

# ELEKTRIČNA MJERENJA

**Određivanje mesta prekida u kabelu balističkom metodom.** Ova metoda se zasniva na mjerenu kapaciteta balističkim galvanometrom. Mjerjenje se može izvesti s jednog kraja voda ili sa oba kraja. Iz dobivenih otklona galvanometra pri mjerenu na vodiču s prekidom i na ispravnom vodiču može se odrediti mjesto prekida.

**Određivanje mesta kvara impulsnom metodom.** Impulsnom metodom mogu se pronaći kvarovi na kabelskim i zračnim vodovima brzo i tačno. U tu svrhu se u ispitivani vod dovode kratkotrajni istosmerni impulsi strmog čela, koji se reflektiraju od mesta kvara ukoliko impedancija na mjestu kvara nije jednak karakterističnoj impedanciji voda. Ako je ona manja nego karakteristična impedancija voda, impuls se reflektira sa promijenjenim polaritetom (sl. 106 b), a ako je impedancija veća, reflektirani impuls ne mijenja polaritet (sl. 106 c). Poslati i reflektirani impulsi promatraju se na zastoru katodne cijevi impulsnog uređaja. Poznavajući brzinu širenja elektromagnetskog vala  $v$  u dotočnom vodu i vrijeme od polaska impulsa do njegova povratka  $\Delta t$  može se odrediti mjesto kvara:

$$l_x = \frac{v \Delta t}{2}.$$

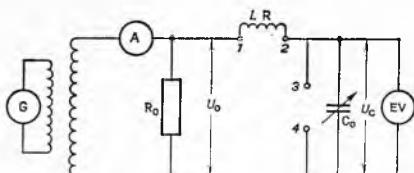
Sl. 106. Slika na zastoru katodne cijevi uređaja za utvrđivanje greške na vodovima zaključenima različitim impedancijama. a) Vod zaključen karakterističnom impedancijom voda, b) impedancija tereta manja od karakteristične impedancije (odgovara kratkom spoju voda), c) impedancija tereta veća od karakteristične impedancije (vod u prekidu)

godenosti otpora karakterističnom otporu linije, potrebno je veće iskustvo za pravilno tumačenje slike na zastoru katodne cijevi.

## Ostala mjerena

**Mjerjenje faktora dobrote svitka Q-metrom.** Faktor dobrote svitka  $Q$  definiran je omjerom  $\omega L/R$ , gdje je  $L$  induktivitet svitka, a  $R$  njegov djelatni otpor. On predstavlja bezdimenzionu veličinu. Mjerjenje faktora dobrote može se provesti posebno u tu svrhu konstruiranim instrumentom, Q-metrom.

Principijelna shema Q-metra prikazana je na sl. 107. Kontinuirano podešivim stabilnim generatorom  $G$  napaja se mjeri sklop.



Sl. 107. Principijelna shema Q-metra

Straža kroz mjeri sklop (zapravo struja kroz vrlo mali otpor  $R_0$  otpornika  $R_0$ ) mjeri se instrumentom s termopretvaračem A. Pokazivanje instrumenta A proporcionalno je padu napona  $U_0$  na otporniku  $R_0$ . U priključen mjereni svitak induktiviteta  $L$  i djelatnog otpora  $R$  pomoću promjenljivog kondenzatora sa zanemarljivim gubicima  $C_0$  podesi se rezonancija koja se indicira visokoomskim, npr. električkim voltmetrom EV. U slučaju rezonancije vrijedi:

$$I_r = \frac{U_0}{R + R_0}; \quad U_C = I_r X_C = \frac{U_0}{R + R_0} \frac{1}{\omega C_0}; \quad Q = \frac{U_C}{U_0},$$

gdje je  $X_C$  kapacitivni otpor (reaktancija). Uz konstantni napon  $U_0$  pokazivanje električkog voltmetra direktno je proporcionalno faktoru dobrote  $Q$  mjerene svitka. Greška određivanja faktora  $Q$  manja je od 10%.

Pored mjerena faktora dobrote, Q-metrom se mogu mjeriti kapaciteti i induktiviteti. Kapacitet se može izmjeriti postupkom

opisanim u nastavku. Na stazaljke 1—2 priključi se svitak poznatog induktiviteta (isporučuje se uz Q-metar), a pri maksimalnoj vrijednosti kapaciteta  $C_0'$  mernog (etalonskog) kondenzatora podešava se rezonancija promjenom frekvencije generatorka. Zatim se na priključnice 3—4 priključi kondenzator nepoznatog kapaciteta i promjenom kapaciteta mernog kondenzatora krug opet dovodi u rezonanciju. Ako je  $C_0''$  sada smanjeni kapacitet mernog kondenzatora, nepoznati kapacitet  $C_x$  priključenog kondenzatora može se odrediti iz jednadžbe:

$$C_x = C_0' - C_0''.$$

Tvorničkom izvedbom jednog Q-metra mogu se mjeriti npr. induktiviteti od 0,1  $\mu\text{H}$  do 130  $\text{mH}$ , kapaciteti od 30 do 460  $\mu\text{F}$ , a Q-faktori od 10 do 625. Opseg frekvencija generatorka pri tome iznosi 50 kHz do 50 MHz.

**Faradayev kavez i njegova primjena.** U visokofrekventnoj tehnici često je potrebno spriječiti širenje elektromagnetskog polja u određeni prostor kako bi se zaštitali elementi električnih uređaja. U tu svrhu okružuje se potreblji prostor dovoljno debelim metalnim zaklonom. Debljina i vrsta metala zaklona ovisi o frekvenciji elektromagnetskog vala,

Djelovanje elektromagnetskog zaklona fizikalno se može objasniti time što se u tijelu zaklona pojavljuju struje čije polje se protivi vanjskome. Upotrebojem materijala dobre vodljivosti, npr. bakra ili aluminija, elektromagnetski val praktički potpuno oslabi na udaljenosti jednakoj valnoj dužini u vodljivom sredstvu.

Oklopljene prostorije — Faradayevi kavezi — služe za oklapanje i zaštitu uređaja i osobe koja tim uređajem rukuje. Izraduju se tako da se kostur od drva ili metala obloži s vanjske i unutarnje strane bakrenim ili aluminijskim pločama. Oba obloga, udaljena jedan od drugog 5—10 cm, vodljivo se povežu samo na jednom mjestu. Vrata koja služe za ulaz u prostoriju izvode se tako da zatvorena imaju dobru vodljivu vezu sa svojim okvirom i time s čitavim kavezom.

Električna energija za napajanje uređaja dovodi se preko pogodnih filtera koji sprečavaju ulaz smetajućeg signala u oklopljenu prostoriju.

Kavezi se mogu izraditi i od metalnih mreža u kojima razmak između žica koje sačinjavaju stranice pojedinih otvora (oka) mreže mora biti višestruko manji od duljine elektromagnetskog vala. Oklapanje je to bolje što je manji omjer između razmaka žica u mreži i razmaka između dviju mreža koje omeđuju potreblji prostor. Kavez načinjen od metalnih mreža zaštićuje se od vrlo visokih frekvencija dodatnim oklopom od platna impregniranog grafitom. Postoje kavezi čija je vanjska stijena načinjena od mreže, a unutarnja od bakrene folije zalipljene na odgovarajuću podlogu. Između te dvije stijene stavlja se platno impregnirano grafitom.

V. Bego D. Vujević

## ELEKTRIČNA MJERENJA NEELEKTRIČNIH VELIČINA

Osnovne su prednosti električnih mernih metoda pred mehaničkim i drugim metodama: mogućnost daljinskog prenosa rezultata, velika prilagodljivost, velika tačnost i osjetljivost, mogućnost jednostavnog i velikog pojačanja, visoka vlastita frekvencija mernih uređaja, mogućnost višestrukog pokazivanja, brojanja, registriranja (grafičkog prikazivanja) i uskladištenja (pamćenja) mernih signala. Električne mjerne metode omogućuju i izravno dovođenje mernih podataka računalima i sličnim uređajima radi njihove obrade ili radi automatske regulacije. Zbog tih svojih prednosti električne se mjerne metode primjenjuju i na mjerjenje nenelektričnih veličina. Time je, među ostalim, omogućena automatizacija industrijskih procesa i neposredno uključivanje električkih računala u automatizaciju proizvodnje.

Električne mjerne metode počele su se primjenjivati izvan područja elektrotehnike najprije za mjerjenje temperature pomoću otpornika i termoelementa ( $\sim 1890$ ), a zatim za mjerjenje mehaničkih veličina, u prvom redu brzine vrtnje pomoću tahogeneratora ( $\sim 1900$ ). Električno se je mjereno brzo proširilo na određivanje gotovo svih nenelektričnih veličina, jer ono pruža znatne prednosti napevraženju mjerjenju, pogotovo kad se radi o dinamičkom mjerjenju.

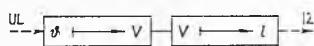
## PRETVORBA NEELEKTRIČNIH VELIČINA U ELEKTRIČNE

Da bi se nenelektrične veličine mogle pokazivati, registrirati i ili automatski regulirati pomoću električnih mernih uređaja, one se moraju najprije pretvoriti u prikladne električne veličine.

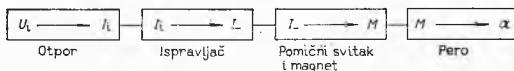
Pri gotovo svim vrstama mjerjenja, bez obzira na to jesu li električna ili neelektrična, obavlja se pretvorba jednih veličina u druge. Pretvorba neelektričnih veličina u prikladne električne veličine predstavlja samo specijalan slučaj pretvorbni uobičajenih u mjernoj tehnici.

Da bi se uočile promjene i pretvorbe kojima su podvrgnute veličine u mjernom instrumentu i time dobio što bolji uvid u rad instrumenta kao cjeline i svih njegovih sastavnih dijelova, instrument se u mislima rastavlja na članove djelovanja i grafički prikazuje *shemom toka djelovanja*. U toj shemi članovi djelovanja prikazani su pravokutnicima u kojima su ulazna veličina (UL) i izlazna veličina (IZ) obilježene odgovarajućim oznakama i jedna s drugom povezane strelicama usmjerenim od UL prema IZ.

*1. primjer: shema toka tekućinskog termometra.* Tekućinskim termometrom pretvara se temperatura u promjenu volumena  $V$  mjerne tekućine (npr. žive) u kuglici, a promjenu volumena se zatim uz pomoć kapilarne, priključene na kuglicu, pretvara u promjenu duljine  $l$  stupca tekućine. Shema toka djelovanja takva termometra, tj. tok i redoslijed pretvorbni, prikazan je na sl. 1.



Sl. 1. Shema toka djelovanja živinog termometra



Sl. 2. Shema toka djelovanja voltmetra za izmjenični napon

*2. primjer: shema toka voltmetra za izmjenični napon* (sl. 2). Taj voltmetar sastoјi se od instrumenta s pomičnim svitkom (za mjerjenje istosmjerne struje) i ispravljača izmjenične struje unutarnjeg otpora  $R$ . Izmjenični napon  $U_i$  priključen na voltmetar proizvodi struju  $I_1 = U_i/R$ . Ova se struja u ispravljaču ispravlja u istosmjeru struju  $I$ , koja s magnetskim tokom permanentnog magneta instrumenta daje zaokretni moment  $M$ . Ovaj zaokreće pomični svitak i kazaljku na instrumentu svladavajući protumot pera, tako da se kazaljka otkloni za neki kut  $a$ , koji je mjera za mjereni napon.

*Članovi djelovanja*, označeni u shemama toka djelovanja pravokutnicima, mogu se prema principu rada i ulozi pri mjerjenju podijeliti na *pretvaračke i kompenzacijске članove*. Pretvaračkim članovima mjerene veličine (npr. temperature, sile) ili mjerene vrijednosti (npr. 50 °C, 12 kp) pretvaraju se u druge veličine i vrijednosti, a kompenzacijskim članovima se neke ulazne veličine kompenziraju jednakim izlaznim veličinama. Pretvorbom mjerene veličine nastaje kvalitativna promjena ove veličine, a pri pretvorbi mjerene vrijednosti, mjerena veličina ostaje kvalitativno nepromijenjena, ali se mijenja kvantitativno.

Pretvorba mjernih veličina i mjernih vrijednosti vrši se po moću odgovarajućih *pretvarača*. Djelovanjem neke ulazne neelektrične veličine UL na odgovarajući pretvarač ili se proizvodi neka izlazna električna veličina IZ (aktivni pretvarač) ili upravlja njome (*pasivni pretvarač*). Aktivnim pretvaračima vrši se pretvorka neelektričnih veličina u električne tako da se mehanička ili neka druga energija pretvara u električnu; u pasivnim pretvaračima, pak, postiže se promjene električnih veličina djelovanjem neelektričnih, posredstvom različnih fizikalnih pojava ili kompenzacijom postupcima.

Među aktivne pretvarače (označene znakom  $\circ \rightarrow$ ) idu svi pretvarači kojima se mehaničke (ME), topilinske (TO), svjetlosne (SV) ili kemijske (KE) veličine pretvaraju u električne (npr. napon, nabo, struju). Kad se primjenjuju aktivni pretvarači nije potreban poseban izvor energije, ali većina aktivnih pretvarača daje signale koji su premali i neprikladni za neposredno pokazivanje, pa se stoga uz njih primjenjuju odgovarajuća mjerna pojedala. U pasivnim pretvaračima (označenim znakom  $\mapsto$ ) neelektrične veličine samo utječu na kvantitativnu promjenu neke električne veličine (npr. otpora, kapaciteta). Pri primjeni pasivnih pretvarača potreban je pomoći izvor energije.

Svaki član djelovanja označava odnosno predstavlja po jednu pretvorbu. Složeniji instrumenti sastoje se od više pretvarača mjernih veličina. Prvi od ovih pretvarača, tj. onaj na koji neposredno djeluje mjerena neelektrična veličina, naziva se *mjerni davač* (davač ili detektor).

Za karakteriziranje određene pretvorbe mjerodavan je omjer izlazne prema ulaznoj veličini, dakle kvocijent IZ/UL. Ovaj omjer je kod pretvorbe mjerene veličine imenovan broj, a naziva se *strminom*. Kod pretvorbe mjerene vrijednosti, ovaj je omjer neimenovan broj i naziva se *omjerom prenosa*.

#### AKTIVNI MJERNI PRETVARAČI

##### Pretvaranje mehaničkih veličina u električne

Za pretvaranje mehaničkih veličina u električne služe elektromagnetska indukcija i piezoelektrični efekt. Prema tome se razlikuju induksijski i piezoelektrični pretvarači.

*Indukcijski pretvarači.* Ako se mijenja magnetski tok koji pojedini zavoji nekog svitka u magnetskom polju obuhvaćaju, bilo uslijed gibanja svitka u polju bilo uslijed promjene magnetskog otpora izazvanog gibanjem drugog vodiča u polju, u svitku se inducira elektromotorna sila (EMS)  $e$ , koja je proporcionalna umnošku brzine promjene magnetskog toka  $\Phi$  obuhvaćenog pojedinim zavojem i broju zavoja  $N$ :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} N. \quad (1)$$

Prema načinu kojim se s pomoću mehaničkog gibanja provodi inducirana EMS, induksijski pretvarači dijele se u pretvarače s relativnim gibanjem vodiča (svitka) i pretvarače s promjenljivim magnetskim otporom.

*Indukcijski pretvarači s relativnim gibanjem vodiča.* Magnetski tok  $\Phi$  određen je magnetskom indukcijom  $B$  i površinom magnetskih silnika  $S$  koje obuhvaća svitak:

$$\Phi = B S. \quad (2)$$

Obuhvaćena površina magnetskih silnika ovisi o korisnoj duljini  $l$  svitka i širini  $\delta$  obuhvaćenog toka, pa je stoga derivacija magnetskog toka po vremenu (brzina promjene magnetskog toka):

$$\frac{d\Phi}{dt} = B l \frac{ds}{dt} = B l v, \quad (3)$$

gdje je  $v$  relativna brzina gibanja svitka u odnosu na magnetski tok.

Zakon elektromagnetske indukcije uvrštavanjem izraza (3) u (1) dobiva oblik:

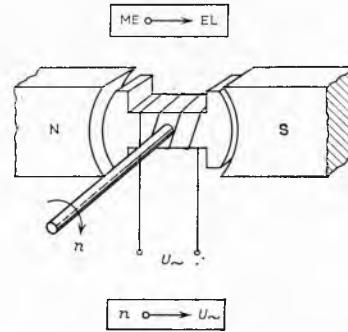
$$e = B l v N. \quad (4)$$

U ovom izrazu veličine  $B$ ,  $l$ ,  $N$  mogu biti konstantne i izražene zajedničkom konstantom  $k$ , pa je stoga inducirana EMS  $e$ , tj. električna mjerena veličina koju daje pretvarač, proporcionalna relativnoj brzini  $v$ , prema izrazu:

$$e = k v. \quad (5)$$

Mjereći brzinu može se odrediti put s i ubrzanje  $a$ , jer je  $s = \int v dt$  i  $a = dv/dt$ . Budući da je integriranje i deriviranje lako provedivo jednostavnim električnim sklopovima, mogu se pretvarači na bazi tih fizičkih zakonitosti upotrijebiti za mjerjenje puta, brzine i ubrzanja bilo kružnog bilo pravocrtnog (vibracijskog) gibanja.

Navedene veličine za *kružno gibanje* mjeri se primjenom rotacijskih pretvarača koji su konstruirani kao istosmerni generatori s nepomičnim magnetima N—S na statoru i pomičnim rotorskim namotom i kolektorom, ili kao izmjenični generatori sa statorskim i rotirajućim polovima (sl. 3). U namotu ovakvih pretvarača inducira se napon  $U_{\text{~}}$  kojemu su amplituda i frekvencija ovisne o brzini okretanja rotora, tj. vratila stroja na koji je pretvarač priključen. S pomoću ovakvog pretvarača mogu se mjeriti: kutna brzina  $\omega$  i brzina vrtnje  $n = \omega/2\pi$ , zatim iz ovih izvedene veličine kao što su broj okretaja



Sl. 3. Rotacijski pretvarač s trajnim magnetima

$$u = \frac{1}{2\pi} \int \omega dt \text{ i kutno ubrzanje } \varepsilon = \frac{d\omega}{dt}.$$

Odgovarajuće veličine za *pravocrtno vibracijsko gibanje*, npr. amplituda i brzina (frekvencija  $f_x$ ) titranja mehaničkih konstrukcija, mjeri se pomoću elektrodinamičkog pretvarača čiji mjerni

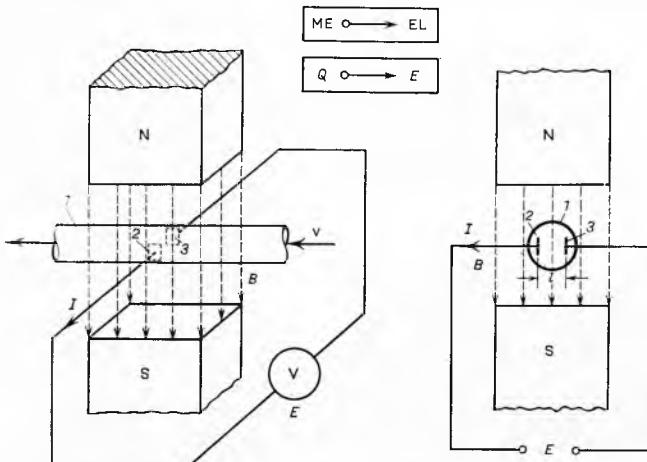
indukcijski svitak titra (uslijed titranja ispitivane konstrukcije na koju je pričvršćen) u nepomičnom magnetskom polju trajnog magneta N—S (sl. 4), pri čemu se u svitku inducira napon  $U$  određene amplitudine i frekvencije. Pravocrtno gibanje vodljive tekućine brzinom  $v$  u nekom prikladnom magnetskom polju indukcije  $B$ , inducira u tekućini napon  $E$  koji je određen izrazom:

$$E = B l v. \quad (6)$$

Zamisao primjene te pojave potječe od M. Faraday (1791–1867), a praktički je ostvarena tek nedavno konstrukcijom pretvarača (davača) za mjerjenje brzine strujanja  $v$  i protoka  $Q$  tekućina. Pretvarač (sl. 5) sastoji se od izolirane cijevi  $1$  smještene okomito na smjer polja trajnog magneta N—S. Dijametralno na presjek cijevi postavljene su dvije elektrode  $2$  i  $3$ , a njihova je spojna linija, tj. razmak  $l$ , okomita na smjer silnika magnetskog polja indukcije  $B$ . U tekućini koja struji kroz cijev brzinom  $v$  inducira

Sl. 4. Elektrodinamički pretvarač vibracijskog gibanja.  $1$  Dio konstrukcije koja se ispušta,  $2$  spoj svitki s konstrukcijom,  $3$  svitak u kom se inducira napon,  $4$  trajni magnet učvršćen na podlogu koja miruje

se prema jedn. (6) napon  $E$ , koji je mjera za brzinu strujanja tekućine. Uz poznati presjek  $S$  cijevi dobiva se protok iz jednadžbe  $Q = S v (\text{m}^3/\text{s})$ , pa je izmjereni napon  $E$  mjeri i za protok tekućine  $Q$ .



Sl. 5. Davač za mjerjenje brzine strujanja tekućine.  $1$  Cijev kroz koju struji tekućina,  $2$  i  $3$  elektrode,  $I$  razmak elektroda, N—S trajni magnet

Umjesto trajnog magnetskog polja upotrebljava se u savremenim električnim mjerilima protoka izmjenično magnetsko polje, proizvedeno svinčima uzbudnjem izmjeničnom strujom. Pri protjecanju tekućine inducira se u pretvaraču izmjenični napon, čime se otklanja pojava elektrolize, koju izaziva istosmjerna struja, i omogućava primjena jednostavnih izmjeničnih pojačala.

**Indukcijski pretvarači s promjenljivim magnetskim otporom.** Promjena magnetskog otpora može se izazvati također ako i magnetsko polje i induksijski svitak miruju. Ako se između magnetskog polja i svitka stavi željezo pogodnog oblika koje se giba pod utjecajem mjerene neelektrične veličine (npr. rotacije), mijenja se magnetski otpor, a uslijed toga i magnetski tok što ga obuhvaća svitak pretvarača. Time se inducira napon ovisan o mjerenoj mehaničkoj veličini.

**Piezoelektrični pretvarači.** Piezoelektrični efekt, koji su detaljno proučili braća Curie 1880., očituje se u tome da se pri mehaničkom pritisku na pločicu koja je isječena (u određenom položaju prema električnim osima) iz nekih kristala (kvarca, turmalina, Seignetteove soli, amonijum-dihidrogenfosfata) ili je izradena od specijalne keramičke mase (barijum-titanata, barijum-cirkonata) javljaju električni naboji na plohamu na koje se pritišće. Ova se pojava tumači dielektričnom polarizacijom pozitivnih i negativnih atomskih naboja u pločici (v. *Elektricitet*,

statički). U piezoelektričnim pretvaračima (sl. 6) takve su pločice 2 smještene između dvije metalne elektrode 1, pomoću kojih se prenosi tlak na pločice. Naboј  $Q$ , koji se na taj način dobije, proporcionalan je iznosu mjerene sile  $F$  i piezomodulu  $d$ , koji karakterizira prirodu primjenjene piezoelektrične tvari:

$$Q = F d. \quad (7)$$

Piezomoduli imaju za tvari koje se češće upotrebljavaju, ako se sila  $F$  izrazi u kilopondima (kp), a naboј  $Q$  u koulonima (C), ove vrijednosti: Seignetteova sol  $100 \cdot 10^{-9}$ , amonijum-dihidrofosfat  $20 \cdot 10^{-9}$ , barijum-titanat  $0,33 \cdot 10^{-9}$ , kvarc  $0,0226 \cdot 10^{-9}$  C/kp. Seignetteova sol (rošelska sol) i ostali umjetni kristali pokazuju veliki piezoelektrični efekt, ali se ipak primjenjuju samo za manje sile i u ograničenom opsegu jer su osjetljivi prema toplini i vlazi, a pored toga im je mehanička čvrstoća mala.

Količina električnog naboјa  $Q$  koji nastaje djelovanjem sile  $F$  određuje se mjerjenjem napona  $U$  na koji se nabija kondenzator kapaciteta  $C$ .

Taj je napon općenito

$$U = \frac{Q}{C}; \quad (8)$$

uvršćenjem izraza (7) dobiva se jednadžba

$$U = \frac{F d}{C}. \quad (9)$$

Strmina pretvarača određena je (kako je naprijed rečeno) omjerom izlazne i ulazne veličine, u ovom slučaju omjerom  $U/F [\text{V}/\text{kp}]$ . Ako se ovdje umjesto  $U$  upotrijebi izraz (9) u kojem se za kapacitet uvrsti vrijednost  $C_k$  za kapacitet kondenzatora što ga tvori sama pločica kristala i pripadne elektrode, izraz za strminu glasi:

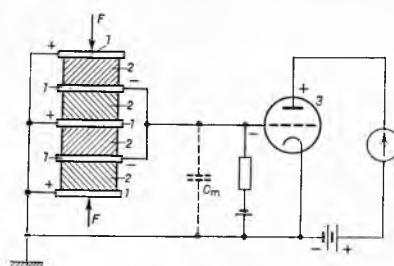
$$\frac{U}{F} = \frac{F d}{C_k F} = \frac{d}{C_k}. \quad (10)$$

Budući da se piezoelektrični pretvarač uvijek priključuje na mjeri uredaj preko kabela, pri izračunavanju strmine čitatog ovog sloga treba uzeti u obzir i zajednički kapacitet  $C_m$  kabela i uredaja. Strmina ovakve kombinacije dana je izrazom:

$$\frac{U}{F} = \frac{d}{C_k + C_m}, \quad (11)$$

tj. bitno je manja od strmine dane jednadžbom (10).

Da bi se postigli viši mjeri naponi, može se uzeti više ( $n$ ) kristala i to tako da se mehanički stavljuju u seriju, a električki



Sl. 7. Osnovni mjeri spoj višestrukog piezoelektričnog davača.  $1$  Elektrode,  $2$  pločice od kvarca,  $3$  elektronika,  $4$  mjeri instrument

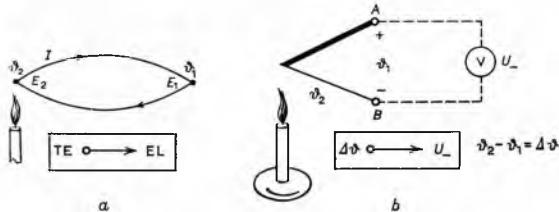
spajaju paralelno (sl. 7). Time se u skladu s izrazom (9) dobiva mjeri napon:

$$U = \frac{n d F}{n C_k + C_m}. \quad (12)$$

Elektrode 1 piezokristala 2 mogu se radi povišenja mernog napona priključiti na elektronsku cijev 3, a tek zatim na pokazni instrument 4.

#### Pretvaranje toplinskih veličina u električne

Mjerenje temperature zasniva se na tzv. termoelektričnom efektu (Seebeck 1821). Spoje li se dvije žice različitih metala ili legura električki vodljivo na oba kraja (sl. 8 a) i grijte li se jedno od tih spojišta na temperaturu  $\vartheta_2$  dok drugo ostaje na sobnoj temperaturi  $\vartheta_1$ , na svakom od oba spojna mjesta javljaju se termoelektromotorne sile  $E_2$  i  $E_1$  koje imaju suprotan smjer.



