principi rada, konstrukcija i obrada signala senzora koji su razvijeni u okviru robotike: senzori blizine, senzori sile i momenta, taktilni senzori, senzori ultrazvučne vizije, senzori vizije.

Knjiga ima 235 strana, 120 slika i bibliografiju sa 97 referenci.

Izdavač: Viša elektrotehnička škola, Beograd



LABORATORIJSKI PRAKTIKUM IZ ELEKTROMETROLOGIJE

Laboratorijski praktikum nastao je kao rezultat potrebe da se poboljša kvalitet laboratorijskih vežbi iz predmeta Elektrometrologija na Višoj elektrotehničkoj školi.

Svaka vežba sadrži cilj, zadatak, merne šeme sa kratkim objašnjenjem rada, specifikaciju merne opreme i materijala, te tabele i dijagrame pripremljene za obradu i prezentaciju rezultata merenja. Vežbe su koncipirane tako da kod studenata razviju smisao za praktičan i samostalan rad.

<http://www.vets.edu.yu/elektrometrologija/html/praktikum/menu.htm>

Izdavač: Viša elektrotehnička škola, Beograd