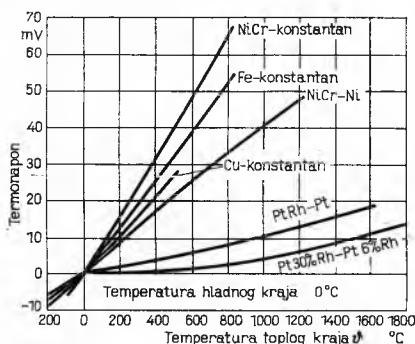
Sl. 8. Termopar kao pretvarač toplinske energije u električnu

U ovom zatvorenom krugu struja će teći samo ako je  $E_2 \neq E_1$ , tj. kad je  $\vartheta_2 \neq \vartheta_1$ . Voltmetar uvršten u krug takva termopara pokazivat će razliku termoelektromotornih sile (sl. 8 b), tj. termo-napon  $U_-$ . Istosmjerni termonapon  $U_-$  ovisan je o vrsti obaju metala ovakva *termoelementa*, o razlici  $\Delta\vartheta$  temperature  $\vartheta_1$  hladnog kraja i temperature  $\vartheta_2$  toplog kraja, a određen je izrazom:

$$U = k(\vartheta_2 - \vartheta_1) = k\Delta\vartheta. \quad (13)$$

Konstanta  $k$  ovisna je o materijalu objiju žica (termopara), ali nije ovisna o njihovim geometrijskim dimenzijama. Mjerenjem napona između hladnih krajeva može se odrediti temperatura  $\vartheta_2$  spojnog mesta, tj. toplog kraja, samo ako je poznata temperatura hladnih krajeva (npr.  $0^\circ\text{C}$  ili  $20^\circ\text{C}$ ). Napon koji nastaje pri razlici temperature  $\Delta\vartheta = 1$  stupanj naziva se termoelektrična sila, a ima red veličine mikrovolta. Najviša poznata termoelektrična sila iznosi  $520 \mu\text{V}$ , a daje ju termopar silicij-bizmut.

**Termoelektrični pretvarači.** Postoji mnoštvo kombinacija metala i legura iz kojih se mogu sastaviti termoparovi, ali u praksi se najčešće primjenjuju termoparovi: nikalkrom-konstantan (NiCr-konst.), željezo-konstantan (Fe-konst.), nikalkrom-nikal (NiCr-Ni), zatim platinarodijum-platina (PtRh-Pt). Prvospomenuti metal ovih termoparova predstavlja pozitivni pol termoelementa. Karakteristike ovih termoparova, tj. termonaponi  $U$ , kao funkcija razlike temperature  $\Delta\vartheta$  prikazane su na sl. 9.



Sl. 9. Karakteristike termoparova

Poredbena temperatura, tj. temperatura hladnog kraja, iznosi ovdje  $0^\circ\text{C}$ . Granične temperature za trajni pogon, tj. najviše dozvoljene pogonske temperature, za različite su termoparove različite, a vidljive su i iz dijagrama. Termoelement volfram-volframmolibden daje mogućnost mjerjenja do  $3000^\circ\text{C}$ . Termoelektričnim pretvaračima smije se oduzimati samo veoma mala snaga ( $\sim 10^{-6} \text{ W}$ ), kako u njima ne bi došlo do većeg pada napona i ugrijavanja, a time i do iskrivljjenja izmijerenih podataka.

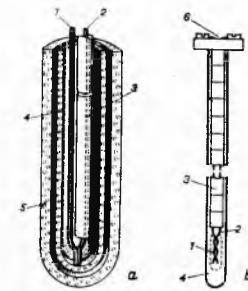
Pri mjerenu temperature termoelementom poredbena temperatura, tj. temperatura hladnog kraja, mora biti što stalnija. Priklučna glava termoelementa obično ne zadovoljava ovaj zahtjev, jer se i ona ugrije pri mjerenu, pa se stoga vodiči termopara moraju proizvesti vodom izjednačenja do tačke koja ima dovoljno konstantnu temperaturu. Kod jeftinjih termoparova kod izjednačenja sastoji se od jednakog materijala kao i termoelement. Kod skupih (platinskih) termoparova i onih načinjenih od visokoomskog materijala (npr. NiCr-Ni) vodovi za izjednačenje su od jeftinog materijala velike vodljivosti, čiji se otpor u širem temperaturnom području ponaša kao i otpor termopara na koji su priključeni.

Izvedba termoelementa i njihova metalna i keramička zaštita (slika 10) ovisne su o visini temperature i agresivnosti atmosfere ili medija čija se temperatura mjeri. Termoelementi za dinamička mjerjenja moraju imati mali toplinski kapacitet, a time i malu vremensku konstantu.

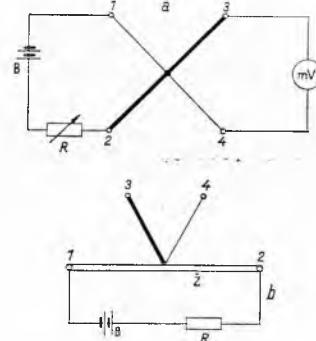
*Termokriž* (Klemencić 1892) po principu rada sliči termoelementu, s tom razlikom što se u njega grijanje spojnjog mesta vrši električnom strujom. On nastaje time što se dvije žice od različitih metala spoje u njihovoj sredini (sl. 11 a). Služi za mjerjenje vrlo malih struja i, posredno, za mjerjenje vakuuma (na principu toplinske vodljivosti, o tome v. str. 655). Struja grijanja priključuje se na jedne krajeve (1–2) para različitih metala, a na drugim se krajevima (3–4) mjeri termonapon. Pri bažđarenju termokriža istosmernom strujom iz izvora B nastaju ove pogreške: a) na termonapon između krajeva 3–4, koji je proporcionalan kvadratu struje grijanja, djeluje Peltierov efekt (Peltier 1834), suprotan Seebeckovom efektu, koji se sastoji u tome da se spojno mjesto pri prolazu istosmjerne struje u smjeru termonapona hlađi, tako da grijanje, a time i termonapon, na krajevima 3–4 postaju manji; b) zbog otpora spojnjog mesta dolazi i do pada napona u dolaznom i odlaznom strujnom krugu. Utjecaj Peltierovog efekta može se zaobići tako da se termokriž sastavi od jednog termopara 3–4 (sl. 11 b) i jedne ogrjevne žice (Ž) na koju je termopar prislonjen.

#### Pretvaranje optičkih veličina u električne

Za pretvorbu optičke energije u električnu, odnosno za pretvorbu nekih optičkih veličina u električne, primjenjuju se fotoelektrični pretvarači čiji se rad temelji na fotoelektričnom efektu (Hallwachsuvu efektu), tj. na pojavi da se djelovanjem svjetla na neke tvari (kalijum, cezijum, rubidijum, selen, silicijum i dr.) oslobađaju elektroni. Fotoelektrični efekt može biti unutrašnji i vanjski. Unutrašnji fotoelektrični efekt karakteriziran je time što se pod utjecajem fotona oslobađaju naboji u unutrašnjosti svjetlosti obasjanih tvari ili na zapornom sloju između vodiča i poluvodiča. Ako oslobođeni naboji neposredno izazivaju nastanak električnog napona ili električne struje, doći će se tvorevine zovu *fotoelementi* (fotogalvanski pretvarači) i idu u grupu aktivnih pretvarača. Ako, pak, oslobođeni naboji samo mijenjaju unutarnji otpor dotičnih tvari (poluvodiča), ove se naprave zovu *fotootpornici* i idu u grupu pasivnih pretvarača. Vanjski fotoelektrični efekt karakteriziran je time što obasjavanjem nekih čvrstih vodiča ili poluvodiča (fotokatoda) dolazi do emisije



Sl. 10. Termoelement u prijelu. 1 i 2 vodiči termopara, 3 keramička izolacija vodiča, 4 unutrašnja zaštitna cijev, 5 vanjski zaštitni plasti, 6 priključne stezaljke



Sl. 11. Način spajanja termokriža. a) Grijanje spoja pomoću vodiča termopara, b) grijanje posebnom ogrevnom žicom Ž; 1 i 2 priključci za struju grijanja, 3 i 4 priključci za mjerjenje termonapona

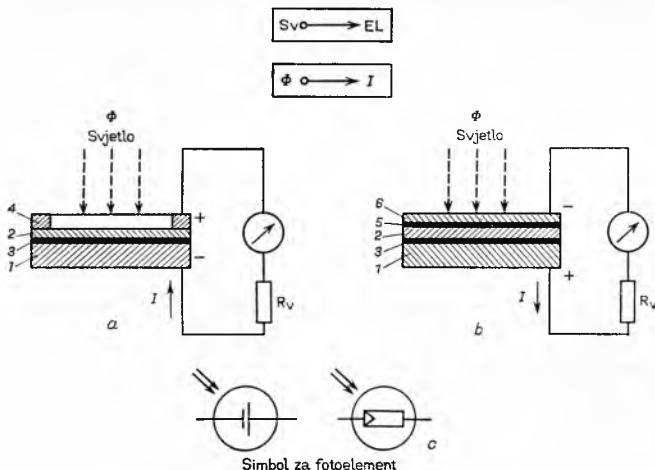
## ELEKTRIČNA MJERENJA

elektrona. Ovi se elektroni pod djelovanjem električnog polja između elektroda, priključenih na vanjski izvor struje, gibaju u zatvorenom (evakuiranom ili plinom punjenom) prostoru u smjeru od katode prema anodi. Ovakva tvorevina, sastavljena od fotokatode i anode, zatvorena u staklenu cijev određena obliku, predstavlja fotoemisiju pretvarač poznat pod nazivom *fotočelijska*. Budući da je za gibanje oslobođenih elektrona potrebno električno polje koje daje vanjski izvor struje, fotočelijske se ubrajamaju u grupu pasivnih pretvarača.

**Fotoelementi**, kao aktivni pretvarači, pretvaraju svjetlosnu energiju u električnu djelovanjem fotoelektričnog efekta na zapornim slojima koji nastaju između poluvodiča i metalne podloge na koju je ovaj nanesen, ili između poluvodiča i prozirnog tankog (mikronskog) metalnog premaza kojim je poluvodič prevučen. Za praktičnu primjenu dolaze najviše u obzir fotoelementi od ovih poluvodiča: bakar(I)-oksid ( $Cu_2O$ ) (na bakru), selen (Se) (na željezu) i silicijum (Si) (na željezu). Najveću snagu daje ovaj posljednji.

Fotogalvanski pretvarači (fotoelementi) mogu biti izvedeni kao fotoelementi sa stražnjim slojem i fotoelementi sa prednjim slojem.

**Fotoelementi sa stražnjim slojem** (sl. 12 a) sastoje se od poluvodiča 2 koji je nanesen na metalnu podložnu ploču 1 kao tanka prozirna prevlaka. Pri tehnološkoj (toplinskoj) obradi fotoelementa stvara se zaporni sloj 3 između poluvodiča i podloge.



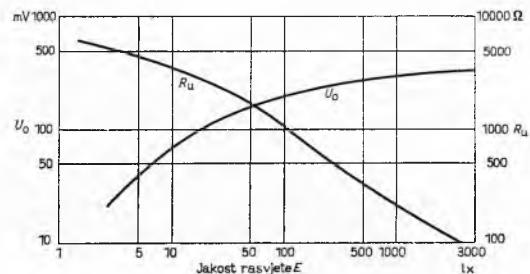
Sl. 12. Fotoelement; a sa stražnjim slojem, b sa prednjim slojem, c simbol za fotoelement. 1 Metalna podloga, 2 poluvodič, 3 stražnji zaporni sloj, 4 kontaktni prsten, 5 prednji zaporni sloj, 6 metalna prozirna prevlaka

Utjecajem svjetla koje prolazi kroz tanki sloj poluvodiča oslobođaju se na graničnoj plohi (zapornom sloju) elektroni, koji se skupljaju na metalnoj podložnoj ploči. Električna struja u vanjskom strujnom krugu teče od kontaktne metalne ploče 4, prislonjene na poluvodič (plus-pol), preko vanjskog tereta  $R_v$  i vraća se na podložnu metalnu ploču 1 (minus-pol). Ova izvedba fotoelementa (npr. s poluvodičem  $Cu_2O$ ) osjetljiva je pretežno na svjetlo veće valne duljine (570–1400 nm, crveno i infracrveno), jer sloj poluvodiča svjetlo manje valne duljine uglavnom apsorbira, a samo svjetlo veće valne duljine prolazi kroz njega do zapornog sloja.

**Fotoelementi s prednjim slojem** (sl. 12 b) izrađeni su od poluvodiča 2 koji je prevučen izvanredno tankom prozirnom metalnom prevlakom 6 (zlato, platina, bakar) koja ujedno služi kao priključna elektroda. Pri toplinskoj obradi fotoelementa nastaje, pored zapornog stražnjeg sloja 3 između metalne podloge 1 i poluvodiča 2, još jedan zaporni sloj 5, prednji, između poluvodiča i metalne prevlake 6. Ako poluvodički premazi propušta još nešto malo svjetla, pored fotoelektričnog efekta na prednjem sloju 5 javlja se i na stražnjem sloju 3 fotoelektrični efekt čija je EMS suprotna i znatno manja od EMS prednjeg sloja. Rezultirajući je napon dakle razlika ovih dvaju napona, a prevladava napon prednjeg zapornog sloja, pa u vanjskom strujnom krugu teće fotostruja  $I$ , suprotna struja u fotoelementu sa stražnjim

zapornim slojem. Zbog neznatne apsorpcije svjetla u tankoj metalnoj prevlaci 4 fotoelementi s prednjim slojem imaju maksimalnu osjetljivost u kratkovalnom svjetlosnom području (npr. s poluvodičem  $Cu_2O$  u području 300–600 nm).

Svojstva i ponašanje fotoelementa prikazana su njihovim karakteristikama. Statička karakteristika selenskog fotoelementa



Sl. 13. Statička karakteristika selenskog fotoelementa

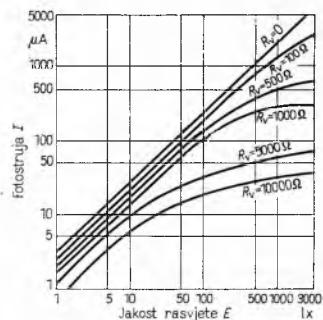
(sl. 13) predstavlja ovisnost napona  $U_0$  (u mV) o jakosti rasvjete (osvetljenošći) (u luksima). Unutarnji otpor  $R_u$  fotoelementa se smanjuje povećanjem jakosti rasvjete, što je također prikazano na ovom dijagramu.

Ako se na fotoelement priključi teretni otpor  $R_v$ , fotostruja će biti određena izrazom:

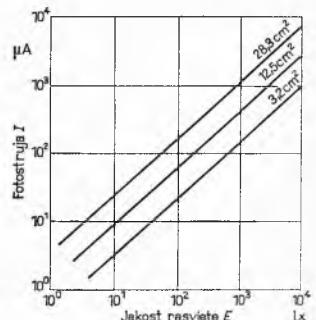
$$I = U_0 / (R_u + R_v). \quad (14)$$

Pomoću ovog izraza i statičke karakteristike može se odrediti iznos fotostruje u ovisnosti o jakosti rasvjete  $E$  i vanjskog otpora  $R_v$ , pa se tako dobiva dinamička karakteristika fotoelementa (sl. 14). Iz ove se karakteristike vidi da je fotostruja  $I$  linearno ovisna o jakosti rasvjete  $E$  kad je  $R_v = 0$ , tj. samo u kratkom spoju. Fotostruja  $I$  je nadalje ovisna i o geometrijskim dimenzijama, tj. svjetlom obasjanoj površini fotoelementa, što se može zaključiti iz karakteristike na sl. 15; EMS fotoelementa, naprotiv, neovisna je o njegovim geometrijskim dimenzijama.

Vlastiti kapacitet fotoelementa relativno je vrlo velik (iznosi  $\sim 40\ 000 \text{ pF/cm}^2$ ), jer su oni u stvari kondenzatori s izvanredno tankim dielektrikom, koji predstavlja zaporni sloj. Vlastiti kapacitet  $Cu_2O$ -fotoelementa je manji od kapaciteta selenskih fotoelementa, pa stoga oni prvi imaju i manju tromost prema izmjeničnim strujama.  $Cu_2O$ -fotoelementi pri frekvenciji od 3000 Hz pokazuju smanjenje osjetljivosti za  $\sim 10\%$ , a selenski fotoelementi imaju ovoliko smanjenje osjetljivosti već pri frekvenciji između 50 i 500 Hz. Germanijumske fotodiode, koje rade na istom principu, sastavljene su od monokristala i metalnog šiljka površine  $\sim 1 \text{ mm}^2$ , one imaju neznatan vlastiti kapacitet, pa se mogu primjenjivati i za pulzacijsku svjetlosti reda veličine MHz.



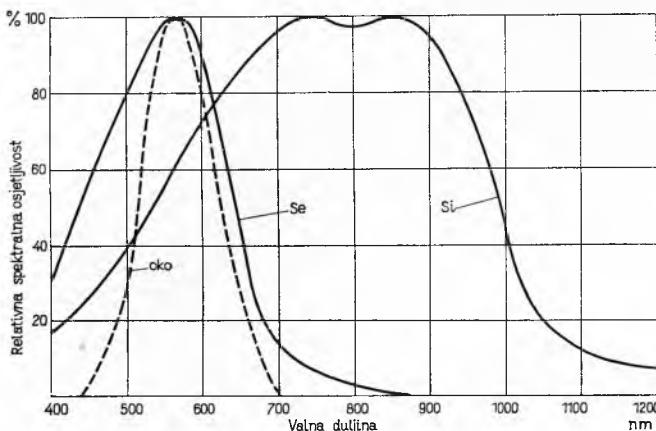
Sl. 14. Dinamička karakteristika fotoelementa



Sl. 15. Ovisnost fotostruje o jakosti rasvjete i dimenzijama fotoelementa

Relativna spektralna osjetljivost fotoelementa ovisi o vrsti poluvodiča od koje su načinjeni. Selenski fotoelement osjetljiviji je na manje valne duljine; osjetljivost mu se približno podudara sa spektralnom osjetljivošću oka. Silicijumski i germanijumski fotoelementi osjetljiviji su na veće valne duljine, dakle na crveno i infracrveno zračenje (sl. 16).

Fotoelementi, tj. fotoelektrične naprave sa zapornim slojem, podvrgnuti su starenju, pa se njihova svojstva i ponašanje stabiliziraju tek nakon izvjesnog vremena starenja. Karakteristike



Sl. 16. Relativna spektralna osjetljivost fotoelementa

istovrsnih fotoelementa razlikuju se od elementa do elementa, pa se u slučaju potrebe parovi jednakih karakteristika pronalaze izborom iz veće grupe raspoloživih fotoelementa.

### Pretvaranje kemijske u električnu energiju

Pretvorba kemijske energije u električnu zbiva se u galvanском ili Voltinom članku (ćeliji, elementu); takav je članak sastavljen od jedne ili više otopina elektrolita u koje su urođene dvije vodljive elektrode. Kroz takav članak teče struja kad u njemu vrla elektrokemijska neravnoteža; ona može biti prouzrokovana time što su elektrode različite i/ili time što su elektroliti u susjedstvu elektroda različiti, također time što su, uz jednake elektrode i otopine istog elektrolita u njihovu susjedstvu, različite koncentracije tih otopina (tzv. *konzentracijski članak*). U slučaju elektrokemijske neravnoteže javlja se na elektrodama galvanskog članka elektromotorna sila, koja može poslužiti kao mjeru za kemijski sastav otopine elektrolita, specijalno kao mjeru njegove kiselosti ili lužnatosti, karakterizirane koncentracijom vodikovih iona ispitivane otopine. Ta se koncentracija redovito izražava *pH-vrijednošću* otopine.

Svaka vodena otopina elektrolita sadrži, pored neutralnih molekula vode i elektrolita, također pozitivne i negativne ione nastale iz molekul elektrolitskog disocijacijom. Od molekula vode samo je vrlo mali dio elektrolitski disociran na pozitivne ione  $H^+$  i negativne ione  $OH^-$ :



Eksperimentalno je utvrđeno da je u litri čiste vode  $10^{-7}$  molova  $H_2O$  disociранo na  $10^{-7}$  molova iona  $H^+$  i  $10^{-7}$  molova iona  $OH^-$ . Ako je u vodi otopljenia kisela tvar, koncentracija je iona u otopini veća od  $10^{-7}$  molova u litru, ako je u njoj otopljenia bazična tvar, veća je od  $10^{-7}$  mol/l koncentracija iona  $OH^-$ . Prema zakonima kemijske ravnoteže umnožak koncentracija iona  $H^+$  i  $OH^-$  u svim je vodenim otopinama konstantan i jednak kao u čistoj vodi, tj. iznosi  $10^{-7} \cdot 10^{-7} = 10^{-14}$  mol/l. Prema tome i bazične otopine sadrže ion  $H^+$  (a kisele otopine ion  $OH^-$ ). Npr. vrlo bazična otopina u kojoj je koncentracija  $OH$ -iona  $c_{OH} = 1 = 10^0$  mol/l ima koncentraciju  $H$ -iona  $c_H = 10^{-14}/10^0 = 10^{-14}$  mol/l. Koncentracija vodikovih iona može dakle služiti kao mjeru ne samo za kiselost nego i za bazičnost otopina: ako je ta koncentracija  $> 10^{-7}$ , otopina je kisela, ako je  $< 10^{-7}$ , ona je bazična. Što je vrijednost eksponenta od 10 u broju koji izražava koncentraciju vodikovih iona (dekadskog logaritma koncentracije  $H$ -iona) veća (tj. njegova negativna vrijednost manja), to je otopina kiselja (manje bazična). Negativna vrijednost dekadskog logaritma koncentracije  $H$ -iona (koja je redovito pozitivan broj) označuje se sa  $pH$  (često, radi jednostavnosti, sa  $pH$ ) i naziva *pH-vrijednošću* (pehata):

$$pH = -\log c_H \quad (16)$$

Skala  $pH$ -vrijednosti koje se susreću u praksi ide približno od 1 do 14; čista voda ima  $pH = 7$ , kisele otopine  $pH < 7$ , bazične otopine  $pH > 7$ .

Na sl. 17 shematski je prikazan galvanski članak koji može služiti za određivanje  $pH$ -vrijednosti mjeranjem napona. Obje su elektrode tog članka tzv. *vodikove elektrode*, tj. elektrode kojima je površina prevučena poroznom platinom i zasićena plinovitim vodikom; jedna (lijeva) elektroda zaronjena je u otopinu nepoznate koncentracije vodikovih iona  $c_H$  (u njoj treba odrediti  $pH$ ), druga (desna) zaronjena je u otopinu koja sadrži vodikove ione u koncentraciji  $c_{H_0} = 1$  mol/l (normalnu otopinu neke kiseline). Temperatura neka je  $20^\circ C$ .

Prema W. Nernstu za EMS takvog galvanskog članka vrijedi jednadžba

$$E = \frac{R T}{n F} \ln \frac{a_1}{a_2} \approx \frac{R T}{n F} \ln \frac{c_1}{c_2},$$

gdje je  $R$  opća plinska konstanta ( $R = 8,312$  Ws/mol  $^\circ K$ ),  $T$  apsolutna temperatura,  $n$  broj ekvivalenta u molu iona elektrolita,  $F$  Faradayeva konstanta (električni naboј jednog ekvivalenta iona,  $F = 96\,493$  As/mol),  $a_1$  i  $a_2$  aktiviteti, a  $c_1$  i  $c_2$  koncentracije elektrolita u otopinama uz elektrode. Za razrijedene otopine može se bez velike greške umjesto s aktivitetima računati s koncentracijama. (V. *Elektrokemijska*, također Teorija galvanskog elementa u članku *Baterija, električna*.) Za članak prema sl. 17 vrijedi prema tome jednadžba

$$E = \frac{R T}{n F} \ln \frac{c_H}{c_{H_0}}. \quad (17a)$$

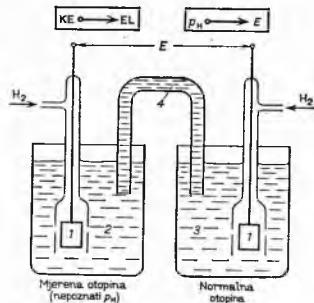
Uvrste li se u tu jednadžbu vrijednosti za  $R$ ,  $F$ ,  $n (= 1)$ ,  $T = 273,2 + 20 = 293,2$   $^\circ K$  i  $c_{H_0} = 1$  i prede li se na dekadiske logaritme, dobiva se (u voltima)

$$E = 0,0581 \log c_H \quad (17b)$$

Iz jedn. (16) i (17b) slijedi

$$E = 0,0581 pH. \quad (18)$$

Prema toj jednadžbi može se  $pH$ -vrijednost ispitivane otopine odrediti mjeranjem EMS polučlanka  $H_2$ /ispitivana otopina prema normalnoj vodikovoj elektrodi na  $20^\circ C$ . Vrijednosti  $pH = 1$  odgovara elektromotorna sila od  $58,1$  mV. Oписанi članak predstavlja aktivni pretvarač kojemu je ulazna veličina  $pH$ -vrijednost ispitivane otopine, a izlazna veličina EMS  $E$ , koja se mjeri prikladnim mjernim postupcima.



Sl. 17. Koncentracijski elektrokemijski članak. 1 Vodikove elektrode, 2 otopina s nepoznatom pH-vrijednošću, 3 otopina s poznatom pH-vrijednošću, 4 tekućina za povezivanje

### PASIVNI MJERNI PRETVARAČI

U pasivnim mernim pretvaračima mjerene nenelektrične veličine (npr. tlak) uzrokuju promjenu jednog od karakterističnih električnih svojstava pretvarača (npr. otpora) a da se pri tome u samom pretvaraču ne stvara elektromotorna sila. Merni uređaji na koje su pasivni pretvarači priključeni moraju stoga biti uključeni u krug napajan vlastitim izvorom struje.

Neelektrična veličina koja utječe na pripadnu električnu veličinu preko pasivnog mernog pretvarača stoji s njom u određenom i kvantitativno definiranom odnosu.

Osnovna električna svojstva na koja se može utjecati nenelektričnim veličinama jesu: električni otpor, induktivitet i kapacitet, pa se stoga pasivni merni pretvarači dijele na tri osnovne grupe: *otporske pretvarače, induktivitetske pretvarače i kapacitetske (konzenzatorske) pretvarače*.

### Otporski pretvarači

Ovi merni pretvarači djelovanjem nenelektrične veličine mijenjaju svoj električni otpor, pa time utječu na iznos struje u strujnom krugu mernog uređaja u koji su uključeni. S obzirom na svoje agregatno stanje, otporski pretvarači mogu biti čvrsti, tekućinski i plinski. Čvrsti otporski pretvarači izrađuju se od vodiča, tj. metalnih otporskih žica, ili od poluvodiča, već prema svrsi za koju su predviđeni.

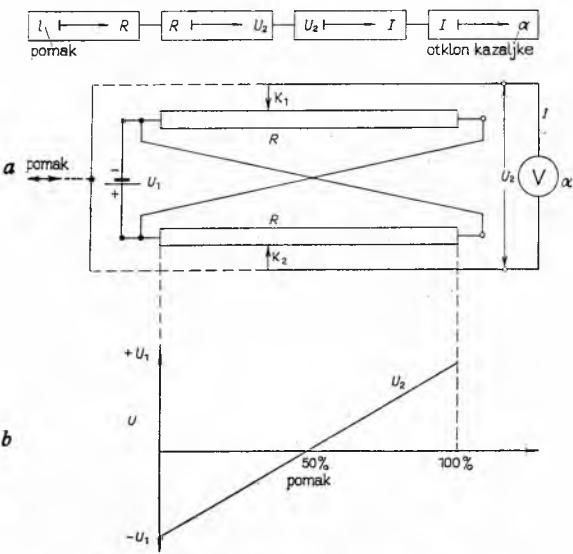
**Žični merni otporski pretvarači.** Izbor svojstava vodiča od kojeg je izrađen žični pretvarač ovisan je o vrsti nenelektrične veličine koja se želi mjeriti. Osnovno svojstvo svih vodiča je veća ili manja ovisnost njihovog električnog otpora o temperaturi. Za mjerjenje mnogih nenelektričnih veličina povoljno je da materijal pretvarača bude o temperaturi neovisan, ali električno mjerjenje temperature može se i osnovati upravo na ovisnosti otpora primijenjenih vodiča o temperaturi. Žični se merni otporski pretvarači mogu stoga podijeliti na *pretvarače s otporom neovisnim o temperaturi* i *pretvarače s otporom ovisnim o promjenama temperature*.

Žični otporski pretvarači s otporom neovisnim o temperaturi izrađuju se s otpornikom u obliku žice, trake ili prevlake od materijala sa što manjim temperaturnim koeficijentom električnog otpora  $\alpha$  (v. izraz 23), npr. od konstantana ( $40\cdots45\%$  Ni,  $55\cdots60\%$  Cu), legure s koeficijentom  $\alpha = -4 \cdot 10^{-8} \cdots +1 \cdot 10^{-5}/^\circ\text{C}$ . Žični otporski pretvarači s otporom ovisnim o temperaturi izrađuju se obično od nikla ili platine, kojima je koeficijent  $\alpha = 3,85 \cdot 10^{-8}/^\circ\text{C}$ , odn.  $6,17 \cdot 10^{-8}/^\circ\text{C}$ . U žičnim otporskim pretvaračima s otporom neovisnim o temperaturi promjena električnog otpora izaziva se bilo promjenom njihove aktivne duljine, obično pomoću kliznika (otporski pretvarači s kliznikom) a ponekad i uronjavanjem žice u dobro vodljivu tvar, bilo elastičnom deformacijom njihova vodiča (rastezne mjerne trake). U žičnim otporskim pretvaračima s otporom ovisnim o temperaturi promjena otpora nastaje dakako neposredno djelovanjem temperature (otporski termometri).

Otporski pretvarači s kliznikom mogu, prema zahtjevima mjerena, imati kliznik s gibanjem pravocrtnim, kružnim, helikoidnim, s karakteristikom linearnom ili nelinearnom (npr. sinusnom). Za pomicanje kliznika potrebna je neka sila, koja treba da je što manja, kako pretvarač ne bi opterećivao uređaj na kome se obavlja mjerena i time smanjio tačnost određivanja mjerene veličine. Otporski se pretvarači uključuju u strujni krug bilo serijski bilo kao djelila napona ili u nekom drugom spoju; za tu svrhu imaju potreban broj priključnica.

Za pretvorbu (većih) pravocrtnih pomaka (nekoliko decimetara i više) može poslužiti sklop od dva paralelna otpornika  $R$  (sl. 18 a). Kliznici  $K_1$  i  $K_2$  mehanički su povezani i zajedno se pomiču pod utjecajem mjerene neelektrične veličine, tj. pomaka, te oduzimaju napon  $U_2$ , koji je linearno ovisan o položaju kliznika i predstavlja mjeru za njegov pomak (sl. 18 b).

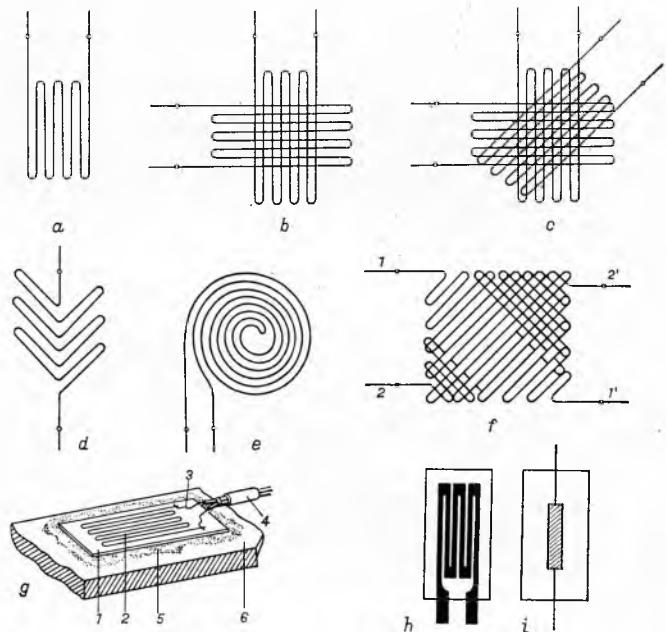
Umjesto pretvarača s pravocrtnim pomicanjem kliznika mogu se primijeniti otporski pretvarači s kružnim kretanjem kliznika (v. sl. 49), pa se time dobiva mogućnost pretvorbe kuta zaokreta u odgovarajući pad naponu.



Sl. 18. Žični otporski pretvarač pravocrtnih pomaka

Djelovanje rasteznih mjernih traka zasniva se na činjenici da se otpor vodiča pri elastičnoj deformaciji, npr. pri rastezanju, mijenja (Lord Kelvin 1856). Rastezne mjerne trake načinjene su bilo od tanke žice od konstantana promjera  $\sim 20 \mu\text{m}$ , koja je vijugavo prilijepljena na podlogu od papira (19 a do f), bilo od odgovarajućeg tankog metalnog sloja dobivenog jetkanjem metalizirane podloge od plastične mase po postupku za izradu tzv. štampanih krugova (19 h) ili od poluvodiča na podložnoj pločici (19 i). Ovakve se trake specijalnim ljepilom u svrhu mjerena pričvrste na objekt čije se rastezanje odnosno naprezanje želi mjeriti, pa se na taj način podvrgavaju jednakim uvjetima kao i sam ispitivani objekt.

Naprezanja u materijalu nekog mašinskog dijela ili neke čelične konstrukcije ne mogu se obično odrediti neposredno. Mjerne trake, međutim, omogućuju da se na površini takvih dijelova odredi npr. promjena njihove duljine prilikom opterećenja. Iz podataka o rastezanju može se onda po Hookeovom zakonu ( $\sigma = e E$ ) računski odrediti normalno naprezanje  $\sigma$  ako je poznat za dotični materijal modul elastičnosti  $E$  i relativno rastezanje ( $e$ ).



Sl. 19. Rastezne mjerne trake. a-f Različite izvedbe žičnih mjernih traka (1, 1' 2, 2' priključci); g pričvršćenje trake na ispitivani dio: 1 papirna podloga trake, 2 žica trake, 3 priključci, 4 priključni kabel, 5 ljepilo, 6 ispitivani dio; h traka s metaliziranim slojem; i poluvodička traka

Pri određivanju fizikalne ovisnosti između promjene duljine i promjene električnog otpora rastezne trake polazi se od izraza za otpor  $R$  okrugla vodiča, duljine  $l$ , presjeka  $S$  odnosno promjera  $D$ , načinjenog od materijala specifičnog otpora  $\varrho$ :

$$R = \varrho \frac{l}{S} = \varrho \frac{4l}{\pi D^2}. \quad (19)$$

Mehaničkim opterećenjem žice mijenjaju se njezina duljina  $l$  i promjer  $D$ , ovisno o smjeru naprezanja, pa stoga, da bi se dobio izraz za ovisnost otpora s tim varijablama, treba jednadžbu (19) parcijalno derivirati po njima. Nakon deriviranja i srednjivanja rezultat se podijeli s izrazom (19), pa se dobiva izraz za relativnu promjenu otpora:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - 2 \frac{dD}{D}. \quad (20)$$

Poissonova konstanta daje za pojedine materijale odnos između relativne promjene promjera  $dD/D$  i relativne promjene duljine  $dl/l$  pri elastičnoj deformaciji:

$$\mu = - \frac{dD}{D} : \frac{dl}{l}. \quad (21)$$

Poissonova konstanta ovisna je o materijalu žice, a može imati samo vrijednosti  $0 < \mu < 0,5$ ; za većinu materijala ona iznosi  $0,2\cdots0,4$ . Uvrsti li se vrijednost  $dD/D$  iz jednadžbe (21) u izraz (20) dobiva se izraz za ovisnost relativne promjene otpora o relativnoj promjeni duljine:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} (1 + 2\mu) = \frac{dl}{l} k, \quad (22)$$

gdje  $k$  predstavlja odnos između izlazne i ulazne veličine, koji se naziva faktorom bažarenja ili konstantom osjetljivosti trake; vrijednost joj je između  $\sim 1,5$  i  $1,8$ .

Otporne mjerne trake izrađuju se u različitim oblicima (za mjerjenje različnih vrsta naprezanja, kao vlaka, tlaka, torzije), različitim duljinama (3...300 mm), za mjerjenje na raznim tempe-

raturama (normalno do 70, a u posebnoj izvedbi i do  $600^{\circ}\text{C}$ ), s jednom ili više otporskih mjernih žica različnih omskih otpora (120, 300 i  $600\ \Omega$ ).

Otporne mjerne trake postavljaju se bilo izravno na dijelove koji se ispituju (uz primjenu posebnog ljepila, sl. 19 g) ili se primjenjuju u posebnim mernim napravama (rasteznim dozama, cilindrima, membranama i sl., v. npr. Brane, osmatranje, TE 2, str. 135). Montiraju se na dizalice, preše, cjevovode, brane itd. i služe za mjerjenje sile vlaka ili tlaka ( $2 \cdot 10^3 \dots 10^6\ \text{kp}$ ), zaokretnih momenata  $1 \dots 10^8\ \text{m} \cdot \text{kp}$ , tlaka plinova i tekućina do 3500 at i sl. Promjene otpora mernih traka, izazvane promjenom mehaničkog naprezanja, odnosno duljine ispitivanog objekta mjere se različitim sklopovima i mosnim spojevima (vidi str. 603).

*Otporski termometri.* Otpor čistih metala općenito raste s porastom temperature prema relaciji:

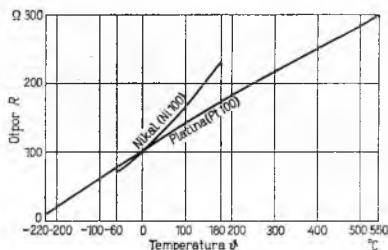
$$R_2 = R_1 [1 + a(\vartheta_2 - \vartheta_1) + \beta(\vartheta_2 - \vartheta_1)^2], \quad (23)$$

gdje je  $a$  prvi, a  $\beta$  drugi temperaturni koeficijent otpora, koji su oba pozitivni.  $R_1$  je otpor vodiča na temperaturi  $\vartheta_1$ , a  $R_2$  otpor vodiča na mjerenoj temperaturi  $\vartheta_2$ . Za uže područje temperature, npr. za razliku temperature  $100^{\circ}\text{C}$ , dovoljno je prepostaviti linearnu ovisnost otpora o temperaturi, tj. uzeti u obzir samo koeficijent  $a$  i zanemariti kvadratni član. U tom slučaju vrijedi:

$$R_2 = R_1 [1 + a(\vartheta_2 - \vartheta_1)] = R_1(1 + a\Delta\vartheta). \quad (24)$$

Prema tome, mjerjenjem električnog otpora  $R_2$ , uz poznati otpor  $R_1$  i poznati koeficijent  $a$ , može se odrediti temperatura. Pretvarači koji rade na tom principu i služe za određivanje temperature zovu se otporski termometri. Za šire temperaturno područje od više stotina stupnjeva treba uzeti u obzir i drugi temperaturni koeficijent  $\beta$ , pa se otpor vodiča izračunava prema tačnjem izrazu (23).

Otporski se termometri obično izrađuju tako da pri nekoj zadanoj temperaturi imaju određen (nominalni) otpor, koji se i obilježava na samom termometru. Npr. oznaka Pt 100 ili Ni 100 znači da je termometar načinjen od platinske odnosno niklene žice, koja na temperaturi  $0^{\circ}\text{C}$  ima otpor od  $100\ \Omega$ . Promjena otpora za ovakve termometre grafički je prikazana na sl. 20. Za mjerjenje otpora služe spojevi i metode opisane na str. 614.



Sl. 20. Ovisnost otpora žičnih otpornih termometara o temperaturi

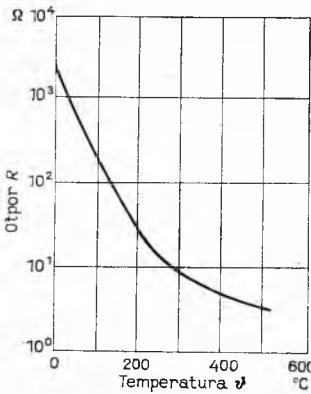
**Poluvodički otporski merni pretvarači.** Poluvodiči su u pogledu električnih svojstava relativno nestabilni i osjetljivi prema različnim vanjskim utjecajima. Na električno ponašanje poluvodiča utječe između ostalog temperatura, mehaničko naprezanje i jakost rasvjete. Ovo na prvi pogled loše svojstvo može se, međutim, na različite načine primijeniti upravo pri električnom mjerjenju neelektričnih veličina, pa se pretvarači izvedeni od poluvodiča mogu i podijeliti s obzirom na spomenute njihove ovisnosti o vanjskim utjecajima na poluvodičke otporske pretvarače s otporom ovisnim o temperaturi, s otporom ovisnim o pritisku i s otporom ovisnim o osvjetljenju.

*Poluvodički pretvarači s otporom ovisnim o temperaturi.* Za poluvodiče je karakteristično da imaju negativni temperaturni koeficijent električnog otpora, što je već 1834 ustanovio M. Faraday. Oko 1930 godine počeli su se za tehničke svrhe proizvoditi poluvodiči s negativnim temperaturnim koeficijentom otpora, koji je desetak puta veći od istog koeficijenta žičnih toplinskih pretvarača. Ovakvi poluvodički pretvarači pojavljuju se u praksi pod različnim (komercijalnim) imenima, kao što su

NTC (skraćenica riječi: Negative Temperature Coefficient), termistor itd., a načinjeni su u obliku štapića ili zrnca (zbog manjeg toplinskog kapaciteta, odnosno manje vremenske konstante), kao keramička smjesa različitih metalnih oksida (npr.  $\text{Cu}_2\text{O}$ ), oksidnih kristala i čistog germanijuma. Otpor ovakvog poluvodiča dat je približno izrazom:

$$R = R_0 e^{b/T}, \quad (26)$$

gdje je  $R_0$  otpor pri absolutnoj nuli ovisan o obliku i sastavu poluvodiča,  $b$  je konstanta ovisna o tvari poluvodiča, a  $T$  je absolutna temperatura. Grafički prikaz ovakve ovisnosti otpora  $R$  o temperaturi  $\vartheta$  za jednu vrstu i izvedbu poluvodiča dat je na sl. 21.



Sl. 21. Ovisnost otpora (jedne vrste) poluvodiča o temperaturi

tarnjeg otpora  $R_u$  i prelaznog otpora  $R_p$  pločica:

$$R = R_u + R_p. \quad (27)$$

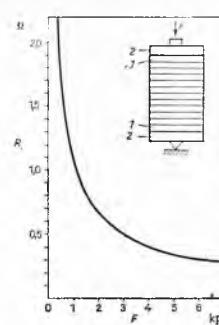
Prelazni otpor  $R_p$  ovisan je o sili  $F$  koja djeluje na ugljeni stupac (efekt graničnih ploha, koji se primjenjuje kod ugljenih mikrofona) i to tako da je produkt prelaznog otpora  $R_p$  i sile  $F$  konstantan:

$$R_p F = K. \quad (28)$$

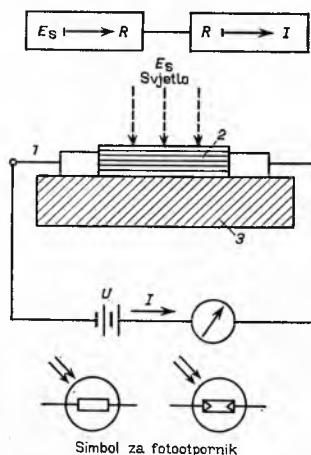
Ukupni je otpor stupca stoga jednak:

$$R = R_u + \frac{K}{F}. \quad (29)$$

Otpor dakle opada s povećanjem pritiska. Ovdje su  $R_u$  i  $K$  konstante ovisne o vrsti ugljenja i dimenzijama pločica. Ovisnost ukupnog otpora  $R$  o sili  $F$  prikazan je na slici 22 za stupac koji se sastoji od 50 ugljenih pločica debljine po 0,18 mm. Ovakvi su pretvarači robustni i mogu se mehanički preopteretiti, a služe za mjerjenje sile. Električna izlazna snaga im je velika, pa nije potrebno nikakvo pojačanje. Budući da je otpor stupca mali ( $5 \dots 10\ \Omega$ ), za rad je potreban niski napon ( $2 \dots 5\ \text{V}$ ). Vlastita frekvencija im je  $\sim 30\ \text{kHz}$ , pa mogu služiti i za mjerjenje brzih promjena. Vlaga i starenje ograničavaju vrijeme njihove upotrebe.



Sl. 22. Otporski ugljeni pretvarač. Gore: izgled. Krivulja: ovisnost otpora ugljenog pretvarača o tlaku



Sl. 23. Shema fotootpornika. 1 Priključnik, 2 fotootpor, 3 podloga od izolatora

*Poluvodički otporski pretvarači s otporom ovisnim o osvjetljenju (fotootpornici).* Gotovo svi poluvodiči su fotokonduktivni, što znači da se njihov unutarnji otpor  $R_u$  znatno smanjuje kada su izloženi djelovanju svjetla. Ova se pojava osniva na unutarnjem fotoefektu koji je osobito jak za selen, metalne sulfide (cink-sulfid, olovo-sulfid, kadmijum-sulfid), okside ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), germanijum i silicijum. Najprikladniji je fotootpornik (sl. 23) od kristala kadmijum-sulfida 2 nanesenog na podlogu od izolatora 3 s

# ELEKTRIČNA MJERENJA

priklučcima 1. Za djelovanje fotootpornika potreban je pomoći napon  $U$ , koji, već prema vrsti pretvarača, odn. njegovom unutarnjem otporu, može iznositi  $\sim 20\text{--}300$  V. Dozvoljena struja opterećenja manja je od 1 mA.

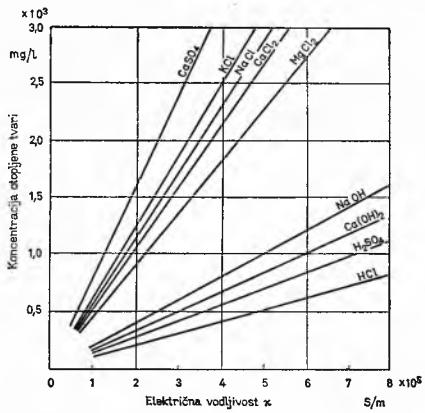
Fotootpornici mogu biti visokoomski ili niskoomski. Visokoomski fotootpornici imaju u mraku otpor  $\sim 10^8 \Omega$  (oni su dakle u mraku, praktički, izolatori) a s povećanjem jakosti rasvjete otpor im opada na  $\sim 10^4 \Omega$ . Niskoomski fotootpornici mijenjaju svoj otpor od  $\sim 10^4$  na  $10 \Omega$ . Ovisnost otpora o jakosti rasvjete prikazana je na sl. 24 za dva različita tipa fotootpornika. Prednost je fotootpornika što su mehanički dosta neosjetljivi, a negativna im je strana što su, kao svi poluvodiči, ovisni o temperaturi.

Sl. 24. Ovisnost otpora fotootpornika o jakosti rasvjete

u dosta velikoj mjeri ovisni o temperaturi.

**Tekućinski (elektrolitski) otporski pretvarači.** Vodene otopine elektrolita (baza, kiselina ili soli) mogu u principu neposredno ili posredno poslužiti za pretvaranje neelektričnih u električne veličine. Ovakva se mjerjenja mogu osnovati na tri osnovne promjene o kojima neposredno ovisi otpor otopine elektrolita: promjene geometrijskih dimenzija elektroda ili otopine među elektrodama, promjena temperature i promjena kemijskog sastava otopine. Prva dva utjecaja na otpor otopine elektrolita nemaju za mjerjenje u tehničkoj praksi većeg značenja. Elektrolitski pretvarači kojima otpor, odnosno vodljivost, ovisi o količini i vrsti u elektrolitlju otopljenih tvari služe za određivanje koncentracije takvih tvari u ispitivanim otopinama.

Kad se tvari u vodi otapaju dolazi do elektrolitske disocijacije, tj. do raspadanja molekulâ otopljenih tvari u katione i anione. Što je disocijacija veća to otopina elektrolita bolje vodi struju, tj. ima veću električnu vodljivost. Stupanj disocijacije ovisi o svim otopljenim elektrolitima koji se mogu disociрати, a također ovisi i o temperaturi otopine. Neotopljeni, dakle izlučene soli (u zasićenim otopinama) i suspendirane tvari ne utječu na vodljivost otopine elektrolita. Za jako razrijedene otopine postoji proporcionalnost između električne vodljivosti i koncentracije otopine, kao što je to vidljivo iz dijagrama na sl. 25 za različite elektrolite.

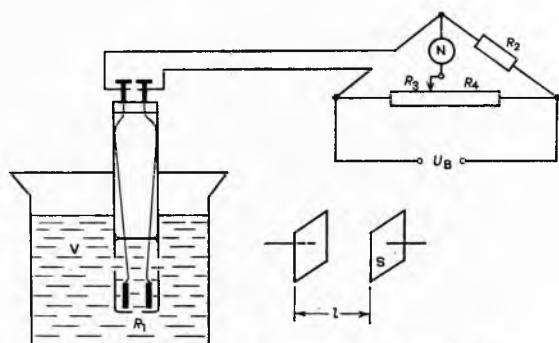


Sl. 25. Odnos između vodljivosti i koncentracije otopine elektrolita

O elektrolitskim čelijama i mjerenu električnu vodljivostu pomoću njih v. str. 620. Još jedan oblik elektrolitske čelije pokazuje sl. 26.

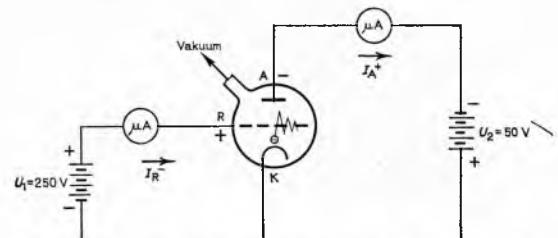
Iz određene vodljivosti može se prema dijagramu na sl. 25 odrediti koncentracija poznate vrste elektrolita u otopini.

**Plinski otporski pretvarači.** Na električnu vodljivost plinova, odnosno na prolaz struje kroz njih, mogu neposredno utjecati različne neelektrične veličine kao što su npr. razmak elektroda, gustoća (tlak) plina, temperatura plina, a posredno i jakost rasvjete. Od praktične je važnosti za mjeru tehniku samo utjecaj tlaka plina i utjecaj jakosti rasvjete.



Sl. 26. Čelija za mjerjenje vodljivosti otopine elektrolita

**Plinski pretvarači s otporom ovisnim o tlaku.** Primjer ovakvog pretvarača predstavlja elektronska cijev, trioda (sl. 27). Ona u staklenom balonu sadrži katodu  $K$  oko koje su koncentrično postavljene rešetke  $R$  i anodu  $A$ . Stakleni balon ima otvor za priključak na vakuumski uređaj kojemu treba mjeriti tlak. Re-

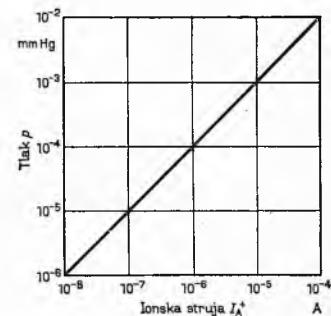


Sl. 27. Trioda kao plinski pretvarač s otporom ovisnim o tlaku

šetka  $R$  se u odnosu na katodu  $K$  nalazi na pozitivnom potencijalu  $U_1$  (da bi se osciliranjem elektronâ oko rešetke povećao njihov put), a anoda ima negativni potencijal  $U_2$ . Iz katode emitirani elektroni ubrzavaju se i sudaraju se s molekulama plina u balonu (čiji je tlak jednak tlaku u vakuumskom sistemu), te ih ioniziraju. Pozitivni ioni u prostoru između rešetke i anode sakupljaju se na anodi jer je ova negativna, a ioni koji nastaju u prostoru između katode i rešetke gibaju se prema katodi. Elektrone sabire pozitivna rešetka. Količina iona proporcionalna je količini plina i broju elektronâ raspoloživih za ionizaciju plina. Kvocijent anodne (ionske) struje  $I_A$  i struje rešetke (elektronske)  $I_R$  predstavlja mjeru za tlak  $p$  plina u mjerenoj elektronskoj cijevi, odnosno u vakuumskom uređaju:

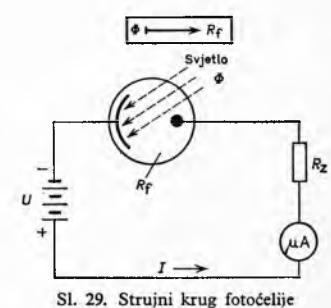
$$p = k \cdot I_A / I_R \quad (30)$$

gdje je  $k$  konstanta ovisna o dimenzijama i obliku mjerne triode, zatim o vrsti plina i o naponu između elektroda. Ovakav mjeri pretvarač pruža mogućnost kontinuiranog mjerjenja vakuma i to približno u području tlaka od  $10^{-8}$  do  $10^{-4}$  mmHg, a njegova je karakteristika prikazana na slici 28.



Sl. 28. Mjerna karakteristika triodnog vakuummetra

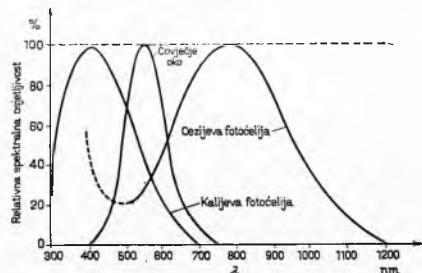
**Plinski pretvarači s otporom ovisnim o osvjetljenju (fotočelije).** U fotoemisionim pretvaračima, fotočelijama, iskorištava se vanjski fotoelektrični efekt, karakteriziran time što se iz svjetlosti obasjane fotokatode oslobađaju elektroni koji smanjuju u neku ruku unutarnji otpor fotočelije. Fotokatoda (od kalijuma, rubidijuma, cezija, barijuma itd. na srebrnoj



Sl. 29. Strujni krug fotočelije

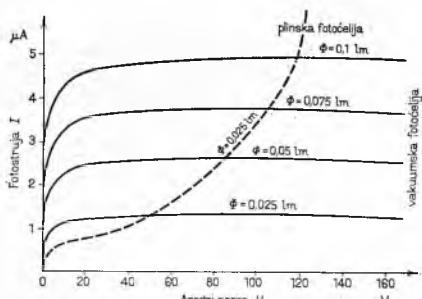
podlozi) i anoda prikladnog oblika zatvorene su u evakuiranu (ili razrijedenim plinom punjenu) staklenu cijev. Ako se između fotokatode i anode (sl. 29) priključi dovoljno visok (oko 100 V) istosmjerni napon  $U$  (napon ubrzanja), oslobođeni elektroni iz fotokatode gibaju se prema anodi, a u vanjskom strujnom krugu teče fotostruja  $I$ .

Spektralna osjetljivost fotoćelije ovisna je o materijalu fotokatode (sl. 30). Kalijumska fotoćelija osjetljiva je na modro svjetlo ( $\sim 300$  nm), a jedan maksimum osjetljivosti cezijumske fotoćelije nalazi se u području crvenog svjetla ( $\sim 800$  nm). Na spektralnu



Sl. 30. Relativna spektralna osjetljivost fotoćelije

osjetljivost utječe i kvalitet stakla od koga je načinjena cijev fotoćelije. Ako se staklena cijev fotoćelije evakuira, dobiva se *vakuumsku fotoćeliju*; fotostruja  $I$  koja teče u njezinom strujnom krugu proporcionalna je svjetlosnom toku  $\Phi$  (sl. 31). Vakumska foto-



Sl. 31. Karakteristike vakuumske (pune krivulje) i plinske (crtkana krivulja) fotoćelije

ćelija ima veliku trajnost i konstantnost karakteristike, pa se mnogo upotrebljava, unatoč svoje male osjetljivosti prema svjetlu, dakako u zajednici s odgovarajućim elektroničkim pojačalom. Osjetljivost fotoćelije povećava se ako se prostor između fotokatode i anode, tj. stakleni balon, napuni nekim inertnim plinom (neonom, argonom, helijonom) tlaka  $\sim 1 \text{ mmHg}$  (*plinska fotoćelija*). Elektroni koji se djelovanjem svjetla (fotoemisijom) oslobođaju iz fotokatode i ubrzavaju anodnim naponom  $U$  od  $\sim 100$  V vrše udarnu ionizaciju molekula plina s kojima se sudaraju na svojem putu prema anodi. Time nastali sekundarni elektroni i sami dalje udarima ioniziraju plinske molekule, pa ukupna struja elektrona postaje znatno veća od struje u vakuumskim fotoćelijama (v. *Električna pražnjenja u plinovima*). Da ova struja ne bi preko mjere narasla i oštetila fotoćeliju, u njezin strujni krug stavlja se zaštitni otpor  $R_Z$  (v. sl. 29). Jakost fotostruje je to veća što je intenzitet svjetlosnog toka veći i što je viši narinuti anodni napon. Ovo se vidi iz karakteristike na slici 31. U pogledu reagiranja vakuumska fotoćelija brža je od plinom punjene, pa se stoga primjenjuje za svjetlosne impulse iznad 5 kHz.

Vakuumske fotoćelije s dodatnim elektrodama za sekundarnu emisiju (dinodama) zovu se *fotomultiplikatori*. U takvim elektronkama postoji osim fotokatode i anoda više meduelektroda od kojih svaka iduća ima viši napon. Površina tih meduelektroda ( $P_1$  do  $P_6$ ) premažana je tankim slojem materijala koji jako emitiра sekundarne elektrone (npr.  $\text{Ag}-\text{Cs}_2\text{O}-\text{Cs}$ ). Fotoelektroni koji izlaze iz katode bivaju ubrzani i na prvoj dinodi ( $P_1$ ) stvaraju sekundarne elektrone; ovi opet istim načinom stvaraju elektrone na drugoj dinodi, itd. Tako se u ovoj vrsti fotoćelija po-

stiče vrlo veliko povećanje fotostruje (npr. na  $10^6$ -struko), pa stoga fotomultiplikatori služe kao davači koji reagiraju na neznatne izvore svjetlosti (npr. na scintilaciju).

Geigerov brojač, koji služi za mjerjenje radioaktivnog zračenja, u osnovi je također fotoelektrički primač, obično ograničen na vrlo snažne kvante, koji prouzrokuju fotoionizaciju i oslobođanje elektrona bilo sa stijena brojača ili u plinu kojim je brojač ispunjen.

### Induktivitetski mjeri pretvarači

Rad induktivitetskih pretvarača podvrgnut je zakonitostima magnetskog kruga, a osniva se na promjeni induktiviteta pretvarača u ovisnosti o promjeni neelektričnih veličina. Induktivitet svitka (solenoida), koji u osnovi predstavlja pretvarač (davač), određen je izrazom:

$$L = \frac{\mu N^2 S}{l} = \mu N^2 G, \quad (31)$$

gdje znači:  $S$  površinu okomitog presjeka svitka,  $\mu$  permeabilnost,  $N$  broj zavoja,  $l$  srednju duljinu magnetskih silnica i  $G = S/l$  faktor oblika svitka.

Sve tri veličine iz izraza (31), tj. permeabilnost  $\mu$ , broj zavoja  $N$  i geometrijski faktor oblika svitka  $G$ , mogu se mijenjati pod utjecajem mjerene neelektrične veličine, pa se i induktivitetski mjeri pretvarači mogu podijeliti na odgovarajuće grupe.

Ako su dva svitka magnetski povezana, treba uzeti u obzir i djelovanje međuinduktiviteta  $M$ , koji je ovisan o induktivitetima pojedinih svitaka ( $L_1$  i  $L_2$ ) i o faktoru međuinduktiviteta  $k$ , prema izrazu:

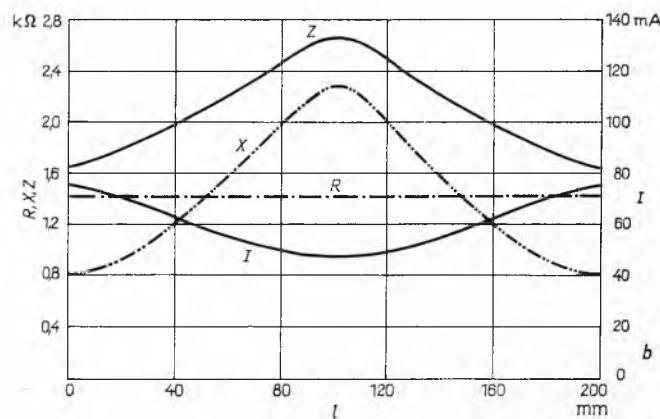
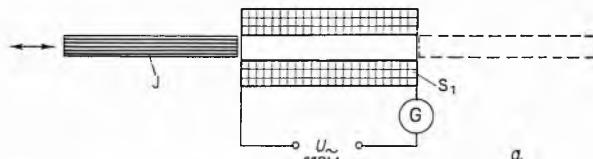
$$M = k \sqrt{L_1 L_2}. \quad (32)$$

Induktivitetski mjeri pretvarači predstavljaju pasivne mjerne uređaje koji se uvrštavaju u strujni krug pripadne mjerne aparature napajane konstantnim (stabiliziranim) izmjeničnim naponom. Oni imaju impedanciju (kompleksni otpor)

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \quad (33)$$

koja se mijenja u ovisnosti o promjenama mjerene neelektrične veličine; proporcionalno impedanciji  $Z$  mijenja se i struja ili napon u krugu mjerne aparature. Ako je induktivitetski pretvarač dio jednog titrajnog kruga, uslijed utjecaja neelektrične veličine može se mijenjati i frekvencija.

Do promjene induktiviteta pretvarača dolazi većinom zbog mijenjanja jedne od geometrijskih veličina njegova svitka uslijed promjene nekog puta. Indukcijskim pretvaračima mogu se



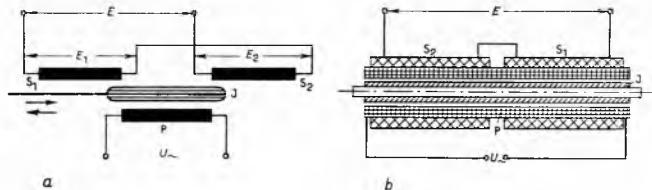
Sl. 32. Induktivitetski pretvarač s uzdužnom kotvom. a) Shematski prikaz, b) ovisnost vrijednosti  $I$ ,  $R$ ,  $X$  i  $Z$  o duljini

prema tome mjeriti sve neelektrične veličine koje se mogu svesti na promjenu puta.

**Mjerni pretvarači s induktivitetom ovisnim o promjeni djelujuće površine svitka i o međuinduktivitetu.** Ovisno o obliku izvedbe takvi pretvarači mogu biti predviđeni za mjerjenje pravocrtnih ili kružnih (kutnih) pomaka.

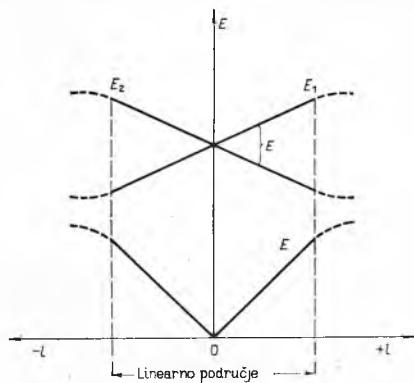
*Mjerni pretvarač s uzdužnom jezgrom* sastoji se od svitka  $S_1$  i pomicne lamelirane željezne jezgre  $J$  jednako duge kao i svitak, koja se pod djelovanjem neke neelektrične veličine uvlači u svitak i izvlači iz njega (sl. 32 a, b). Na sl. 32 b prikazana je promjena induktivnog otpora  $X$  i impedancije  $Z$  nekog svitka sa ovisnosti o položaju jezgre. Radni (djelatni) otpor  $R$  nije dakako ovisan o položaju jezgre, ali je induktivni otpor ( $X = \omega L$ ) to veći što je jezgra više uvučena u svitak. Vektorskim zbrajanjem radnog otpora  $R$  i induktivnog otpora  $X$ , odnosno primjenom izraza (33), dobiva se impedancija  $Z$  za pojedine položaje jezgre. Uz poznati stabilizirani narinuti izmjenični napon  $U$  dobiva se struja  $I$  koja je mjera za pomak  $l$  [ $I = U/Z = f(l)$ ]. Ova se struja, a dakako i pomak  $l$ , može pokazivati na mernom instrumentu  $G$  koji mjeri struju što je uzima svitak u različitim položajima jezgre. Područje primjene ovog pretvarača jesu promjene dužine reda veličine centimetra, milimetra ili desetinke milimetra.

*Diferencijski transformator kao mjerni pretvarač* (sl. 33) sastoji se od primarnog svitka  $P$  i dva jednakata sekundarna svitka  $S_1$  i  $S_2$  spojena u seriji protusmjerno. Sva tri svitka smještена su koaksi-



Sl. 33. Diferencijski transformator. a) Shema spoja, b) razmještaj svitaka

jalno jedan do drugog. U njihovoj sredini nalazi se pomicna jezgra  $J$  od lameliranog željeza, pričvršćena na tijelo kojemu se mjeri pomak. Na primarni se svitak priključuje izmjenični napon  $U_{\sim}$  frekvencije 50 Hz do 20 kHz, ovisno o zahtjevima mjerjenja i konstrukciji pretvarača. Izmjenično magnetsko polje proizvedeno od primarnog svitka inducira u sekundarnim svicima napone  $E_1$  i  $E_2$  ovisne o položaju jezgre  $J$  na koju djeluje mjerena neelektrična veličina. Rezultantni izlazni napon protusmjerno spojenih sekundarnih svitaka jednak je  $E = E_1 - E_2$ , tj. razlici pojedinačnih napona. Ovisnost izlaznog napona  $E$  o pomaku  $l$  jezgre prikazana je karakteristikom na sl. 34. Za jednu izvedbu diferencijskog



Sl. 34. Napon diferencijskog transformatora kao funkcija pomaka jezgre

transformatora osjetljivost na linearnom dijelu karakteristike pri radnom (primarnom) naponu od 6 V i 50 Hz iznosi npr. 1,2 do 8 mV/0,01 mm. Dimenzije diferencijskih transformatora ovisne su o njihovoj namjeni, tj. o području mjerjenja pravocrtnih ili kružnih pomaka (u kružnim izvedbama transformatora). Mjerene veličine kreću se od reda veličine stotinke milimetra do metra. Pomoću diferencijskih transformatora mogu se mjeriti sve one

nelektrične veličine koje se mogu svesti na promjenu duljine (puta).

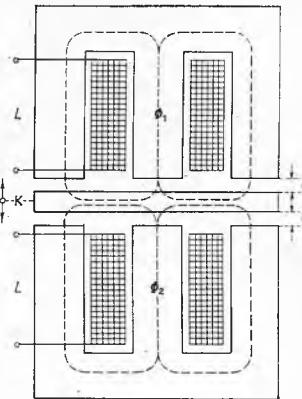
**Mjerni pretvarači s induktivitetom ovisnim o promjeni raspora između kotve i jarma.** *Mjerni pretvarač s poprečnom kotvom* služi za mjerjenje malih puteva (pomaka) i njihovih promjena. Da bi se postigla što veća osjetljivost i za mjerjenje što prikladnija ovisnost induktiviteta o promjeni puta, pretvarač je načinjen od dva svitka sa željeznom jezgrom induktiviteta  $L_1$  i  $L_2$ , sa četiri zračna raspora  $\delta$  (sl. 35) i poprečne kotve  $K$ . Magnetski tokovi  $\Phi_1$  i  $\Phi_2$  obaju svitaka ne utječu jedan na drugi. Pomakom kotve  $K$  pod utjecajem mjerene veličine (promjene puta), npr. prema gore, zračni raspori postaju iznad kotve manji, a ispod kotve veći, pa se time i induktiviteti  $L_1$  i  $L_2$  svitaka mijenjaju u suprotnom smislu. Time se dobiva dvostruka osjetljivost i linearizacija mjerne karakteristike pretvarača. Frekvencija primijenjenog mernog napona može biti različita, a ovisna je o namjeni i području primjene pretvarača. Npr. izvjesna vrsta pretvarača konstruiranih za pogonske frekvencije 50, 500 i 1000 Hz ima osjetljivost reagiranja 10, 5 odnosno 2  $\mu\text{m}$ . Glavno područje primjene ovih pretvarača je mjerjenje hraptovosti površine.

Modifikacija tog pretvarača s jednim induktivnim svitkom i s podložnom pločom (limom) od mekog željeza umjesto kotve služi za mjerjenje debljine nemagnetičnih, para-magnetičnih ili dijamagnetičnih slojeva (v. str. 652).

**Induktivitski pretvarači s promjenljivom permeabilnošću.** Promjena permeabilnosti može se u željeznoj jezgri pretvarača postići npr. unutrašnjim naprezanjima ili promjenom temperature oko Curieove tačke (tačke prelaza iz feromagnetskog u paramagnetsko stanje). Na promjeni permeabilnosti uslijed naprezanja (magnetoelasticitetu) osnivaju se magnetoelastični pretvarači, a na prelazu u paramagnetsko stanje pretvarač s ugrijanom žicom.

**Magnetoelastični pretvarač.** Neki feromagnetski materijali, npr. legura od 50% nikla i 50% željeza, imaju svojstvo da im se permeabilnost mijenja s promjenom mehaničkog naprezanja kome su izloženi. Ovo se svojstvo naziva *magnetoelasticitet* i pojava je suprotna magnetostrikciji. (Materijali koji se u magnetskom polju izdužuju imaju pozitivnu magnetostrikciju, a materijali koji se skraćuju, negativnu.) Na predznak i tok promjene permeabilnosti pri različitim opterećenjima utječe materijal jezgre, način opterećenja (tlak, vlek, torzija) i magnetska indukcija u jezgri pretvarača. Utjecaj opterećenja (naprezanja) na magnetska svojstva materijala (krivulju magnetiziranja) vidljiv je iz krivulje magnetiziranja jezgre načinjene od limova legure nikla i željeza (sl. 36). U materijalima s pozitivnom magnetostrikcijom permeabilnost  $\mu$  opada pri tlačnom opterećenju, pa se krivulja magnetiziranja napregnutog materijala razlikuje od krivulje nenaopregnutog materijala. Magnetoelastični efekt pruža stoga mogućnost mjerjenja sile, tlaka i zaokretnog momenta bez relativnog pomaka (puta).

*Magnetoelastični mjerni pretvarač* (sl. 37) sastoji se od jezgre  $J$ , npr. od limova legure Ni-Fe, oko koje je namotan svitak  $2$ .

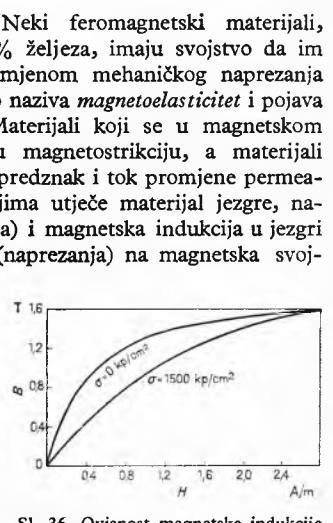


Sl. 35. Induktivitetski mjerni pretvarač s poprečnom kotvom

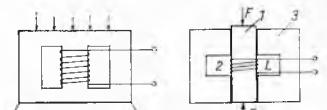
Glavno područje primjene ovih pretvarača je mjerjenje hraptovosti površine.

Modifikacija tog pretvarača s jednim induktivnim svitkom i s podložnom pločom (limom) od mekog željeza umjesto kotve služi za mjerjenje debljine nemagnetičnih, para-magnetičnih ili dijamagnetičnih slojeva (v. str. 652).

**Induktivitski pretvarači s promjenljivom permeabilnošću.** Promjena permeabilnosti može se u željeznoj jezgri pretvarača postići npr. unutrašnjim naprezanjima ili promjenom temperature oko Curieove tačke (tačke prelaza iz feromagnetskog u paramagnetsko stanje). Na promjeni permeabilnosti uslijed naprezanja (magnetoelasticitetu) osnivaju se magnetoelastični pretvarači, a na prelazu u paramagnetsko stanje pretvarač s ugrijanom žicom.



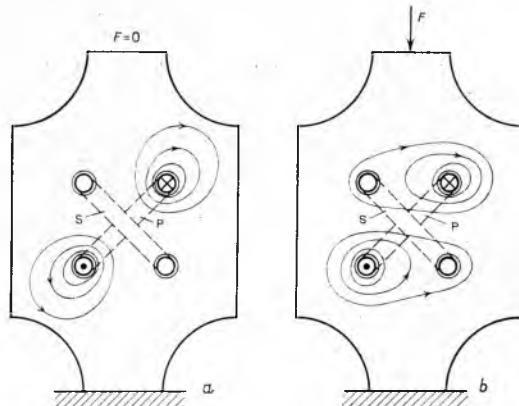
Sl. 36. Ovisnost magnetske indukcije  $B$  o mehaničkom opterećenju



Sl. 37. Magnetoelastični mjerni pretvarač: a) za veće sile, b) za manje sile. 1) Jezgra od specijalne legure, 2) svitak, 3) jaram od limova

Jarmom od limova 3 smanjuje se rasipni magnetski tok i povećava osjetljivost pretvarača. Pri tlačnom opterećenju (silom  $F$ ) opada permeabilnost jezgre, pa se smanjuje induktivitet  $L$  svitka. Ako se jezgra izvede s presjekom pogodne veličine, ovim se pretvaračem, koji se u tehničkoj praksi naziva *presdutor* (presinduktor), mogu mjeriti sile od nekoliko ponda do više megaponda.

Presdutor manjih dimenzija sastoji se od zakovicama spajenih limenih ploča u koje su izbušene četiri rupe na vrhovima kvadrata (sl. 38). Kroz ove su rupe namotana dva svitka u ravniama koje su jedna na drugoj okomite. Ako kroz primarni svitak P teče izmjenična struja (50 Hz), u sekundarnom (na primarni okomitom) svitku neće se inducirati nikakav napon, kako se vidi iz shematskog prikaza silnica pripadnog magnetskog toka



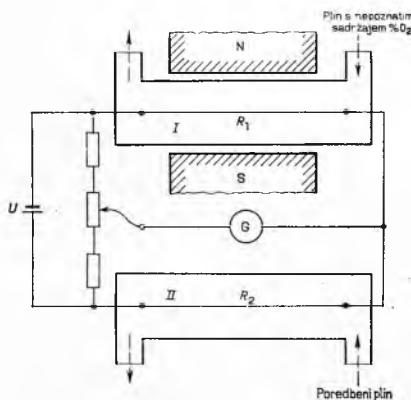
Sl. 38. Raspored silnica neopterećenog (a) i opterećenog (b) presdutora

(sl. 38 a). Pri djelovanju sile  $F$  (tlaka ili vlaka) na ploče presdutora mijenja se magnetski otpor između izbušenih rupa, pa silnice magnetskog toka poprimaju drugačiji smjer, obuhvate i sekundarni svitak (sl. 38 b), te u njemu induciranu neki napon, koji je u određenom području upravno proporcionalan mjerenoj sili.

Magnetoelastični pretvarači rade sa specifičnim opterećenjem do oko  $800 \text{ kp/cm}^2$  i to u području elastičnih deformacija, tj. u području važenja Hookeova zakona. Da greška mjerena zbog mehaničke histerezze bude što manja, materijali takvih pretvarača podvrgavaju se umjetnom starenju. Oni se upotrebljavaju za mjerjenje sila tlaka ili vlaka  $10^2 \dots 10^6 \text{ kp}$ , a rade s tačnošću od  $\sim 2\%$ .

Magnetoelastični efekt, na osnovu presdutorskog principa, može se iskoristiti kao *torduktor* za električno mjerjenje zaokretnog momenta vratila.

Pretvarač s ugrijanom žicom (sl. 39) služi za određivanje sadržaja kisika ( $O_2$ ) u smjesama plinova (npr. dimnim plinovima,



Sl. 39. Shema spoja pretvarača s induktivitetom ovisnim o permeabilnosti plina (kisika)

plinovima koji izlaze iz metalurških peći itd.), a temelji se na jačoj paramagnetičnosti kisika. Ispitivan plin struji kroz komoru

I u kojoj je razapeta platinska žica ugrijana na  $\sim 300^\circ \text{C}$ . U drugoj komori II, napunjenoj poredbenim plinom poznatog sastava, tlaka i temperature, nalazi se isto takva žica. Obje žice predstavljaju otpornike otpora  $R_1$  i  $R_2$  uključene u mosni spoj. Komora I izvrgnuti je djelovanju jakog magnetskog polja proizvedenog od stalnog magneta (Al-Ni-Co). Zbog djelovanja među magnetskim poljem i paramagnetskim česticama plina nastaje u komori dodatno strujanje plina (magnetski vjetar), što izaziva povećano hlađenje pripadne platinske žice, a time i promjenu njezina otpora. Strujanje plina, promjena otpora  $R_1$  platinske žice i poremećenje ravnoteže mjernog mosta ovisno je o sadržaju kisika u ispitivnom plinu. Stoga se može nulindikator mosta (galvanometar) baždariti izravno u postocima  $O_2$ .

### Kondenzatorski mjerni pretvarači

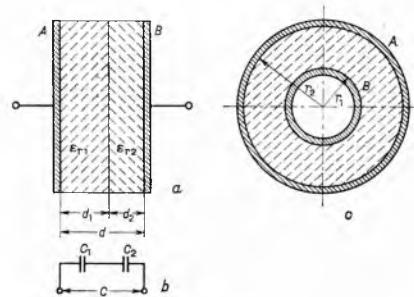
Djelovanje kondenzatorskih mjernih pretvarača osniva se na činjenici da se kapacitet kondenzatora mijenja s promjenom geometrijskih dimenzija kondenzatora (npr. promjenom površine ili razmaka elektroda) i promjenom materijala dielektrika. Promjenom jedne od ovih veličina mijenjaju se onda, uz isti napon na elektrodama, električna indukcija i električni tok, odn. električni naboј, koji je u tom slučaju nosilac informacija. Od mnogih mogućih oblika kondenzatora upotrebljavaju se za mjerne pretvarače samo pločasti i cilindrički kondenzatori.

Pločasti kondenzatori s paralelnim pločama i homogenim dielektrikom imaju kapacitet:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d}, \quad (34)$$

gdje je  $\epsilon_0$  influenciona konstanta,  $\epsilon_r$  relativna dielektričnost,  $S$  površina ploča,  $d$  razmak među njima.

U mernim pretvaračima primjenjuju se također pločasti kondenzatori s višeslojnim dielektrikom (sl. 40 a, b), koji predstavlja



Sl. 40. Višeslojni (a, b) i cilindrični (c) kondenzator

serijski spoj dvaju kondenzatora kapaciteta  $C_1$  i  $C_2$ . Za kapacitet takvog kondenzatora vrijedi općenito izraz:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}, \quad (35)$$

odnosno, pri zadanim debljinama dielektričnih slojeva  $d_1$ ,  $d_2$  i njihovih relativnih dielektričnosti  $\epsilon_{r1}$ ,  $\epsilon_{r2}$ :

$$C = \frac{A \epsilon_0}{\frac{d_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}}}. \quad (36)$$

Cilindrički kondenzator (sl. 40 c) sastoji se od vanjskog (A) i unutarnjeg (B) metalnog plašta s poljmerima  $r_2$  i  $r_1$  između kojih se nalazi dielektrik dielektričnosti  $\epsilon$ . Kapacitet ovog kondenzatora određen je izrazom:

$$C = \frac{2 \pi \epsilon_0 \epsilon_r l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{2 \pi \epsilon_0 \epsilon_r l}{\ln \frac{D_2}{D_1}}. \quad (37)$$

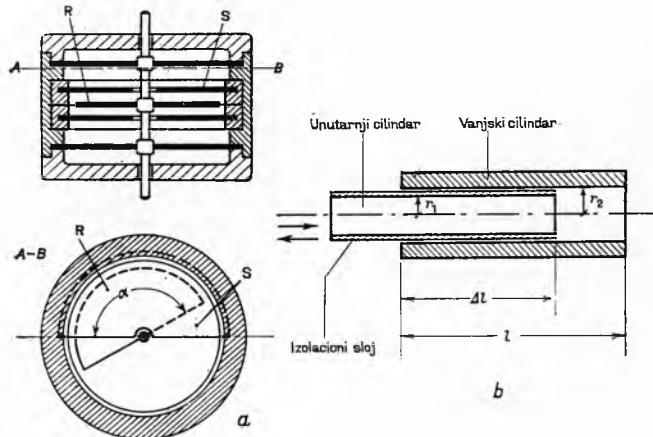
Prostor između plaštova može po svojoj duljini  $l$  biti djelomično ispunjen različitim dielektricima (npr. dijelom nekom tekućinom a dijelom zrakom), pa se stoga tako nastali kondenzator može smatrati paralelnim spojem više kondenzatora, dakle

$$C = C_1 + C_2 + \dots \quad (38)$$

Pločastim se kondenzatorom mogu mjeriti pomaci (duljine) reda veličine mikrometra (mikrona); za mjerjenje velikih pomaka, reda veličine metra, primjenjuje se cilindrički kondenzator. Za način i metodu električnog mjerjenja mjerodavna je relativna promjena kapaciteta  $\Delta C/C$  do koje dolazi pri promjeni nenelektrične veličine. Iz ove se vrijednosti može zaključiti koliki je mjerni signal i koliko mora biti mjerno pojačanje (elektroničkog pojačala).

Polazeći od izraza (34 i 37) i uočavajući u njemu sadržane nenelektrične veličine, vidi se da su moguće tri osnovne vrste kondenzatorskih pretvarača: pretvarači s kapacitetom ovisnim o površini elektroda, pretvarači s kapacitetom ovisnim o razmaku elektroda i pretvarači s kapacitetom ovisnim o dielektriku.

**Pretvarači s kapacitetom ovisnim o aktivnoj površini elektroda** izrađuju se kao pločasti ili kao cilindrični kondenzatori. Jedna vrsta ovih pretvarača načinjena je npr. kao zaokretni pločasti kondenzator (sl. 41 a) s dvije ili nizom statorskih (S) i jed-

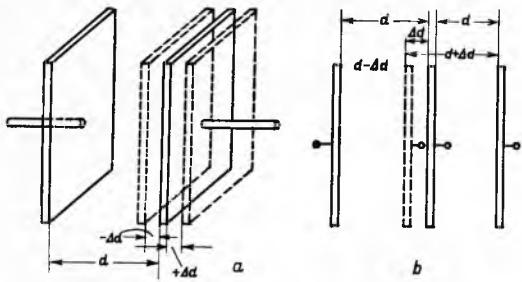


Sl. 41. Kondenzatorski pretvarači s kapacitetom ovisnim o površini elektroda.  
a) Pločasti zaokretni kondenzator, b) cilindrični kondenzator.

nom ili više rotorskih (R) ploča, a služi za mjerjenje kuta zao-kreta  $\alpha$ . Zakonitost po kojoj se mijenja aktivna površina pri zao-kretu ovisi o obliku ploča zaokretnih kondenzatora. Obično se ploče oblikuju tako da je relativna promjena kapaciteta  $\Delta C/C$  pretvarača upravno proporcionalna relativnoj promjeni kuta  $\Delta\alpha/\alpha$  ili relativnoj promjeni površine  $\Delta S/S$  ploča koje se prekrivaju. Zaokretni moment potreban za zaokretanje rotora takva pretvarača je neznatan, reda veličine nekoliko  $\text{mp cm}$  ( $\approx 10^{-1} \text{ N m}$ ).

Za mjerjenje pravocrtnih pomaka ( $\Delta l$ ) može služiti pretvarač izveden od dva koncentrična pomična metalna cilindra (sl. 41 b). Na unutarnjem cilindru nalazi se izolacioni sloj što veće dielektričnosti  $\epsilon$ . Unutarnji cilindar može biti načinjen npr. od žice promjera  $2\text{--}4 \text{ mm}$ . Što je relativna promjena pomaka  $\Delta l/l$  veća to je veća i relativna promjena kapaciteta  $\Delta C/C$ .

**Pretvarači s kapacitetom ovisnim o razmaku elektroda kondenzatora** služe za mjerjenje malih pomaka  $\Delta d$ . Oni se mogu upotrijebiti za mjerjenje elastičnih izobličenja i rastezanja i za mjerjenje onih nenelektričnih veličina koje se mogu svesti na ove veličine (npr. sile, tlaka, ubrzanja, zaokretnog momenta, temperature itd.). U ovu grupu kondenzatorskih pretvarača, između ostalih, pripada i kondenzatorski mikrofon. U običnom pločastom



Sl. 42. Kondenzatorski pretvarači s kapacitetom ovisnim o razmaku ploča.  
a) Obični pločasti kondenzator, b) diferencijski kondenzator.

kondenzatoru s dvije ploče (sl. 42 a), među kojima se razmak  $d$  poveća za  $\Delta d$ , relativnoj promjeni razmaka odgovara relativna promjena kapaciteta, tj.  $\frac{\Delta d}{d} = -\frac{\Delta C}{C}$ , uz pretpostavku da je  $\Delta d$  znatno manje od  $d$ .

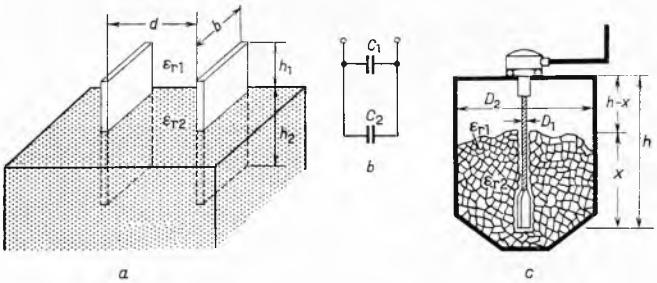
**Diferencijski kondenzator** (sl. 42 b) koji se sastoji od dvije nepomične krajnje ploče 1 i 2 i jedne pomične srednje ploče 3 ima pri mjerjenju nenelektričnih veličina sličnu ulogu. Pod utjecajem mjerene veličine mijenja srednja ploča svoj položaj za  $\Delta d$  u odnosu na ostale dvije, pa se time mijenjaju i kapacitet između njih.

Pri mjerjenju s kapacitivnim pretvaračima gotovo su uvijek potrebeni mjerni sklopovi za visokofrekventne struje, jer se pri djelovanju mjerjenih nenelektričnih veličina većinom radi o neznatnim promjenama kapaciteta. U tom slučaju kapacitet priključenih vodova treba da je što manji.

**Kondenzatorski pretvarači s kapacitetom ovisnim o dielektriku** mogu imati ili homogen dielektrik čija se dielektričnost mijenja u vezi s nekom nenelektričnom veličinom ili višeslojni dielektrik u kome se mijenjaju debljine slojeva. Ovi slojevi mogu stajati okomito na površinu elektroda ili biti s njom paralelni.

**Kondenzatorski pretvarači s homogenim dielektrikom promjenjive dielektričnosti.** Linearna ovisnost kapaciteta o dielektričnosti omogućava mjerjenje i nenelektričnih veličina koje nisu ni mehaničke ni geometrijske prirode. Djelovanjem neke nenelektrične veličine na dielektrik može se neposredno utjecati na neku električnu veličinu. Npr., budući da voda ima znatno veću dielektričnost od zraka, može se pomoći kondenzatorskim pretvaračima mjeriti sadržaj vode u higroskopnim tvarima (npr. tkaninama, papiru, drvu, pjesku). Razumije se da vodljivost ovih tvari ne smije biti velika.

**Kondenzatorski pretvarači s višeslojnim dielektrikom okomitim na elektrode.** Velika razlika između dielektričnosti zraka i drugih čvrstih i tekućih tvari daje mogućnost mjerena visine ili dubine sloja i razine tvari u spremnicima pomoći kondenzatorskim pretvaračima. Na sl. 43 a prikazan je princip mjerjenja razine tekućine. Razina je okomita na površinu dviju ploča širine  $b$ , udaljenih jedna od druge za razmak  $d$ ; visina ploče iznad tekućine je  $h_1$ , a dubina ploče u tekućini  $h_2$ . Ovdje se u stvari radi o dva paralelna



Sl. 43. Pretvarači s poprečno položenim dielektrikumom.  
a) Tekućina kojoj se mjeri rjava kao dielektrik, b) kapacitet zaronjenog i izronjenog dijela mjernog kondenzatora, c) uređaj za mjerjenje razine u spremnicima sipkih tvari

kondenzatora kapaciteta  $C_1$  i  $C_2$  (sl. 43 b) čiji je ukupni kapacitet određen izrazima (34) i (38):

$$C = C_1 + C_2 = \epsilon_0 \epsilon_{r1} \frac{b h_1}{d} + \epsilon_0 \epsilon_{r2} \frac{b h_2}{d}. \quad (39)$$

Za mjerjenje razine ili dubine električki nevodljivih tekućina ili sipkih tvari u spremnicima najprikladniji je pretvarač u obliku cilindričnog kondenzatora. Ako je dielektrik vodljiv, elektrode se oblažu nevodljivim slojem, pa se tako dobiva dvostrojni kondenzator. Ovdje kao unutrašnja elektroda može poslužiti sonda u obliku metalnog štapa ili užeta, promjera  $D_1$ , a vanjsku sondu predstavlja sama metalna posuda (spremnik) promjera  $D_2$  u kojoj se nalazi materijal čiju razinu treba mjeriti (sl. 43 c). Primjenom jedn. (37) za kapacitet cilindričnih kondenzatora i jedn. (38) dobiva se za kapacitet takvog uređaja izraz:

$$C = \frac{2 \pi \epsilon_0}{\ln \frac{D_2}{D_1}} [\epsilon_{r1} (h - x) + \epsilon_{r2} x], \quad (40)$$

koji pokazuje kako se mijenja kapacitet pretvarača pri promjeni razine  $x$ .

*Kondenzatorski pretvarači s dielektrikom od više slojeva paralelnih s elektrodama* nastaju ako se između elektroda pločastog kondenzatora nalaze dva dielektrika, npr. papirna traka i zrak. U tom se slučaju radi o dvoslojnem kondenzatoru (v. sl. 40 a) čiji je kapacitet određen izrazom (35). Ovakva se vrsta pretvarača primjenjuje za mjerjenje neelektričnih svojstava čvrstih tvari i tvari u obliku traka (plastičnih masa, papira, tekstila). Pomoću njih se pri poznatoj dielektričnosti može mjeriti debljina dotične tvari (trake) ili se može odrediti količina neke primjese (npr. vlagi) ako je njezina dielektričnost bitno različita od dielektričnosti druge osnovne komponente (npr. papira). Ovako nastali pločasti, dvoslojni kondenzator može se promatrati kao serijski spoj kondenzatora  $C_1$  i  $C_2$  s debljinama dielektrika ( $d - d_1$ ) odnosno  $d_1$  i dielektričnostima  $\epsilon_{r2}$  i  $\epsilon_{r1}$ . Pri tome je  $d$  konstantni razmak mjernih ploča, a  $d_1$  mjerena (nepoznata) debljina (sloja) tvari, koja se određuje mjeranjem kapaciteta pretvarača.

#### MJERNI POSTUPCI

Električno mjerjenje neelektričnih veličina može se prema vrsti mjereneh veličina grubo podijeliti na pet osnovnih grupa mjerena: električno mjerene mehaničkih, termičkih, optičkih i kemijskih veličina i električnu analizu. Prikaz postupaka električnog mjerjenja neelektričnih veličina u ovom posljednjem poglavljiju članka o električnim mjerjenjima slijedit će uglavnom ovu podjelu na grupe mjerena, ali kako se u toku mjerena često veličine jedne grupe pretvaraju u veličine druge grupe i kako se za mjerjenje veličina različitih grupa upotrebljavaju često isti električni postupci, neće uvijek biti mogućno strogo se držati te podjele. Na kraju će biti kratko prikazana primjena električnih metoda u geofizičkim i radijacionim mjerjenjima.

Izbor mernih pretvarača i mernih instrumenata ovisi umnogome o zahtjevima i uvjetima mjerena. Važno je, npr., da li je posrijedi statičko ili dinamičko mjerjenje, da li pokazivanje treba da bude analogno ili digitalno, kolika je tražena ili propisana merna tačnost i kolike su investicije u mjerne uređaje moguće ili ekonomski opravdane.

Pri električnom mjerenu neelektričnih veličina radi se često o mjerenu promjena otpora do kojih dolazi zbog promjene mjerene neelektrične veličine. Za mjerenu tih otpora primjenjuju se često mosni spojevi (v. str. 603). Dok se pri električnom mjerenu električnih veličina najčešće primjenjuju mosni spojevi koji rade po nulmetodi (uravnoteženi mostovi), pri mjerenu neelektričnih veličina upotrebljavaju se često i razgodeni mostovi, tj. mostovi koji se ne uravnotežuju. Oni rade po otklonskoj metodi: promjena nepoznata otpora izaziva u takvom mostu (u kome su otpori ostalih otpornika stalni) pojavu i promjene struje u dijagonali s instrumentom za indikaciju, pa stoga otklon instrumenta predstavlja izravno mjeru za nepoznati otpor, a time i za nepoznatu električnu veličinu.

#### Električno mjerjenje mehaničkih veličina

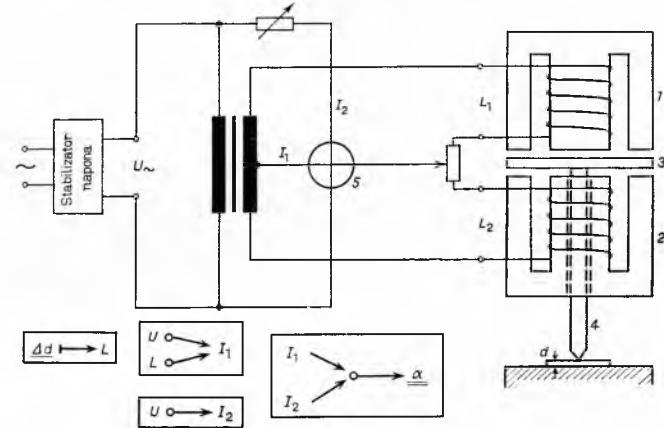
U ovu grupu mjerena, koja je najopsežnija, idu u prvom redu metode mjerena dužine (velikih i malih puteva, debljine traka, stijenki, pokrivenih slojeva itd., rastezanja, kutnog zakretanja, hrapavosti površine, razine, amplitude titranja) i veličina čije se mjerenu obično svodi na određivanje dužine (sila, naprezanje, tlak, gustoća, viskozitet, moment vrtnje, snaga, rad, težina, protok). Na to se nadovezuju mjerene vremena i prostorno-vremenskih mehaničkih veličina (brzine i ubrzanja).

*Mjerjenje velikih puteva.* Veliki putevi, sa stanovišta mjerne tehnike, jesu dužine ili pomaci reda veličine milimetra ( $10^{-3}$  m) do kilometra ( $10^3$  m). Kao merni pretvarači mogu pri ovim mjerenu služiti otporski, induktiviteti i kondenzatorski pretvarači, a neke se mjerne metode osnivaju i na brzini različitih vrsta valova (elektromagnetskih, ultrazvučnih). *Otporsko mjerjenje puta* provodi se žičnim mernim pretvaračima u kojima mjerena veličina pomiči klizni otpornik (v. sl. 18 a). Pad napona na otporniku mjeru je izvršenog pomaka (v. sl. 18 b). *Induktivitetko mjerjenje puta* prikladno je i za dinamička mjerena jer pretvarač nema kliznog kontakta. Mjerena se provode pomoću dif-

ferencijskih transformatora (v. sl. 33, 34) ili pomoću pretvarača s uzdužnom jezgom prikladnih dimenzija (v. sl. 32). *Kondenzatorsko mjerjenje razmaka ili pomaka* reda veličine milimetra do centimetra izvodi se pomoću pretvarača s koncentričnim cilindrima koji su jedan od drugog izolirani i pod djelovanjem mjerne veličine mijenjaju relativni položaj u aksijalnom smjeru (v. sl. 41 b). Za mjerenu manjih pomaka i veličina koje se na ove pomake mogu svesti primjenjuju se i kondenzatorski pretvarači s promjenljivim razmakom ploča (v. sl. 42 a). Razmaci reda veličine stotine i tisuće metara mjeru se električnim putem *primjenom zvučnih ili ultrazvučnih valova* (primjer: ultrazvučni dubinomjeri). Pri tome je za svaki ispitivani medij mjerodavna pripadna brzina rasprostriranja zvuka (v. *Elektroakustika*). Udaljenosti od  $10^3$  m navise, sve do astronomskih, mjeru se primjenom elektromagnetskih valova ultra- i supervisokih frekvencija, pomoću složenih električkih uređaja, a osnivaju se na radarskom principu (v. *Daljinomjeri i Radar*).

**Mjerjenje malih puteva.** U mernoj tehnici smatraju se malim putevima dužine ili pomaci u području od 1 mm ( $10^{-3}$  m) naniže do ispod 1 μm ( $10^{-6}$  m). Za te se svrhe upotrebljavaju induktiviteti i kondenzatorski pretvarači.

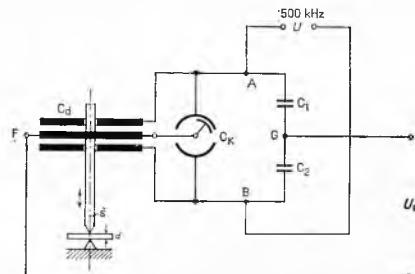
*Induktiviteti pretvarač s poprečnom kotvom* (v. sl. 35) u spoju prema sl. 44 može poslužiti za takva mjerena. Kotvu 3 pri mjerenu pomiči šiljak 4. Svici 1 i 2, promjenljivih induktiviteta  $L_1$  i  $L_2$ , predstavljaju grane mosta čija se struja  $I_1$  dijagonale dovodi na jedan svitak elektrordinamičkog instrumenta 5.



Sl. 44. Merni spoj induktivitetetskog mikrometra

Drugi svitak instrumenta priključen je preko stabilizatora na stalni izmjenični napon  $U$ , pa stoga kroz njega teče struja  $I_2$ . Pomicanjem šiljka 4 za iznos debljine  $d$  mijenjaju se induktiviteti  $L_1$  i  $L_2$ , a time i struja  $I_1$ , pa kazaljka elektrordinamičkog instrumenta pokazuje izmjereni put, odn. pomak šiljka 4.

*Kondenzatorski pretvarači s promjenljivim razmakom ploča* mogu se također upotrijebiti za mjerenu malih razmaka (v. sl. 42 a, b). Priključak mernog diferencijskog kondenzatora  $C_d$ ,



Sl. 45. Merni spoj diferencijskog kondenzatora kao mikrometra

koji služi u ovom slučaju kao pretvarač mikrometarskih pomaka  $d$ , izvršen je u mernom mostu (sl. 45) sastavljenom od kondenzatora  $C_1$ ,  $C_2$  i kompenzacionog kondenzatora  $C_k$ , predviđenog za postavljanje nul-tačke pokaznog instrumenta. Na jednu dia-

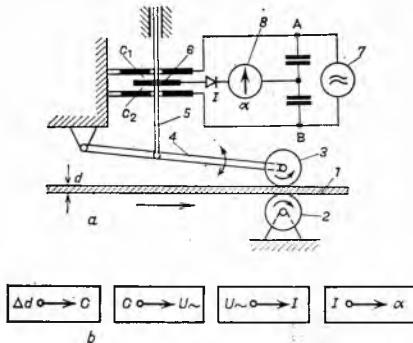
gonalu ( $A-B$ ) mernog mosta priključen je merni izmjenični napon  $U$  od  $\sim 500$  kHz. Napon  $U_m$  dobiven na drugoj dijagonali ( $F-G$ ) ovisan je o promjeni kapaciteta diferencijskog kondenzatora, uzrokovanoj promjenom položaja šiljka, koju je promjenu izvršila mjerena veličina (put ili pomak). Ovaj je napon malen pa ga treba prije dovođenja na pokazni instrument pojačavati u električnom pojačalu.

Obje opisane vrste mernih pretvarača daju mogućnost mjerenja statičkog i dinamičkog puta sve do  $\sim 0,01 \mu\text{m}$  ( $10^{-8} \text{ m}$ ).

**Mjerenje debljine stijenki ili traka.** Za kontinuirano mjerenje debljine stijenki ili traka od različitog materijala, u mirovanju ili u pokretu, postoji niz posrednih ili neposrednih električnih mernih metoda.

Medu posredne metode, tj. metode pri kojima se utjecaj mjerene veličine prima mehanički i zatim pretvara nekim prikladnim postupkom u odgovarajuću električnu veličinu, pripada mikrometarski postupak.

**Mikrometarski postupak** za mjerenje debljine traka u valjalicama sastoji se od prikladne mehaničke naprave (sl. 46), npr.



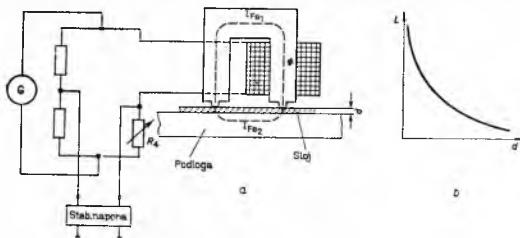
Sl. 46. Mjerenje debljine trake  $d$  pomoću sklopa s diferencijskim kondenzatorom

pomičnog (3) i nepomičnog (2) kotačića između kojih prolazi mjerena traka 1. Promjena debljine trake izaziva preko pomičnog kotača 3 i poluge 4 promjenu položaja motke 5 koja izravno djeluje na pomični dio primijenjenog pretvarača. Ova se mehanička veličina pretvara u odgovarajuću električnu veličinu bilo pomoću kondenzatorskog pretvarača (v. i sl. 45), bilo pomoću induktivitetskog pretvarača (v. sl. 44).

Neposredne mjerne metode su metode pri kojima neelektrična veličina sama kao takva utječe na pretvarač, a time i na promjenu odgovarajuće električne veličine. Takva je metoda kondenzatorski (kapacitivni) postupak.

**Kondenzatorski (kapacitivni) postupak** služi za mjerenje debljine traka (bez dodira) načinjenih od električki nevodljivog materijala (papira, tekstila, plastične mase). Mjerena traka poznate dielektričnosti prolazi između ploča mernog kondenzatora (v. sl. 40 a) pa promjena njezine debljine izaziva prema izrazu (37) promjenu kapaciteta mernog kondenzatora. Budući da se ovdje radi o malim promjenama kapaciteta, mjerjenje kapaciteta izvodi se primjenom visokofrekventnih struja.

**Mjerenje debljine slojeva nemagnetskih materijala**, npr. slojeva bakra, cinka ili laka na nekoj feromagnetskoj podlozi kao što je željezni lim, izvodi se induktivitetskim mernim pretvaračem s poprečnom kotvom. Promjena magnetskog otpora mernog pretvarača i podloge, odnosno promjena njegovog induktiviteta



Sl. 47. Mjerenje debljine  $d$  nemagnetskog sloja na feromagnetskoj podlozi. a) Sklop s induktivitetskim mernim pretvaračem, b) promjena induktiviteta  $L$  u ovisnosti o debljini sloja  $d$

u ovisnosti o debljini  $d$  mernog sloja, približno je parabolna (sl. 47 b). Mjerenje se može provoditi tako da se most (sl. 47 a) uravnoteži pomoću otpornika  $R_4$  za normalnu ili propisanu debljinu sloja. Instrument G pokazuje u tom slučaju samo odstupanja  $\Delta d$  od te debljine. Područje je mjerena npr. od 0 do  $50 \mu\text{m}$ , a granice pogreške  $\sim \pm 2\%$ .

**Mjerenje rastezanja.** Rastezanje  $\varepsilon$  je neimenovan broj koji predstavlja relativnu promjenu dužine  $l$  do koje dolazi pod djelovanjem sile  $F$ :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}. \quad (41)$$

Prema Hookeovom zakonu rastezanje do granice elastičnosti proporcionalno je naprezanju (mehaničkom naponu)  $\sigma$ , a određeno je izrazom

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}. \quad (42)$$

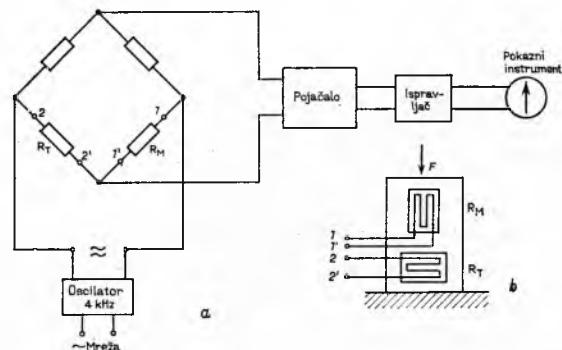
Ovdje je  $E$  modul elastičnosti, koji je svojstven svakom materijalu, a mjeri se u  $\text{kN/mm}^2$  ( $1 \text{ kp/mm}^2 = 9,8 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ ). Budući da je naprezanje  $\sigma$  kvocijent sile  $F$  i površine  $S$  na koju ova sila djeluje,

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (43)$$

za promjenu duljine  $\Delta l$  do koje dolazi pod djelovanjem sile  $F$  vrijedi izraz:

$$\Delta l = \frac{Fl}{ES}. \quad (44)$$

Red veličine promjene  $\Delta l$  iznosi pri uobičajenim mjerjenjima  $0,1 \dots 10 \mu\text{m}$ . Pri ispitivanju materijala, rastezanje  $\varepsilon$  određuje se uglavnom mernim postupcima koji nisu električni. Električna mjerila rastezanja primjenjuju se većinom pri statičkom mjerenu rastezanja u svrhu određivanja naprezanja u dijelovima konstrukcija i pri dinamičkom mjerenu rastezanja radi određivanja sile ili naprezanja koja djeluju na neku konstrukciju. Električna mjerila rastezanja, tj. pretvarači kojima se rastezanje pretvara u neku električku veličinu, moraju biti takvi da se lako pričvrste na ispitivani objekt, da im je merna duljina mala i da im za mjerjenje nije potrebna gotovo nikakva sile. Mjerilo rastezanja priključeno je naime paralelno na smjer djelovanja sile u ispitivanom tijelu (v. sl. 54 a), pa mora biti dimenzionirano tako da preuzima samo neznatan dio ukupne sile. Suprotno tome mjerila sile uključena su u seriju s mjerom silom (v. sl. 54 b). U



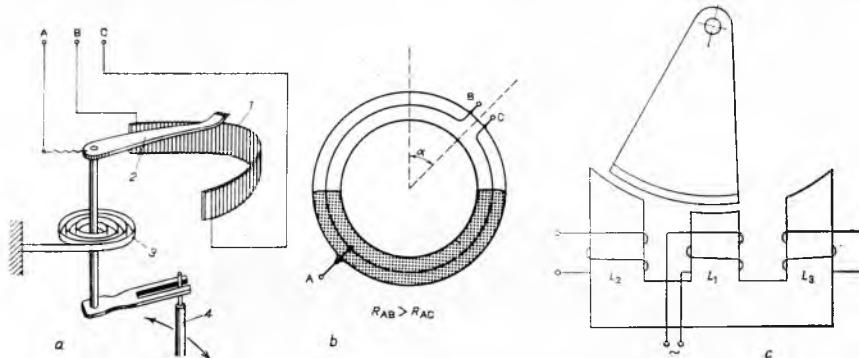
Sl. 48. Mjerenje rastezanja mernim trakama. a) Mjerni sklop, b) smještaj mernih traka

skladu s ovim zahtjevima mjerjenje rastezanja moguće je provesti pomoću induktivitetskih pretvarača u obliku diferencijskih transformatora ili prikladnih izvedbi pretvarača s poprečnom kotvom (v. sl. 35).

**Rastezne mjerne trake** (v. str. 644) u praksi se uveliko primjenjuju. Osnovna im je prednost što su male, jednostavne i prikladne za dinamičko mjerjenje rastezanja i na teško pristupačnim dijelovima konstrukcija, na jednom mjestu ili istovremeno na više mesta. Da bi se izvelo mjerjenje, traka se pouzdano pričvrsti na ispitivani tehnički objekt, a njezini se krajevi priključi na merni sklop koji je obično u mosnom spoju (sl. 48 a). Budući da pri rastezanju mjerne trake (izazvanom rastezanjem ispi-

tivanog objekta) dolazi samo do neznatne promjene njezina otpora, potrebno je primijeniti električno pojačalo. Upravo zbog jednostavnosti pojačanja mjeri se most napaja izmjeničnom strujom iz oscilatora od nekoliko kiloherca. Da bi se otklonio utjecaj temperature na promjenu otpora mjerne trake a time i na izmjereni rezultat, na ispitivani se objekt pored mjerne trake  $R_M$  nalijepi i u njoj posve jednaka, ali poprečno na smjer rastezanja postavljena kompenzacijска traka  $R_T$  (sl. 48 b).

**Mjerenje kutnog zaokreta** (kutnog položaja). Za neposredno mjerenje kutnih zaokreta mogu se primijeniti odgovarajuće kružne izvedbe pasivnih pretvarača. U otporskem žičnom kružnom pretvaraču mjeri zaokret djeluje na kliznik 2 (sl. 49 a) ili na položaj prstenaste staklene cijevi do polovice napunjene životom, tzv. prstenaste vase (sl. 49 b), i time u živu uranju ili izranju odgovarajući dio otporske žice, pa se na njezinim krajevima A, B, C dobivaju otpori kao funkcije kuta zaokreta. Otpor dijela žice koji je uronjen u živu nema utjecaja zbog malog otpora znatno debljeg stupca žive. Za mjerenje kuta zaokreta pomoću induktivitetskih pretvarača služe kružne izvedbe pretvarača s uzdužnom pukotinom i odgovarajuće izvedbe diferencijalnog transformatora.



Sl. 49. Otporski pretvarači kutnog zaokreta. a) Žični otpornik s kliznikom, b) Žični otpornik u cijevi djelomično napunjenoj životom (prstenasto vagi), c) induktivitetni pretvarač malih zaokreta

Jednu specijalnu izvedbu pretvarača za male kute kod koje se pri zaokretu mijenja površina zračnog raspora a time i induktivitet pojedinih svitaka prikazuje sl. 49 c. Od kondenzatorskih pretvarača mogu u tu svrhu poslužiti zaokretni pločasti kondenzatori (v. sl. 41 a).

**Sinhro-uredaji** primjenjuju se za električno daljinsko prenošenje kutnih zaokreta koji nastaju pri zaokretanju vratila strojeva ili pri otklonu pomicnog organa u instrumentima (npr. giro-kompassa i drugih instrumenata čije se mjerenje očituje u otklonu kazaljke). Sinhro-uredaji, nadalje, služe kao detektori razlike kutnog zaokreta dviju osovina ili vratila. Mjerenje ove razlike, tj. kutne pogreške, potrebno je, kao podatak, za rad servomehanizama.

U grupu sinhro-uredaja ide niz pojedinačnih članova kao što su: sinhro-generator (odašiljač), sinhro-motor (prijemnik), diferencijalni sinhro-generator i motor, kontrolni transformator i resolver. Ovi članovi u različitim kombinacijama nalaze različite primjene u daljinskom prenošenju mjernih podataka, odnosno u servomehanizmima ili električnim računalima.

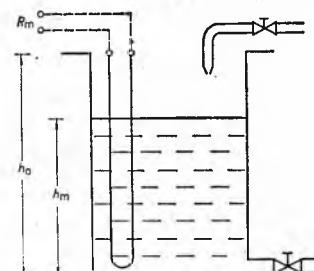
Za daljinsko prenošenje mjernih podataka u obliku kutnog zaokreta (npr. otklona kazaljke) najčešće služe sinhro-odašiljač i sinhro-prijemnik. Ove naprave, kao i sve ostale sinhro-naprave, izvedene su kao zaokretni transformator u obliku minijaturnih električnih motora. Njihov vanjski promjer iznosi nekoliko inča

(1 in. = 25,4 mm, uobičajena mjera u ovoj tehnici), već prema svrsi za koju je predviđen sinhro-uredaj (mjerodavan je iznos zaokretnog momenta). Sinhro-odašiljač i sinhro-prijemnik potpuno su jednak po svojoj mehaničkoj i električnoj izvedbi (sl. 50). Oni se sastoje od po tri statorska namotaja  $S_1$ ,  $S_2$  i  $S_3$ , koji su jedan prema drugom pomaknuti za  $120^\circ$  a smješteni su u utorima statora načinjenog od lameliranog željeza, i od jednog rotorskog namotaja  $R_1 - R_2$  smještenog na pomicnoj željeznoj jezgri (armatura dvostrukog T). Odgovarajući statorski namotaji odašiljača i prijemnika spojeni su jedan s drugim priključnim vodovima potrebnog duljine. Ako se na pomicni dio, tj. rotor odašiljača koji je pokretan od nekog mjernega sustava, priključi izmjenični napon (obično 50 ili 400 Hz), inducirat će se u statorskim namotajima odašiljača, ovisno o položaju rotora, tj. pomicnog organa instrumenta, takvi naponi da će struje u statoru prijemnika stvoriti rezultantno (izmjenično) magnetsko polje smjera jednakog smjeru što ga je imalo u promatranom času polje rotora odašiljača. Ako je i rotor prijemnika priključen na isti zajednički napon, taj će rotor, a time i kazaljka koja je na njemu učvršćena, doći u smjer polja statora prijemnika, koji je identičan sa smjerom polja rotora odašiljača, a time i sa smjerom onog položaja pomicnog organa koji se daljinski prenosi. Rotor prijemnika slijedit će na jednak način sve ostale položaje rotora odašiljača, pa će kombinacija sinhro-odašiljača i sinhro-prijemnika u navedenom spoju služiti za daljinsko prenošenje kutnog zaokreta s mesta mjerena na mjesto pokazivanja.

**Mjerenje hrapavosti površine.** Hrapavost površine posljedica je visinskih razlika na površini neke plohe, koje razlike mogu biti reda veličine između  $0,02$  i  $\sim 300 \mu\text{m}$ . Mjerenje hrapavosti ide s mjerne gledišta u grupu mjerena malih puteva, a električki se može provoditi bilo pomoću induktivitetnih pretvarača s poprečnom kotvom (v. sl. 35) bilo pomoću kondenzatorskog pretvarača (v. sl. 45, 46). Pretvarač se pri mjerenu uključuje u mosni spoj u kojem se napon dijagonale dovodi u mjerivo pojačalo, a zatim na odgovarajući pokazni instrument.

**Mjerenje razine (nivoa).** Posredno mjerene razine tekućina pomoću mehaničkih elemenata provodi se plovkom koji pomiče neki površinski otporski (v. sl. 18) ili induktivitetni pretvarač s uzdužnom kotvom (v. sl. 32 a).

**Pretvarači s otporskim mernom petljom** (sl. 51) primjenjuju se za mjerenje razine u spremnicima u kojima se nalaze tekućine

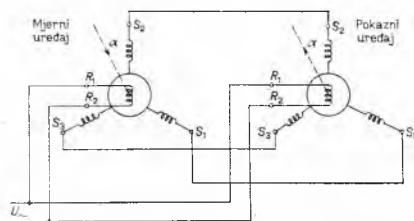


Sl. 51. Mjerenje razine tekućine pomoću otporske mjerne petlje

s konstantnom električnom vodljivošću. Takvi otporski pretvarači načinjeni su od žice čiji je otpor znatno veći od otpora mjerene tekućine, a postavljeni su vertikalno u spremnik. Kad je spremnik prazan, ukupna visina  $h_0$  otporske petlje ima otpor  $R_0$ . Kad se u spremniku nalazi tekućina do visine  $h_m$ , mjereni se otpor smanjuje na vrijednost  $R_m$  jer uronjenu žicu premošćuje tekućina, pa je tada pripadni mjereni otpor određen izrazom

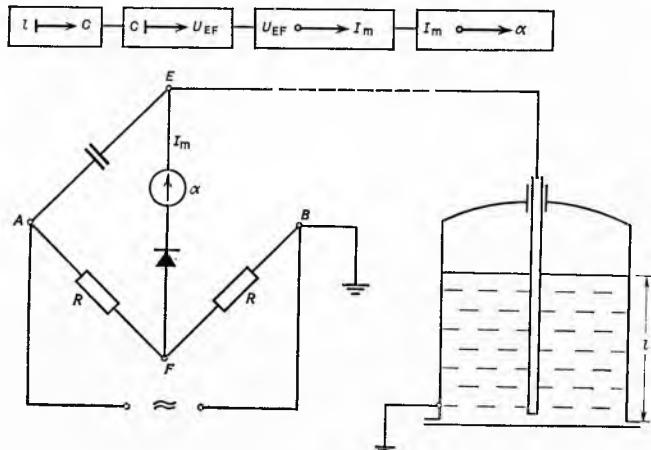
$$R_m = R_0 \left( 1 - \frac{h_m}{h_0} \right). \quad (45)$$

Da bi se spriječilo elektrolitsko djelovanje, mjerjenje se izvodi izmjeničnom strujom.



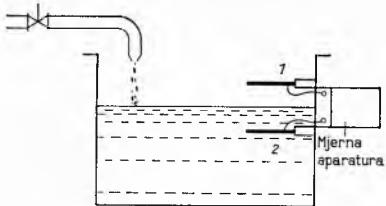
Sl. 50. Spojna shema sinhro-odašiljača i sinhro-prijemnika.  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ , statorski namotaji,  $R_1$ ,  $R_2$ , rotorski namotaji, a kutni zaokret

*Električna mjerila razine* osnivaju se na kondenzatorskom principu (v. sl. 43). Mjerni je pretvarač u osnovi priključen u mosnom spoju (sl. 52) u čijoj je jednoj dijagonali izvor izmjeničnog napona frekvencije nekoliko kiloherca, a u drugoj dijagonali pokazni instrument koji izravno pokazuje razinu.



Sl. 52. Mjerni spoj kapacitivnog mjerila razine

*Premjestivi kondenzator* (sl. 53) služi za mjerjenje vrlo malih promjena razine u spremnicima za tvari s nestalnom dielektričnosti (npr. toplo i hladno ulje). Pri tome se kondenzator namjesti na određenu visinu tako da se jedna elektroda (1) nalazi iznad, a druga (2) ispod površine tekućine čija se razina mjeri.



Sl. 53. Mjerjenje malih promjena razine pomoću premjestivog kondenzatora

*Mjerjenje razine agresivnih tekućina* svodi se na vaganje, pa se u tu svrhu podnožja spremnika stavljuju na mjerne kružne za određivanje sile (npr. presunktore) ili se na podupore spremnika stavljuju rastezne mjerne trake (v. sl. 64 a).

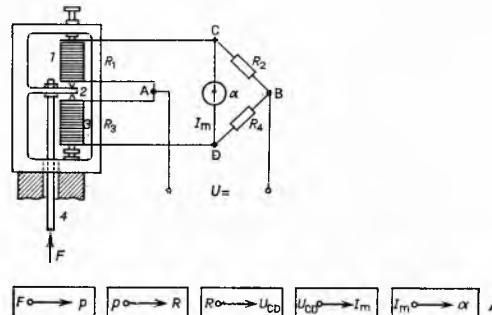
*Mjerjenje amplitude titranja* ispitivanih konstrukcija provodi se različitim vrstama pretvarača. Elektrodinamički pretvarač (v. sl. 4) može biti konstruiran npr. za amplitudu do  $\pm 2$  mm i graničnu gornju frekvenciju do 1000 Hz. Konstrukcija pretvarača može biti takva da se titranje na njega prenosi dodirom ili magnetski, tj. tako da se na objekt koji titra nalijepi metalna pločica preko koje se na izvjesnu udaljenost zatvara magnetski tok pretvarača. Piezoelektrični pretvarači, npr. od barijum-titanata, prikladni su za mjerjenje manjih amplituda pri višim frekvencijama. Svaki pretvarač titranja mora imati nepomični dio prema kome se mijere relativni pomaci. To može biti nepomična podloga ili dovoljno velika seizmička masa elastično ugrađena u pretvarač.

*Mjerjenje sile* služi za određivanje same sile kao takve a također za vaganje, tj. određivanje težine (mase, količine), za određivanje razine, naprezanja i tlaka. Mjerila sile izvedena su kao tlačne ili vlačne mjerne kutije (rastezna tijela) koje se uključuju u seriju s mjerrenom silom (sl. 54 b) i koje su stoga dimenzionirane tako da izdrže ovu silu. Neka mjerila rastezanja postavljaju se i na po-

vršinu objekta čije se naprezanje mjeri (sl. 54. a). Za pretvaranje sile u neku električnu veličinu služe u takvim mjerilima, između ostalog, mjerni pretvarači navedeni u nastavku.

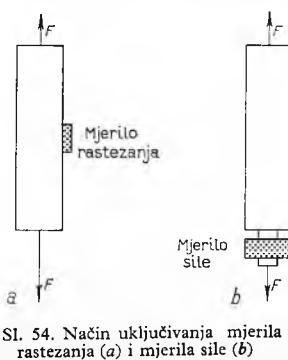
*Stupac ugljenih pločica* (v. sl. 22 a, b) koji se može izvesti i s dva pretvaračka stupca (sl. 55) tako da se djelovanje sile  $F$  preko motke 4 prenosi na pero 2 i time smanjuje električni otpor stupca pločica 1, a istovremeno povećava otpor stupca pločice 3. Djelovanjem sile  $F$  mijenjaju se dakle pripadni otpori  $R_1$  i  $R_3$  koji zajedno s otpornicama otpora  $R_2$  i  $R_4$  sačinjavaju mosni spoj. Instrument uvršten u granu C—D mosta svojim otklonom  $\alpha$  pokazuje izravno silu  $F$ .

*Piezoelektrični pretvarači* (v. sl. 6, 7) imaju osobitu prednost za dinamička mjerjenja, jer mogu slijediti mjerne frekvencije veće od 15 kHz, pa se primjenjuju za mjerjenje brzih pojave kao što su tlakovi, a time i sile u cilindrima eksplozionih motora i pumpi, zatim u topovskim cijevima i raketnim motorima.

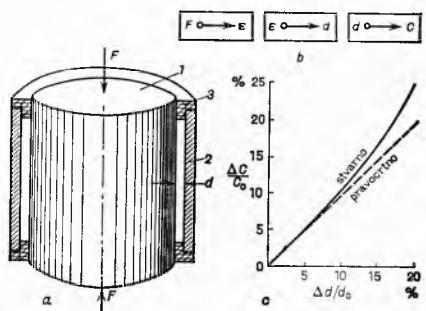


Sl. 55. Mjerjenje sile pomoću pretvarača s ugljenim stupcima

*Kondenzatorski pretvarači* (v. sl. 42) sastoje se od dvije metalne ploče čiji se razmak mijenja pod djelovanjem mjerene sile. Prema mehaničkoj izvedbi kondenzatorskih pretvarača razlikuju se dvije osnovne grupe: mjerne kutije s membranama i savitljivim pločama, koje služe za mjerjenje malih sile, i kondenzatorske mjerne kutije s tlačnim valjkom (sl. 56 a), koje služe za mjerjenje velikih sile. Pod djelovanjem mjerene sile  $F$  metalni se tlačni cilindar 1 neznatno elastično deformira i time se smanjuje razmak  $d$  između cilindra 1 i njegovog koncentričnog vanjskog metalnog plasta 2. Ove dvije metalne elektrode kondenzatora odijeljene su jedna od druge izolacijom 3. Pri maloj relativnoj promjeni



Sl. 54. Način uključivanja mjerila rastezanja (a) i mjerila sile (b)



Sl. 56. Kondenzatorska merna kutija s tlačnim valjkom za mjerjenje sile. a) Presjek mjerne kutije, b) tok pretvorbe, c) merna karakteristika

razmaka ploča  $\Delta d/d_0$  dolazi do relativne promjene kapaciteta  $\Delta C/C_0$  koja je gotovo pravocrtna (sl. 56 c).

*Induktivitetne naprave za mjerjenje sile*. Uslijed djelovanja mjerene sile nastaju na nekom rasteznom tijelu izvedenom u obliku metalne membrane ili tlačnog valjka (prijemniku) elastične deformacije, koje imaju za posljedicu izvjesnu promjenu puta. Ova promjena puta koja je proporcionalna mjerenoj sili prenosi se na odgovarajući pomični dio induktivitetetskog pretvarača i mijenja mu induktivitet. Promjenom induktiviteta mijenja se i iznos mernog izmjeničnog napona, pa je ovaj po određenoj zakonitosti ovisan o mjerenoj sili.

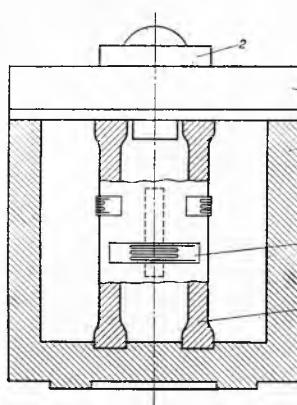
Najveći iznos sile koji se može mjeriti na taj način ovisi isključivo o mehaničkim svojstvima prijemnika, tj. o njegovim dimenzijama, izvedbi i upotrijebljenom materijalu. Moguće je graditi induktivitetske mjerne naprave za veoma velike sile, do reda veličine 1000 MP ( $10^6$  kp = Gp). Mjerna pogreška ovih naprava iznosi  $\sim 2\text{--}3\%$ , a prednost im je što se mogu primjenjivati bez pojačala. Izvedba ovih mjernih naprava u skladu je s vrstom i iznosom mjerene veličine i svrhom za koju se primjenjuje.

*Magnetoelastične mjerne naprave* (v. sl. 37, 38) rade također bez pojačala, a i njima se mogu mjeriti sile do reda veličine 1000 MP. Promjena puta do koje dolazi pri mjerenu sile neznatna je, a iznosi 10 do 20  $\mu\text{m}$ ; mjerna im je pogreška  $\sim 1\%$ . Robustna izvedba ovih mjernih pretvarača omogućava njihovu primjenu u teškim i grubim radnim uvjetima. Mogućnost dinamičkih mjerena ograničena je pri napajanju naprave iz 50-hercne mreže na 10 Hz. Međutim, pri napajanju uredaja strujom odgovarajuće više frekvencije mogu se izvoditi dinamička mjerena pri promjeni opterećenja i do 10 kHz.

*Rastezni mjnični trakovi* koje su prilijepljene na metalno rastezno tijelo u obliku cilindra također se mjeri sile (sl. 57).

Tačnost ovih mjernih naprava veoma je velika ( $\sim 1\%$ ), ali one su dosta neosjetljive, pa se mogu primjenjivati samo u zajednici s elektroničkim mjničnim aparatima (pojačalima itd.). Frekvencija promjene pogonskog napona od 5 kHz omogućuje dinamičko mjereno sile pri promjenama frekvencije do  $\sim 1$  kHz.

Posljednje spomenute vrste mjničnih pretvarača: induktivitetske naprave, magnetoelastične naprave i rastezne mjerne trake, osobito su prikladne za primjenu u industriji. Usporedbu nekih svojstava za te postupke prikazuje ova tablica:



Sl. 57. Mjerna kutija s rasteznim mjničnim trakama. 1 Kućište, 2 prenosnik tlaka, 3 poklopac, 4 šuplji valjak, 5 rastezna traka

Naprava za mjerenu sile:	Relat. promjena otpora	Linearnost
obična induktivitetska	1%	dobra
magnetoelastična	100%	loša
s rasteznim mjničnim trakama	0,1%	vrlo dobra

Tačnost i pouzdanost mjerena sile veoma je ovisna o izvedbi samog mjničnog pretvarača i njegovom smještaju na rastezno tijelo.

**Određivanje naprezanja.** Uz poznat modul elastičnosti  $E$  materijala od kojeg je izrađeno ispitivano (opterećeno) tijelo može se iz izmjereno rastezanja prema izrazu (42) izračunati naprezanje

$$\sigma = \epsilon E. \quad (46)$$

Rastezanje  $\epsilon$  mjeri se jednim od mjerila rastezanja, opisanim na str. 653.

**Mjereno tlaka.** Tlakovi koji se primjenjuju u tehničkoj praksi obuhvaćaju široko područje od  $\sim 10^{-5}$  pa do  $10^4$  at. Za tako široko mjnično područje postoje različiti načini mjerena, među kojima i električno mjereno zauzima važno mjesto.

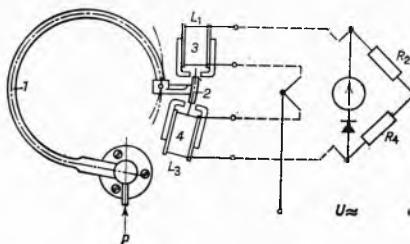
Za tehničke je svrhe često važna razlika između mjereno sile i nekog poredbenog (stalnog ili promjenljivog) tlaka. Tako se naziva pretlakom mjereni tlak veći, a podtlakom ili vakuumom mjereni tlak manji od atmosferskog; općenito se tlakovi ispod 1 mm Hg nazivaju finim vakuumom, a tlakovi ispod  $10^{-3}$  mmHg visokim vakuumom.

Budući da je tlak definiran kao sila na jedinicu površine, za mjereno tlaka primjenjuju se djelomično isti principi, postupci pa i mjnični pretvarači kao i za mjereno sile.

U plinovima ili tekućinama tlak se mjeri na principu mjerena puta, mjerena sile i pomoću mjničnih sonda.

*Mjerilo tlaka na principu mjerena puta* mogu biti izvedena kao mjnični potenciometri, rastezne mjerne trake, zatim kao induktivitetski i kondenzatorski mjnični pretvarači. Kao mehanički

elementi izvrgnuti elastičnim deformacijama zbog djelovanja tlaka služe obično metalne membrane, elastične cijevi (Bourdonove cijevi) ili čelični cilindri s debelim stijenkama (za mjereno vrlo visokih tlakova, reda veličine 3000 at). Na slici 58 prikazano

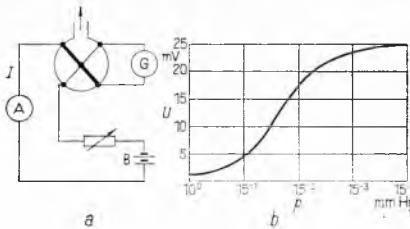


Sl. 58. Mjerilo tlaka s metalnom Bourdonovom cijevi i induktivitetskim pretvaračem

je mjerilo tlaka koje predstavlja kombinaciju običnog metalnog manometra s elastičnom cijevi 1 i induktivitetskog mjničnog pretvarača s uzdužnom pomičnom jezgrom 2 i pripadnim svicima 3, 4 te mosnim spojem.

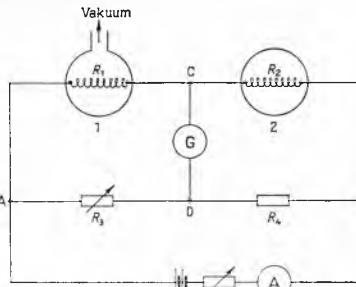
*Mjerilo tlaka na principu mjerena sile* najčešće primjenjuju piezoelektrične pretvarače. Pretvarači za mjereno tlaka u cilindrima eksplozionih motorova imaju oblik i dimenzije motorske svjećice, a njima se mogu uz pomoć katodnog osciloskopa registrirati indikatorijski dijagrami motora.

Pomoću mjničnih sondi mjeri se tlak tako da se u mjereni medij utaknu sonde čija su svojstva neposredno ili posredno ovisna o visini mjereno tlaka. Mjereno vrlo visokih tlakova, od  $\sim 4000$  at do 10 000 at, može se mjeriti svitkom od otporske žice, kojoj se otpor mijenja za  $\sim 3\%$  pri promjeni tlaka od 10 000 at. Za mjereno finih vakuumova iskorištava se ovisnost toplinske vodljivosti razrijedenih plinova o tlaku, koja dolazi do izražaja pri tlakovima između  $10^0\text{--}10^{-3}$  mmHg. Odvodenje topline s električno grijane sonde uronjene u ispitivani plin ovisno je o tlaku plina. O tlaku je prema tome ovisna i temperatura sonde (npr. ugrijane otporske žice) i njezin električni otpor, a ukoliko kao sonda služi termopar, i njegov termonapon.



Sl. 59. Mjerilo vakuma s termokrižem. a Mjerni spoj, b mjerna karakteristika

Sl. 59 a prikazuje shemu *električnog vakuummetra s termokrižem* grijanim konstantnom strujom. Napon termokriža tog vakuummetra u ovisnosti o smanjenom tlaku (vakuumu) prikazan je dijogramom sl. 59 b.



Sl. 60. Piranijev vakuummetar

*Piranijevo električno vakuummetar* (sl. 60) služi za utvrđivanje promjena malih tlakova (vakuumu) mjerenoj otporom koji se mijenja zbog promjene toplinske vodljivosti u razrijedenom plinu.

## ELEKTRIČNA MJERENJA

U ovom se instrumentu pomoću mosnog spoja utvrđuje razlika otpora  $R_1$  i  $R_2$  dviju jednakih ogrjevnih niti, od kojih se jedna nalazi u posudi promjenljivog tlaka ( $I$ ), a druga u posudi stalnog tlaka (2). Otklon galvanometra G koji se nalazi u diagonalni C—D Wheatstoneova mosta direktna je mjera vakuuma.

Za mjerjenje visokih vakuuma iskorištava se ovisnost električne vodljivosti razrijedjenih plinova o tlaku. Ova ovisnost dolazi do izražaja pri tlakovima između  $10^{-3}$  i  $10^{-6}$  mmHg u plinskim pretvaračima s otporom ovisnim o tlaku (v. sl. 27 i 28). Na principu električne vodljivosti plinova osniva se i rad ionizacionog Philipsovog (Penningovog) vakuummetra (sl. 61), koji se sastoji od prstenaste anode A i dvije katode  $K_1$ ,  $K_2$  od torijuma ili cirkonijuma. Djelovanjem visokog istosmjerne napona (od  $\sim 2000$  V) izlaze iz katoda elektroni, koji pod zajedničkim utjecajem električnog polja i magnetskog polja proizvedenog od jakog magneta N—S izvode helikoidalnu putanju od katoda do anode, čime se prisilno produžuje njihov put i povećava vjerojatnost sudara s molekulama plina. Time uspijevaju stvoriti i u veoma razrijeđenom plinu, dakle u visokom vakuumu, pozitivne ione i dodatne elektrone, koji se kreću prema katodi, odnosno anodi; time nastaje u krugu struja reda veličine mikroampera, koja se može mjeriti. Ova je struja to manja što je vakuum viši.

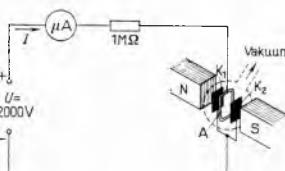
*Ionizacioni vakuummetri s triodom* služe za mjerjenje visokih vakuumi. Dijelovi triode (užarena katoda K, rešetka R i anoda A) smješteni su u staklenom balonu spojenom s posudom koja se evakuira. Takav se vakuummetar može spojiti na dva načina. U prvom slučaju (sl. 62) nalazi se na anodi pozitivan napon koji ubrzava elektrone što izlaze iz katode. Elektroni se na svom putu prema anodi sudaraju s nekim od preostalih molekula plina i pri tome ih udaraju ioniziraju. Pozitivne ione koji se tom prilikom stvaraju privlači negativna rešetka, pa oni u rešetkinom krugu te naprave uzrokuju rešetkinu struju koja, mada je jako mala, predstavlja mjerilo za vakuum, dok primarni i pri sudaru stvoreni elektroni prelaze na anodu. U drugom slučaju (v. sl. 27) anoda se nalazi na negativnom, a rešetka na pozitivnom potencijalu. Pri takvom rasporedu napona elektroni prelaze na rešetku, a pozitivni ioni na anodu. Elektroni prije nego stignu na rešetku većim dijelom prelijetaju više puta kroz žice rešetke gibanjući se tako oko nje. Time im se produžuje putanja i povećava vjerojatnost sudara s molekulama plina, što povećava osjetljivost aparature. U ovom slučaju je ionima izazvana anodna struja mjerilo za vakuum.

### Mjerjenje gustoće tekućina i plinova.

Gustoća  $\rho$  je masa jedinice volumena,

$$\rho = m/V. \quad (47)$$

Za mjerjenje gustoće tekućina kao najprikladnija pokazala se uzgonska metoda (sl. 63). Uzgon do kojeg dolazi uredjavanjem čvrstog mjerilog tijela, tj. plovka 1 električnog areometra u ispitivanu tekućinu, očituje se kao sila pomoću koje se dobiva odgovarajuća promjena puta. Ovaj se put pomoću induktivitetskog mjerilog pretvarača (ovisnog o promjeni površine ili međuinduktiviteta) pretvara u odgovarajuću električnu veličinu. U ovom se slučaju pretvarač sastoji od šipke 2 od mekog željeza, ugrađene u plovak, i diferencijskih svitaka 3 kojima je induktivitet, a time i impedancija, ovisan o položaju plovka. Ravnotežu plovka drži odgov-



Sl. 61. Princip Philipsovog (Penningovog) vakuummetra

*Ionizacioni vakuummetri s triodom* služe za mjerjenje visokih vakuumi. Dijelovi triode (užarena katoda K, rešetka R i anoda A) smješteni su u staklenom balonu spojenom s posudom koja se evakuira. Takav se vakuummetar može spojiti na dva načina. U prvom slučaju (sl. 62) nalazi se na anodi pozitivan napon koji ubrzava elektrone što izlaze iz katode. Elektroni se na svom putu prema anodi sudaraju s nekim od preostalih molekula plina i pri tome ih udaraju ioniziraju. Pozitivne ione koji se tom prilikom stvaraju privlači negativna rešetka, pa oni u rešetkinom krugu te naprave uzrokuju rešetkinu struju koja, mada je jako mala, predstavlja mjerilo za vakuum, dok primarni i pri sudaru stvoreni elektroni prelaze na anodu. U drugom slučaju (v. sl. 27) anoda se nalazi na negativnom, a rešetka na pozitivnom potencijalu. Pri takvom rasporedu napona elektroni prelaze na rešetku, a pozitivni ioni na anodu. Elektroni prije nego stignu na rešetku većim dijelom prelijetaju više puta kroz žice rešetke gibanjući se tako oko nje. Time im se produžuje putanja i povećava vjerojatnost sudara s molekulama plina, što povećava osjetljivost aparature. U ovom slučaju je ionima izazvana anodna struja mjerilo za vakuum.

*Sl. 62. Ionizacioni vakuummetri s triodom. Varijanta s pozitivnim naponom na anodi i negativnim naponom na rešetku*

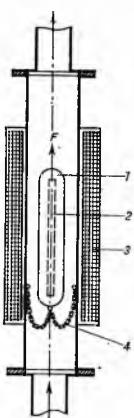
šetkinom krugu te naprave uzrokuju rešetkinu struju koja, mada je jako mala, predstavlja mjerilo za vakuum, dok primarni i pri sudaru stvoreni elektroni prelaze na anodu. U drugom slučaju (v. sl. 27) anoda se nalazi na negativnom, a rešetka na pozitivnom potencijalu. Pri takvom rasporedu napona elektroni prelaze na rešetku, a pozitivni ioni na anodu. Elektroni prije nego stignu na rešetku većim dijelom prelijetaju više puta kroz žice rešetke gibanjući se tako oko nje. Time im se produžuje putanja i povećava vjerojatnost sudara s molekulama plina, što povećava osjetljivost aparature. U ovom slučaju je ionima izazvana anodna struja mjerilo za vakuum.

### Mjerjenje gustoće tekućina i plinova.

Gustoća  $\rho$  je masa jedinice volumena,

$$\rho = m/V. \quad (47)$$

Za mjerjenje gustoće tekućina kao najprikladnija pokazala se uzgonska metoda (sl. 63). Uzgon do kojeg dolazi uredjavanjem čvrstog mjerilog tijela, tj. plovka 1 električnog areometra u ispitivanu tekućinu, očituje se kao sila pomoću koje se dobiva odgovarajuća promjena puta. Ovaj se put pomoću induktivitetskog mjerilog pretvarača (ovisnog o promjeni površine ili međuinduktiviteta) pretvara u odgovarajuću električnu veličinu. U ovom se slučaju pretvarač sastoji od šipke 2 od mekog željeza, ugrađene u plovak, i diferencijskih svitaka 3 kojima je induktivitet, a time i impedancija, ovisan o položaju plovka. Ravnotežu plovka drži odgov-



Sl. 63. Električno mjerilo gustoće tekućina

rajuća dužina lančića 4 pričvršćenih na njega. Ova je vrsta pretvarača u radu vrlo stabilna i može se primjenjivati neposredno, bez elektroničkog pojačala.

*Gustoća plinova* može se odrediti mjerjenjem električnog otpora postupkom analognim električnoj analizi plinova (v. str. 668). Mjereni plin i referentni plin poznate gustoće strujaju u dvije paralelne cijevi spojene poprečnom cjevčicom, u kojoj se, uslijed razlike tlakova izazvane razlikom gustoće plinova, uspostavlja strujanje koje hlađi grijanu žicu i mijenja joj otpor. Otpor žice, mjerjen mosnim spojem, mjeri je za gustoću plina.

**Mjerjenje viskoziteta.** Za viskozitet (viskoznost) ili unutarnje trenje fluida (tekućina i plinova) vrijedi Newtonov zakon:

$$F = \eta S \frac{dv}{dz}, \quad (48)$$

gdje je  $F$  sila trenja,  $S$  površina trenja,  $dv/dz$  gradijent brzine strujanja fluida okomito na smjer strujanja. Koeficijent proporcionalnosti  $\eta$  zove se dinamički viskozitet.

Newtonov zakon vrijedi za laminarno strujanje, tj. strujanje u paralelnim slojevima različite brzine. Pri tom strujanju među slojevima nastaje trenje (sila smicanja) čija veličina ovisi o površini dodira među slojevima i razlici njihovih brzina. Prema Newtonovom zakonu smicanja ( $F/S$ ) proporcional je gradijentu brzine okomito na razdjelnu plohu slojeva. Koeficijent proporcionalnosti, dinamički viskozitet, mjeri se u sistemu mjera MKS jedinicom  $Ns/m^2 = kg/ms$ . Često se upotrebljava jedinica puaz (poise, cP) i sistema CGS ( $= dyn/s/cm^2 = g/cm s$ ) ili stoti dio te jedinice, centipuaz (cP).  $1 Ns/m^2 = 10 P = 1 kp/s/9,81 m^2$ .

Omjer dinamičkog viskoziteta i gustoće zove se kinematički viskozitet  $\nu = \eta/\rho$ . Mjeri se u sistemu MKS i u tehničkom sistemu mjera jedinicom  $m^2/s$ ; često se upotrebljava jedinica sistema CGS, zvana stoks (stokes, S);  $1 S = 1 P/g cm^{-2} = 1 P cm^2/g = 1 cm^2/s = 1 m^2/10^4 s$ .

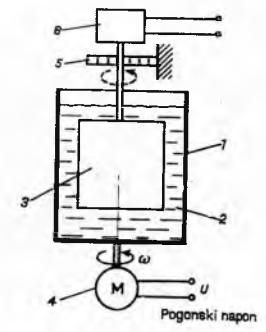
Za određivanje viskoziteta tekućina upotrebljava se u industriji, između ostalog, *rotacioni viskozimetar*. U njemu se viskozitet određuje mjerjenjem puta, kuta ili zaokretnog momenta. Rotacioni viskozimetar s električnim mjerjenjem tih nenelektričnih veličina prikazuje sl. 64. U ispitivanu tekućinu 2 u posudi 1 utorjeno je pomično valjkasto ili konično tijelo 3. Dovodenjem posude 1 u rotaciju pomoću elektromotora 4 izvodi se na utorjeno tijelo 3 zaokretni moment  $M$ , ovisan dimenzijama utorjenog tijela, njegovoj kutnoj brzini  $\omega$  i o dinamičkom viskozitetu  $\eta$  tekućine. Uz konstantne prve dvije veličine zaokretni moment  $M$  funkcija je od  $\eta$ . On se može mjeriti pomoću spiralnog pera 5, koje stvara protumoment zaokretnom momentu, a pomoću pogodnog pretvarača kutnog zaokreta (6) može se pretvarati u odgovarajuću električnu veličinu. Područja mjerjenja raznih izvedbi električnih rotacionih viskozimetaara mogu biti od 0 do  $10^6$  cP, a mjerne pogreške iznose  $\sim \pm 2\%$ .

**Mjerjenje zaokretnog momenta (momenta vrtnje).** Kad vratilo prenosi mehaničku silu, nastaje zaokretni moment  $M$ , koji izaziva torziju a time i mehaničko naprezanje vratila. Iznos zaokretnog momenta ovisan je o duljini vratila  $l$ , kutu zaokreta  $\varphi$  nastalom na toj duljini, polarnom momentu tromosti  $J_p$  i modulu smicanja  $G$ , prema jednadžbi

$$M = \frac{G J_p \varphi}{l}. \quad (49)$$

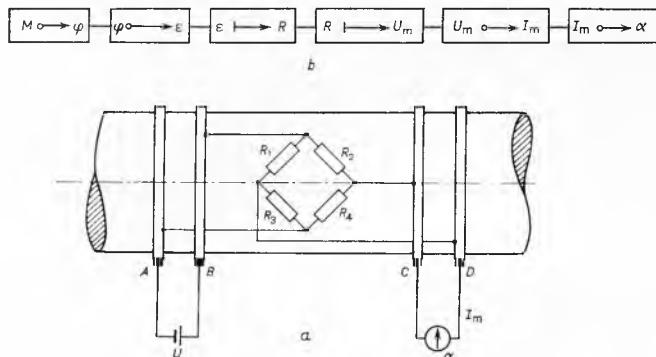
U skladu s ovim izrazom zaokretni se moment može izraziti kao veličina ovisna o putu, kutu zaokreta ili rastezanju. Električnim se mjerjenjem zaokretni moment obično određuje posredno na temelju mjerjenja kuta zaokreta. Za to se mogu upotrijebiti odgovarajući induktivitetski pretvarači puta i zaokreta, kondenzatorski pretvarači puta, magnetoelastični pretvarači i rastezne mjerne trake. Osnovni problem pri mjerjenju predstavlja ovdje električni spoj rotirajućih mjerilova i mirujućih instrumenata. Ovaj se spoj može izvesti električnim rotacionim prenosnicima otporskog, induktivitetskog ili kondenzatorskog tipa, dakle sa ili bez dodira (galvanske veze).

**Mjerjenje zaokretnog momenta rasteznih mjerilnih traka** osnova se na činjenici da zbog torzije dolazi do rastezanja  $\epsilon$  površine vratila, na koju su nalijepljene četiri mjerne trake koje su



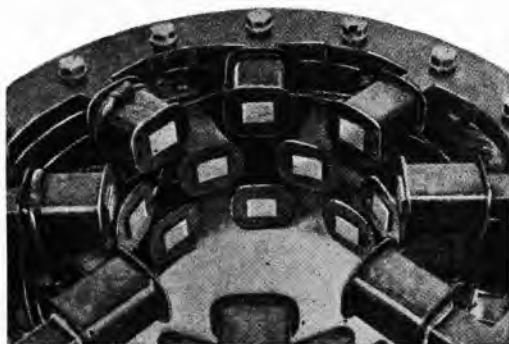
Sl. 64. Električni rotacioni viskozimetar

priklučene u mosnom spoju (sl. 65 a). Rastezanje površine vratila izaziva promjene otpora  $R_1 \dots R_4$  pripadnih mjernih traka. Spoj s rotirajućim dijelovima ostvaruje se ovdje pomoću kliznih prstena A B C D. Iz sheme toka djelovanja (sl. 65 b) vidi se redoslijed pretvorbi pojedinih veličina.



Sl. 65. Mjerenje zaokretnog momenta rastezanim mjernim trakama

**Mjerenje zaokretnog momenta pomoći prstenastog torduktora** osniva se na magnetoelastičnom efektu; prednost mu je što za prenošenje mjernih vrijednosti nisu potrebni klizni prsteni, a nije potrebno ni električko pojačalo. Prstenasto mjerilo torzije i zaokretnog momenta sastoje se od tri jednaka i paralelna prstena sa 4 n (mnogokratnik od 4) magnetskih polova, koji su od vratila udaljeni 2...3 mm (sl. 66). Srednji polni prsten nosi uzbudne namote koji sačinjavaju primarni transformatora, a vanjski prsteni nose nastavke sa sekundarnim namotima. Namoti jednog i drugog vanjskog prstena spojeni su u seriji ali u protivnom smislu.



Sl. 66. Torduktor, prstenasto mjerilo torzije s polnim prstenskim polovima

Pri neopterećenom vratilu se u sekundarnim namotima, slično kao u presudutoru, ne induciraju naponi, ali pri mehaničkom naprezanju vratila, izazvanom zaokretnim momentom, mijenja se njegov permeabilitet, pa dolazi do pomaka magnetskog toka (v. sl. 38). Zbog toga se u sekundarnim (vanjskim) svicima inducira napon koji je mjera zaokretnog momenta.

**Mjerenje snage.** Snaga je rad izvršen u jedinici vremena:

$$P = W/t, \quad (50)$$

gdje je  $P$  snaga,  $W$  rad,  $t$  vrijeme. Za translacijsko gibanje ( $W = F s$ ,  $s = v t$ ) vrijedi

$$P = F v, \quad (51 \text{ a})$$

gdje je  $F$  sila, a  $v$  brzina ( $s$  je put). Tako se snaga za kretanje vozila dobiva kao umnožak vučne sile  $F_v$  i brzine gibanja  $v$ . Za rotacijsko gibanje ( $W = M \varphi$ ,  $\varphi = \omega t$ ) vrijedi

$$P = M \omega, \text{ ili, sa } \omega = n \cdot 2\pi: P = M n \cdot 2\pi, \quad (51 \text{ b})$$

gdje je  $M$  zaokretni moment,  $\omega$  kutna brzina,  $n$  brzina vrtnje ( $\varphi$  je kut zaokreta). Tako se snaga elektromotora i eksplozionih motora dobiva kao umnožak zaokretnog momenta na vratilu i njegove kutne brzine, odn. brzine vrtnje pomnožene sa  $2\pi$ . Za pumpe i kompresore, gdje se mehanički rad  $W$  pretvara u volumensku energiju ( $W = Vp$ ), dobiva se, sa  $V = Q p$ :

$$P = Q p, \quad (51 \text{ c})$$

gdje je  $Q$  protok a  $p$  tlak ( $V$  je volumen).

Kako se vidi, radi određivanja snage treba istovremeno, ali odvojeno, mjeriti po dvije veličine ( $F$  i  $v$ , ili  $M$  i  $\omega$  odn.  $n$ , ili  $Q$  i  $p$ ) a zatim izračunati njihov produkt. Za dobivanje produkta dviju neelektričnih veličina izmjerenih električnim putem postoje električne metode, koje se realiziraju prikladnim sklopovima, odnosno uređajima za električno provođenje računskih operacija.

Ako se snaga određuje iz zaokretnog momenta  $M$  i brzine vrtnje  $n$  (to je najčešći slučaj u praksi), dakle iz izraza (51 b),  $M$  se mjeri jednim od naprijed opisanih postupaka za mjerjenje te veličine, a brzina vrtnje jednom od kasnije opisanih metoda (v. str. 659). Ako se zaokretni moment  $M$  mjeri pomoći rastezanim mjernim traka prema sl. 65 a, nije potrebno provesti sve pretvorbe prema shemi toka djelovanja na sl. 65 b, nego se primjenom izraza

$$\epsilon = \frac{M}{\pi r^3 G} \sin 2\alpha \quad (52)$$

(gdje je  $\epsilon$  rastezanje,  $r$  polujer vratila,  $G$  modul smicanja a  $\alpha$  kut što ga zatvara mjerna traka s osi vratila) može dobiti izraz

$$P = 24,8 r^3 \epsilon n \quad (53)$$

i snagu  $P$  izračunati neposredno kao produkt rastezanja  $\epsilon$  i brzine vrtnje  $n$ . Mjerni spoj prema sl. 65 može se lako dopuniti u spoj za mjerjenje snage ako se za mjerjenje brzine vrtnje  $n$  primjeni tahogenerator i električnim putem izvrši množenje.

Mjerenje indicirane snage eksplozionih motora osniva se na mjerjenju tlaka u cilindru motora u ovisnosti o putu stapa. Tlak u cilindru motora je dinamička pojava, pa se stoga za njegovo mjerjenje upotrebljavaju piezoelektrički pretvarači.

**Mjerenje rada.** Rad je produkt snage i vremena:

$$W = P t, \quad (54)$$

pa se stoga rad jednostavno mjeri opisanim metodama za mjerjenje snage, uz upotrebu električnog brojila umjesto pokaznog instrumenta.

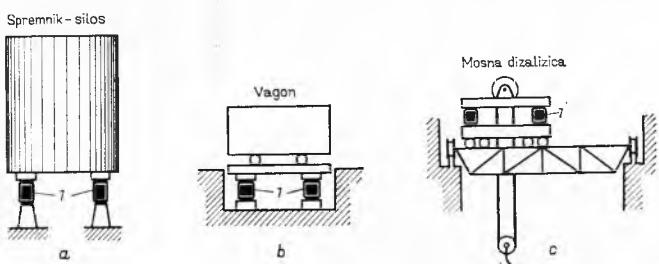
**Mjerenje mase i težine.** Masa, odnosno količina tvari, određuje se u industriji sve češće primjenom električnog vaganja, koje predstavlja posebno područje mjerjenja sile. Prema tome se pri tom ne određuje masa, već sila ( $F$ ) kojom neka masa ( $m$ ) pritiska na svoju podlogu pod djelovanjem sile teže:

$$F = mg, \quad (55)$$

gdje je  $g$  ubrzanje sile teže.

**Električno vaganje** se naširoko primjenjuje u industriji, a pogotovo kad se radi o vaganju sadržaja u velikim spremnicima i prostorima kao što su silosi (sl. 67 a), kupolne peći, bunkeri, vagoni (sl. 67 b) i dizalice (sl. 67 c). Električno vaganje ima velike prednosti u automatiziranim industrijskim pogonima, jer se može vršiti kontinuirano, te pruža mogućnost brojanja, daljinskog pokazivanja, registriranja i sumiranja izmjerenih podataka, pa se može stoga lako uključiti u uređaje za automatsko doziranje i u automatski regulirane proizvodne procese.

Uredaj za električno vaganje sastoje se od prikladnih tlačnih mjernih kutija  $I$  (sl. 67), ugradenih u podnožje ili nosače



Sl. 67. Električno vaganje: a - spremnik-silos, b - vagon, c - tereta mosna dizalica

objekata koji se važu, i električnih instrumenata za pokazivanje i registriranje, a po potrebi i za upravljanje. Budući da se vaganje svodi na mjerjenje sile, to se ovdje primjenjuju induktivitetske

## ELEKTRIČNA MJERENJA

mjerne kutije puta ili magnetoelastične mjerne kutije sile, koje rade bez pojačala, a mjerena im je pogreška  $0,5\ldots1\%$ , ili takve kutije s rasteznim mernim trakama, kojima je merna pogreška znatno manja ( $\sim 1\%$ ), ali je za njihov rad potrebno električno pojačalo. Ukoliko je pod neki objekt postavljeno više ovakvih mernih kutija, treba ih električki sjediniti pomoću sklopa za sumiranje.

**Mjerjenje protoka.** Protokom se naziva količina neke čvrste, tekuće ili plinovite tvari koja u jedinici vremena proteče kroz određeni presjek. Protok može biti volumenski  $Q = V/t$  [ $\text{m}^3/\text{h}$ ], težinski  $G = \gamma Q$  [ $\text{kp}/\text{h}$ ], ili maseni  $M = \varrho Q$  [ $\text{kg}/\text{h}$ ]. [ $V$  je volumen,  $\gamma$  specifična težina a  $\varrho$  gustoća (specifična masa) tvari koja struji.] Mjerjenje protoka odnosi se uglavnom na tekuće i plinovite tvari. Za mjerjenje protoka primjenjuju se, pored mehaničko-hidrauličkih postupaka, mehaničko-električni, toplinsko-električni i električni postupci.

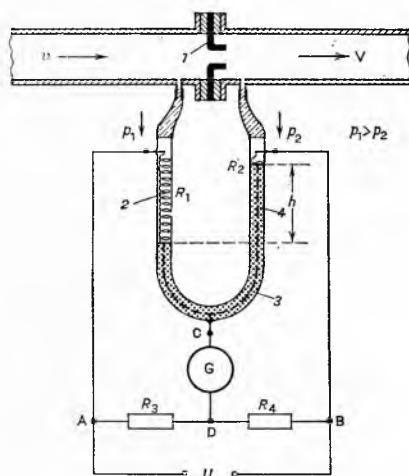
*Mjerilo s mernom prigušnicom i otporskim pretvaračem* mjeri protok po mehaničko-električnom postupku. Struja fluida čiji se protok želi mjeriti (sl. 68) propušta se kroz suženje u obliku mjerne prigušnice, sapnice ili Venturijeve cijevi 1, pri čemu dolazi do povećanja brzine strujanja i do opadanja tlaka. Tako nastala razlika tlaka  $\Delta p$  ispred i iza suženja u cjevovodu proporcionalna je kvadratu volumenskog protoka  $Q$ :

$$\Delta p = k Q^2. \quad (56)$$

Mehanički se mjeri pomoću diferencijskog manometra ili prstene vage. Pretvaranje ove razlike tlaka u električnu veličinu (npr. radi daljinskog prenošenja ili registriranja) pri mjerjenju tekućina, para i plinova može se provesti pomoću otporskog mernog pretvarača u obliku spiralne platinske žice 2 smještene u diferencijski manometar u obliku U-cijevi 3, koja je do određene visine napunjena živom 4. Krajevi otporske žice u manometru i njihova sredina C spojeni su u Wheatstoneov most koji sadrži daljnja dva otpora  $R_3$  i  $R_4$  i galvanometar G. Razlika visinu  $h$  stupaca žive u kracima U-cijevi proporcionalna je razlici tlaka  $\Delta p = p_1 - p_2$ , a time i brzini strujanja  $v$ , odnosno volumenskom toku  $Q$  (protoku) definiranom brzinom strujanja  $v$  i u presjekom cijevi S:

$$Q = v S \quad (57)$$

Zbog razlike visine  $h$  stupca žive u lijevom i desnom kraku U-cijevi mijenjaju se i duljine žica koje se nalaze izvan žive, a time i njihovi otpori  $R_1$  i  $R_2$ , pa zbog toga dolazi do neravnoteže u mostu. Galvanometrom izmjereni napon  $U_{CD}$  mjera je za protok u cjevovodu.



Sl. 68. Mjerilo protoka s mernom prigušnicom i otporskim pretvaračem

**Mjerilo s lebdećim plovkom i induktivitetskim pretvaračem** (sl. 69) radi također na mehaničko-električnom principu. Njime se pomoći induktivitetetskog pretvarača prenosi na daljinu rezultat mjerjenja protoka tzv. rotametrom.

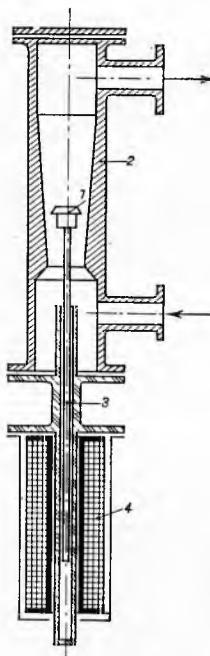
U mjerilu lebdećim plovkom (zvanom i rotametar) jedan plovak oštra ruba i specifično teži od tekućine kojoj se mjeri protok lebdi unutar vertikalne

konične cijevi kroz koju tekućina protjeće odozgo gore. Na plovak djeluje prema dolje sila teže a prema gore uzgon i sila trenja između tekućine i (uglavnom) oštrog ruba plovka. Sila trenja između tekućine i ruba plovka ovisi (među ostalim) o brzini strujanja tekućine mimo ruba, a ta brzina ovisi o protoku i o prstenastoj površini između ruba plovka i stijenke cijevi. Ako se plovak u cijevi pomiče na više, spomenuta prstenasta površina postaje, zbog koničnosti cijevi, sve veća; uslijed toga postaje sve manja brzina strujanja tekućine mimo ruba plovka i sve manja postaje sila trenja kojom tekućina povlači sobom plovak. Plovak će se zaustaviti u koničnoj cijevi na onoj visini na kojoj je prstenasta površina presjeka između njega i stijenke cijevi, odn. brzina strujanja tekućine kroz taj presjek, toliko da je zbroj sila otpora i uzgona jednaka težini plovaka. Visina na kojoj se plovak zaustavlja mjera je za protok. Rotameter se može baždari, pa na skali visine pričvršćenoj na koničnoj cijevi neposredno očitati protok.

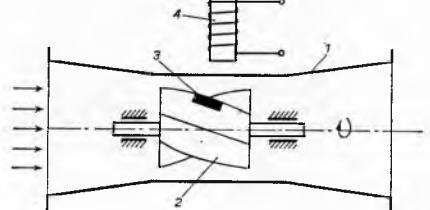
Radi prenosa mjerjenja na daljinu, na plovak 1 rotametra u koničnoj cijevi 2 pričvršćena je željezna jezgra 3 induktivitetskog pretvarača sa svitkom 4. Što se više popne plovak to se više jezgra izvuče iz svitka i to se više promijeni induktivitet. Na taj se način mjerjenjem induktiviteta mjeri visina plovka u cijevi i time, posredno, protok.

**Mjerilo protoka s turbinskim brojilom** (sl. 70) jedan dio energije strujanja, odnosno brzine, pretvara u rotaciju mernog kola (2, Wolmanovo kolo), ovisnu o brzini strujanja medija u cijevi 1. Na jednom krilu kola pričvršćen je mali trajni magnet 3, koji pri vrtnji kola inducira u svitku 4 izvan cijevi jedan naponski impuls pri svakom okretanju. Na taj način broj impulsâ u jedinici vremena predstavlja mjeru za brzinu vrtnje mernog kola i, posredno, za brzinu strujanja i protok medija. Mjerno je područje ovih mjerila od 0,5 do 180 000 l/min.

**Mjerilo protoka s toplinsko-električnim pretvaračem** sastoji se od vrlo tanke volframske žice duljine 1–5 mm koja se grijе električnom strujom. Zbog vrlo male mase, vremenska je konstanta ovakvog pretvarača neznatna: reda je veličine



Sl. 69. Mjerilo protoka s lebdećim plovkom i induktivitetskim pretvaračem



Sl. 70. Mjerilo protoka s turbinskim brojilom. 1 Cijev, 2 merno kolo, 3 trajni magnet, 4 svitak u kome se induciraju naponi

1 ms. Postavljen u medij koji struji, ogrjevni se pretvarač hlađi ovisno o brzini strujanja i položaju ogrjevne niti u odnosu na smjer strujanja (hlađenje je najbrže kad je ogrjevna nit postavljena okomito na smjer strujanja). Ova okolnost pruža mogućnost da se pored brzine strujanja odredi i smjer strujanja. Uključivanjem ogrjevnog pretvarača na mosni spoj može se lako mjeriti promjena otpora pretvarača, izazvana promjenom njegove temperature.

**Induktivitetsko mjerilo protoka** osniva se na inducirajućem naponu u tvari koja se giba u magnetskom polju. Pretvarač koji za to služi i princip njegova rada opisani su već prije (v. sl. 5). Ovom se metodom može mjeriti protok tekućine i fluidiziranog praha, ukoliko imaju dovoljno veliku električnu vodljivost.

**Mjerjenje vremena.** Električno mjerjenje vremena, koje se izvodi elektromehaničkim uređajima, dakle tzv. električnim satovima, predstavlja posebno područje mjerne tehnike, pa će ovdje biti samo ukratko spomenuto (više o tome v. u članku *Električni satovi*). Za mjerjenje kratkih vremena služe i specijalni električni sklopovi.

**Električni satovi** i satni uređaji mogu se podijeliti na više vrsta.

U jednu se grupu ubraju obični mehanički precizni satovi koji se pogone nekom električnom napravom. U nekim od njih se, radi što jednoličnijeg hoda, u kratkim vremenskim razmacima navija pero električnim putem. U drugima se njihalo preciznog sata održava u jednoličnom periodskom gibanju pomoću strujnih impulsa koji na njega djeluju preko odgovarajućeg solenoida.

Električno pogonjeni precizni sat služi često i kao glavni sat u uređajima s centralnim satom, gdje on pomoću električnih impulsa ili na drugi način upravlja pokazivanjem porednih satova.

U drugu grupu idu satovi sa sinhronim motorom. Tačnost ovih satova ovisi o stalnosti frekvencije izvora i izmjeničnog napona kojim se pogoni sinhroni motor sata. Već prema traženoj tačnosti, kao izvori služe: gradska električna mreža, kvarcni oscilatori ili atomski oscilatori. Tačnost kvarcnih satova je velika, relativna greška im iznosi  $\sim 10^{-5}$  ( $\sim 1$  s/dan), a u specijalnim izvedbama i svega  $10^{-8}$ . Satovima s atomskim upravljanjem, koji služe samo za naučne svrhe i kao primarne normale vremena, postiže se tačnost reda veličine  $10^{-10}$  ( $\sim 1$  s/300 god).

**Mjerenje kratkih vremena balističkim galvanometrima** (sl. 71). Instrument G uključen je u sklop sastavljen od izvora napona  $U$ , od otpornika  $R$  predstavlja ukupni otpor cijelog mjernog strujnog kruga i dviju sklopki  $S_1$  i  $S_2$ . Na početku mjerjenja vremena zatvori se sklopka  $S_1$ , a na kraju mjerene vremenske razdoblja otvorit će se sklopka  $S_2$ . U vremenu koje je proteklo od zatvaranja sklopke  $S_1$  do otvaranja sklopke  $S_2$  galvanometar G dobio je strujni udar.

$$Q = I t = U t / R. \quad (58)$$

Ako se  $Q$  izrazi balističkom konstantom galvanometra  $C_B$  i kutom  $a$  za koji se je uslijed strujnog udara otklonila njegova kazaljka:

$$Q = C_B a, \quad (59)$$

dobiva se izraz za mjereno vrijeme

$$t = C_B R a / U. \quad (60)$$

Ovaj se postupak primjenjuje npr. za mjerjenje vremena privlačenja kotve releja ili vremena reagiranja osigurača (koji se uključuje mjesto kontakta  $S_2$ ), a koja su reda veličine milisekunde.

**Mjerenje kratkih vremena pomoću elektrostatičkog voltmetera** (sl. 72 a). Mjerne sklopke  $S_1$  i  $S_2$  uključene su u strujni krug koji sadrži kondenzator kapaciteta  $C$ , elektrostatski voltmeter V, izvor napona  $U_0$  i otpornik otpora  $R$ . Prije početka mjerjenja sklopka  $S_1$  i  $S_2$  su zatvorene, pa je kondenzator nabijen na napon izvora  $U_0$ , koji mjeri voltmeter. Na početku mjerjenja vremena otvara se kontakt  $S_1$ , pa se kondenzator počinje izbijati preko otpora  $R$  u skladu s izrazom

$$U = U_0 e^{-t/RC}, \quad (61)$$

koji je grafički prikazan na dijagramu sl. 72 b. Na kraju mjerene vremena otvara se kontakt  $S_2$ , pa se kondenzator  $C$  prestaje izbijati, a njegov se napon  $U_1$  očita na elektrostatič-

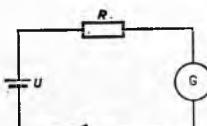
Sl. 72. Mjerenje kratkog vremena pomoću statičkog voltmetra. a) Mjerni spoj, b) mjerna karakteristika

kom voltmetu. Vrijeme proteklo od početka do kraja mjerjenja izračunava se iz izraza (61), koji u obliku prikladnijem za računanje glasi:

$$t = R C \ln \frac{U_0}{U_1}. \quad (62)$$

Ovim se postupcima mogu mjeriti vremena reda veličine milisekunde.

**Mjerenje kratkih vremena impulsnim postupcima** može se izvršiti brojenjem strujnih impulsa konstantne frekvencije (proizvedenih od električnog generatora impulsa) koje je u intervalu od početka do kraja mjerjenja primilo odgovarajuće brojilo. Kao brojilo impulsa mogu služiti elektromehanička brojila, koja broje po nekoliko stotina impulsa u sekundi, ili električka brojila, koja registriraju impulse do reda veličine  $10^6$  u sekundi i koja mogu mjeriti vremena reda veličine mikrosekunde (v. Digitalni mjerni uređaji u ovom članku, str. 608).



Sl. 71. Mjerenje kratkog vremena pomoću balističkog galvanometra

**Mjerenje brzine** može se odnositi na kretanje fluidnih tvari, dakle na brzinu strujanja, i na brzinu slobodnog gibanja čvrstih objekata i predmeta u prostoru.

**Brzina strujanja u cjevovodu** lako se može odrediti metodama mjerena protoka uz poznati presjek cjevovoda, a u slobodnom prostoru (npr. brzina vjetra) pomoću anemometra s ogrjevnim nitima.

Brzina je put u jedinici vremena, odn. derivacija puta po vremenu. Brzine se dakle mogu odrediti mjerjenjem puta i vremena, ali i posebnim uređajima za mjerjenje brzine.

**Brzina cestovnih i šinskih vozila** može se odrediti u njima samima, posredno, mjerjenjem brzine vrtnje njihovih kotača (čiji je promjer poznat). Izvana, tj. mjerom aparaturom izvan njih, brzina se vozilima, plovilima i letjelicama može mjeriti radarskim postupkom na temelju Dopplerova efekta. S jednog mjeseta (koje miruje) odašilju se preko antene usmjereni elektromagnetski valovi frekvencije  $f_0$ , koji se reflektiraju od vozila u gibanju, te se ponovo primaju antenom i odvode u mjernu aparaturu. Frekvencija primljenih valova razlikuje se od frekvencije odaslanih valova za tzv. Dopplerovu frekvenciju  $f_D$ . Ako se promatrano vozilo kreće u odnosu na radarsku aparaturu brzinom  $v$  (koja je dakako bitno manja od brzine  $c$  širenja elektromagnetskih valova), Dopplerova frekvencija iznosi (uz izvjesna zanemarenja)

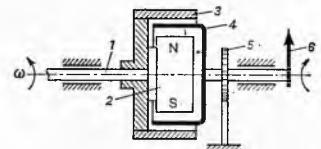
$$f_D = f_0 \pm \frac{f_0 v}{c} = f_0 \left( 1 \pm \frac{v}{c} \right), \quad (63)$$

gdje se predznak plus odnosi na približavanje, a predznak minus na udaljavanje. Ova se frekvencija  $f_D$  mjeri u pogodnoj aparaturi i predstavlja neposrednu mjeru za brzinu vozila  $v$ . Radari za ove potrebe primjenjuju frekvencije mikrovalnog područja, dakle reda veličine gigaherca.

**Mjerenje brzine vrtnje** provodi se aktivnim i pasivnim pretvaračima koji rade na različnim fizikalnim principima.

**Mjerilo brzine vrtnje s vrtložnim strujama** (sl. 73) ima više-

polno magnetsko kolo 2 okretano vratilom 1 kojemu se brzina vrtnje mjeri. Magnetsko kolo čije se silnice zatvaraju preko cilindričnog dijela 3 smješteno je u bubanju 4 od neferomagnetskog materijala (bakra ili aluminijuma), pa pri svojoj vrtnji inducira u plaštu ovog bubenja napone zbori kojih se pojavljuju vrtložne struje proporcionalne brzini vrtnje  $n$  vratila. Magnetsko polje



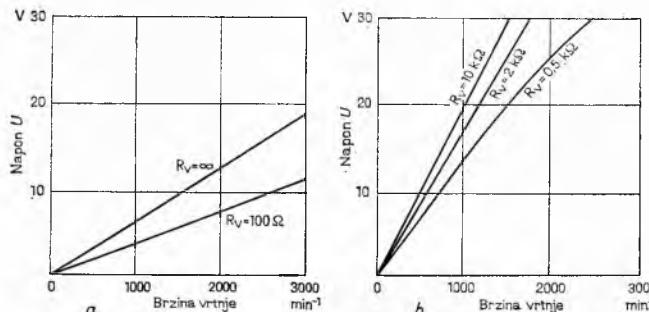
Sl. 73. Mjerilo brzine vrtnje na principu vrtložnih struja

ovih struja s magnetskim poljem polnog kola daje zaokretni moment  $M_1$ , koji okreće bubenj. Nasuprot ovom zaokretnom momentu djeluje zaokretni moment  $M_2$  spiralnog pera 5, koje se zajedno s kazaljkom 6 nalazi na osovinu bubenja. Kad se oba zaokretna momenta izjednače, kazaljka se zaustavlja na nekom otoklu  $a$  proporcionalnom mjerenoj brzini vrtnje  $n$ ; ta vrijednost brzine vrtnje očita se na skali. Prikazivanje ovog elektromagnetskog instrumenta ne može se dakle prenijeti neposredno na daljinu. Ono se primjenjuje u vozilima za mjerjenje brzine vrtnje pogonskih vratila u mjernom području od  $\sim 20$  do 10 000 okreta u minuti.

**Istosmjerni tahometarski generator** (tahogenerator) predstavlja aktivni mjerni pretvarač. Napon  $U$  inducirani u njegovu rotoru (v. sl. 3) u širokim je granicama proporcionalan brzini vrtnje  $n$  kad generator nije preopterećen. Napon inducirani u rotoru ispravlja se u komutatoru samog stroja i mjeri pomoću voltmetra s pomičnim svitkom (velikog unutarnjeg otpora), na čijoj skali mogu biti označene vrijednosti brzine vrtnje. Napon generatora ovisan je i o električnom opterećenju  $R$  priključenom na njegove stezaljke (sl. 74 a). Polarityt induciranih napona ovisan je o smjeru okrećanja vratila, što pri многim mjerjenjima predstavlja prednost. Već prema izvedbi tahogeneratora, njima se mogu mjeriti brzine vrtnje između 500 i 6000 okreta u minuti; snaga im iznosi samo  $1\text{--}2$  W. Za potrebe regulacione tehnike grade se tahogeneratori snage reda veličine 10 W.

Nedostatak je ove vrste tahogeneratora što im se četkice pri radu troše, a i to da otpor njihovih svitaka ovisi o temperaturi.

Sve ovo utječe na visinu napona što ga daje tahogenerator, a trebalo bi da taj napon bude ovisan samo o brzini vrtnje generatora, odn. vratila na koji je on priključen. Zbog ovih nedostata istosmjerni se tahogeneratori primjenjuju tamo gdje se vrtila vrte u oba smjera, ili gdje se mjeri mala brzina vrtnje.



Sl. 74. Karakteristike istosmjernog (a) i izmjeničnog (b) tahogeneratora pri različitim opterećenjima

**Izmjenični tahogenerator.** Primjenom polnog kotača koji svojim okretanjem inducira u statorskem namotu izmjenični napon, ovisan o mjerenoj brzini vrtnje  $n$ , otklanaju se sve poteškoće koje izaziva komutator. Polno kolo može imati 1...12 pari polova ( $p$ ), što ovisi o mjerenoj brzini vrtnje. Frekvencija  $f$  induciranih izmjeničnih naponima

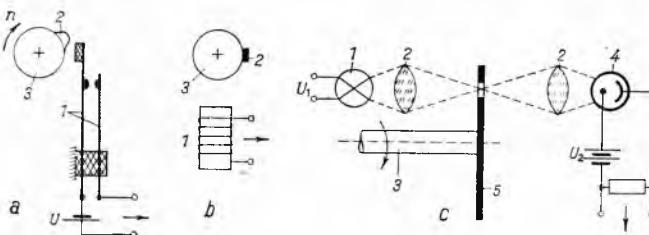
$$f = p n \quad (64)$$

ne smije biti premala (njemanje 4 do 10 Hz), jer se nakon ispravljanja premalog napona u mjernom instrumentu dobiva valovitost čije pulsacije imaju red veličine vlastite frekvencije otklonskog sistema voltmetra, pa pokazivanje instrumenta nije stabilno. Zbog toga se za mjerjenje veoma male brzine vrtnje (npr. 2 okreta u min) grade višefazni izmjenični tahogeneratori; u njima se inducira napon koji nakon ispravljanja ima samo neznatnu valovitost. Izmjenični se tahogeneratori grade za maksimalnu brzinu od 140 do 3000 okreta u minuti. Pri toj brzini vrtnje naponi iznose između 15 i 100 V, ovisno o izvedbi generatora.

Zbog induktivnog pada napona postoji u tahogeneratoru linearni odnos između napona  $U$  i brzine vrtnje  $n$  jedino pri neznatnom opterećenju ( $R_v = 10 \text{ k}\Omega$ , sl. 74 b).

**Impulsno mjerjenje brzine vrtnje.** Po ovoj metodi mjeri se brzina vrtnje tako da se broje impulsi što ih u jedinici vremena proizvedu različite naprave priključene na vratilo koje se okreće. Ovdje su dakle posrijedi digitalni postupci. Mjerni se impulsi mogu, između ostalog, proizvoditi kako je navedeno u nastavku.

Izmjenični tahogenerator proizvodi napon određene frekvencije. Visina i frekvencija napona ovisne su o mjerenoj brzini vrtnje. Mjerjenje brzine vrtnje na osnovi mjerjenja frekvencije neovisno je, međutim, o svim električnim i toplinskim utjecajima koji se javljaju pri naponskim mjernim metodama istosmjernih i izmjeničnih tahogeneratora, pa je stoga i mnogo tačnije. Me-



Sl. 75. Impulsivni davači za mjerjenje brzine vrtnje: a s mehaničkim kontaktom, b sa stalnim magnetom, c fotoelektrični

hanički kontakti 1 (sl. 75 a), koji se zatvaraju ugrađenim izdanjem 2 na vratilu 3, u pripadnom strujnom krugu s vlastitim izvorom struje daju impulse čiji broj ovisi o broju okretaja vratila. Induktivitetski (magnetski) davač (sl. 75 b) sastoji se od malog magneta 2 pričvršćenog na vratilo 3, koji pri svakom okretu inducira u svitku 1 naponski impuls. Fotoelektrični davač (sl.

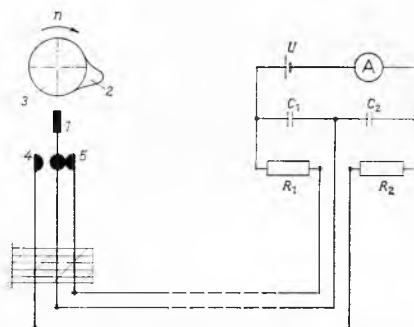
75 c) sastoji se od žarulje 1 priključene na istosmjerni napon  $U_1$  (da bi svjetlo bilo bez pulsacija), optičkog sistema 2, fotočelije 4 i okrugle ploče 5, koja je pričvršćena na vratilo 3 i s njime se vrti. Na ploči je jedna rupica ili više njih; kad se ploča vrti s vratilom, zraka se svjetla periodski propušta kroz rupicu u ploči i time aktivira fotočeliju te ova daje strujne impulse uz pomoć izvora struje  $U_2$  koji je na nju priključen. Ovakvim optičkim proizvodnjem impulsa ne opterećuje se vratilo, pa se mjerena mogu vršiti i na posve slabim motorima, a da se oni pri tome uopće ne opterećuju niti koče mjernim uređajima. Optičkim postupkom mogu se mjeriti i najveće brzine vrtnje, sve do preko 100 000 okreta u minuti.

Prednost je ovih impulsnih mjernih metoda što električna svojstva voda i kolebanja temperature imaju neznatan utjecaj na daljinsko prenošenje podataka.

Izvjesni nedostatak digitalnih mjernih postupaka, inače veoma tačnih, jest u tome što oni daju podatke (rezultat) o izvršenom mjerjenju tek nakon nekog određenog vremenskog razmaka kroz koji se broje mjereni impulsi. Prema tome i naprijed opisane naprave pokazuju mjerenu brzinu vrtnje tek nakon nekog vremena, uvjetovanog procesom brojanja. Time dolazi do nekog mrvog vremena u samom mjerjenju. Skraćuje li se to vrijeme, opada tačnost mjerjenja.

Brzine brojanja električnim brojilima impulsa (skalerima) veoma su velike: iznose  $\sim 1$  milijun impulsa u sekundi (1 MHz). Da bi se ostvarila izvanredno velika tačnost mjerjenja koju omogućavaju ovakve brzine brojanja, potrebno je pomoći kvarcnog oscilatora tačno upravljati početkom i krajem mjerjenja, dakle vremenom brojanja. Za to potrebne kompleksne električne aparature su skupe, pa se primjenjuju samo u posebne svrhe, većinom za laboratorijska istraživanja.

Za mjerjenje nižih frekvencija impulsa, a time i manje brzine vrtnje, može služiti impulsno-frekvenčni postupak (sl. 76) direktnog pokazivanja. On se sastoji u tome da se pomoću me-



Sl. 76. Impulsno mjerilo brzine vrtnje na principu pražnjenja kondenzatora

haničkih kontaktata 4 i 5 (sličnih kontaktima na sl. 75 a), koje otvara i zatvara kotvu 1 pokretanu od izdanka 2 učvršćenog na vratilu 3, naizmjence nabijaju i preko otpornika otpora  $R_1$  i  $R_2$  izbijaju kondenzatori kapaciteta  $C_1$  i  $C_2$ . Miliampmetar A mjeri pri tome prosječnu struju nabijanja kondenzatora, pa njegova skala može biti bažđarena u vrijednostima brzine vrtnje.

**Stroboskopsko mjerjenje brzine vrtnje** osniva se na tromosti ljudskog oka, koja se očituje u tome da ono primljenu sliku zadržava kratko vrijeme i pošto se je promatrani objekt pomakao. Mjerjenje se sastoji u tome da se rotirajuće tijelo (vratilo) čija je brzina vrtnje želi izmjeriti obilježi uočljivim znakom (npr. kružnim segmentom) i osvijeti bljeskajućim svjetлом stalne i poznate frekvencije koju proizvodi stroboskop. Kao stroboskop služi ovdje bljeskalica s električnom aparaturoom pomoći koju se upravlja frekvencijom paljenja bljeskalice. Rotirajući predmet obilježen znakom na njemu izgleda kao da se je zaustavio kad je brzina vrtnje cijelobrojni višekratnik frekvencije bljeskanja  $f$ . Brzina vrtnje  $n$  izračunava se prema izrazu

$$n = \frac{f_2 f_1}{f_2 - f_1} \quad (65)$$

iz dvije izmjerene najbliže frekvencije  $f_1$  i  $f_2$  pri kojima se rotirajući znak prividno umirio.

Brzina vrtnje može se mjeriti stroboskopski i bljeskalicom (npr. tinjalicom) stalne frekvencije  $f$  ako se na čelo vratila čija se brzina vrtnje mjeri učvrsti bijela segmentna ploča s različitim brojem  $q$  ( $q = 1, 2, 3, \dots$ ) crnih segmentata u koncentričnim kružnim poljima. U općenitom slučaju, pri mjerenu brzine vrtnje, segmenti su u jednom od koncentričnih krugova osvijetljeni bljeskavim svjetlom frekvencije  $f$  ne miruju već se svi polako okreću u smjeru vrtnje ili obrnuto. Ako se uoči krug u kojem se segmenti prividno najsporije kreću, i sa  $z$  označi broj segmentata koji je prošao kroz jednu promatrana tačku u jedinici vremena, mjerena je brzina vrtnje odredena izrazom

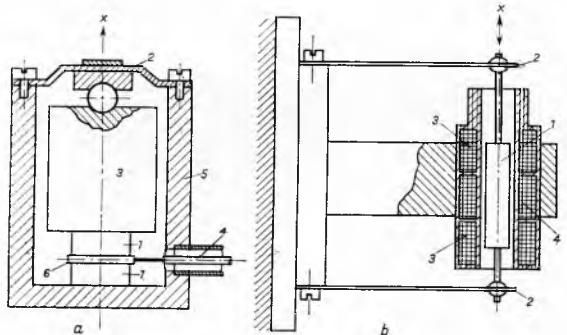
$$n = \frac{f}{q} \pm \frac{z}{q}. \quad (66)$$

**Mjerenje ubrzanja** provodi se akcelerometrima čiji se rad zasniva na Newtonovu zakonu gibanja:

$$F = m a. \quad (67)$$

Ako je masa  $m$  poznata i konstantna i ako se izmjeri sila  $F$ , može se pomoću izraza (67) odrediti ubrzanje (akceleracija)  $a$ . Uređaji za mjerjenje pravocrtnog akceleracije sadrže seizmičku masu koja se može gibati u odnosu na okvir u koji je upeta.

**Piezoelektrični akceleratori** (sl. 77 a) služe za mjerjenje ubrzanja na osnovi mjerjenja sila, dakle bez gibanja (puta) seizmičke mase. Pločice 1 izradene od piezoelektričnog kristala (npr. kvarca, Seignetteove soli ili barijum-titanata) elastično su upete pomoću membrane 2 i okvira 5, a prislonjene su uz seizmičku masu 3.



Sl. 77. Akcelerometri za mjerjenje pravocrtnog ubrzanja:  
a) piezoelektrični, b) s perom

Ako se čitav uređaj pomakne u smjeru  $x$ , okomitom na površinu pločica, javlja se sila  $F$  koja izaziva na pločicama piezoelektrični nabo; taj se nabo odvodi s elektrode 6 preko voda 4.

**Akcelerometri s perom** (sl. 77 b) mjeru se ubrzanja na osnovi mjerjenja puta. Seizmička masa 1 obješena je elastično na dva plosnata pera 2 tako da se pri aksijalnom smjeru gibanja ( $x$ ) ova masa pomakne u nutrini diferencijskog transformatora i tim svojim novim položajem izazove promjenu napona induciranih u sekundarnim svicima 3, koji obuhvaćaju primarni svitak 4. Ova promjena napona mjeru je za ubrzanje.

Kod dinamičkih se mjerena ubrzanje može odrediti kao derivacija izmjerene brzine ili kao dvostruka derivacija izmjerene put po vremenu. Deriviranje se ovdje vrši električnim RC-sklopovima.

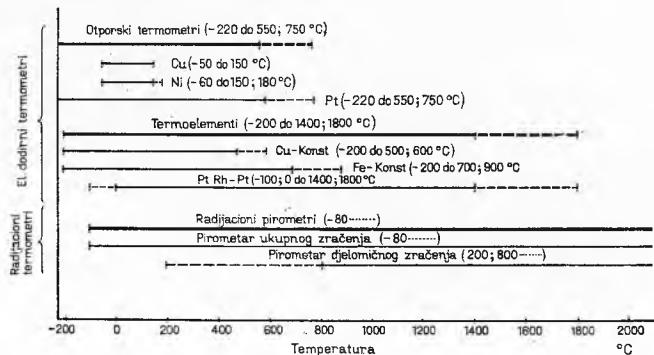
Akcelerometri se primjenjuju i za mjerjenje titranja mehaničkih konstrukcija.

**Mjerenje kružnog ubrzanja** izvodi se akcelerometrima u kojima je seizmička masa postavljena tako da se može zaokretati. Kružno se ubrzanje može odrediti primjenom istosmernog tahogeneratora i električnim deriviranjem broja okretaja pomoći kondenzatora C i otpora koji predstavlja sam strujni krug, dakle pomoći sklopa RC.

#### Električno mjerjenje kaloričnih veličina

**Mjerenje temperature električnim putem** može se provesti dodirnim i radijacijonim termometrima i pirometrima. Za izbor i primjenu temperaturnog mjernog pretvarača (detektora) i pripadnog mjernog postupka mjerodavni su: maksimalna tem-

peratura koju treba izmjeriti, mjerno područje (opseg), vremensko ponašanje, zahtjevi tačnosti, odnos između mjerene veličine i dobivene električne veličine (mjerni signal), uvjeti mjerena i mogućnosti njegove primjene. Mjerno područje osnovnih vrsta električnih termometara prikazano je na sl. 78. Dodirni termometri



Sl. 78. Mjerna područja električnih termometara (crtkano: proširenje mjernog područja specijalno gradenim termometrima)

prikladni su prvenstveno za niže i srednje temperature, a radiacioni termometri (pirometri) imaju prednost za mjerjenje viših temperatura.

**Dodirni termometri** rade na principu konvektivnog prelaza topline s ugrijanog tijela na mjerni pretvarač (detektor). Kao dodirni termometri primjenjuju se termoelektrični termometri (s termoelementima) i otporski (žični i termistorski) termometri.

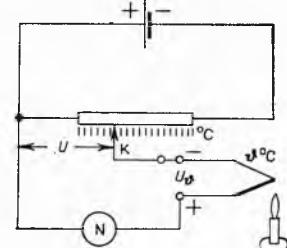
**Termoelektrični termometri s termoelementom** su najpoznatiji električni dodirni termometri. Termonepon koji nastaje pod djelovanjem mjerene temperature mjeri se milivoltmetrom s pomičnim svitkom bažđarenim u stupnjevima ili električnim kompenzatorom. Tačnost mjerene temperature  $\vartheta_1$  ovisi u prvom redu o konstantnosti poredbene temperature (temperature hladnog kraja)  $\vartheta_0$ . Održavanje ove temperature na nekoj konstantnoj vrijednosti postiže se za tehnička mjerena pomoći mjernog termostata, tj. električki grijane kutije u kojoj se automatskim regulatorom uz pomoći kontaktog termometra održava konstantna temperatura od  $50 \pm 1$  °C. Vrijeme reagiranja termoelemenata je kratko zbog njihove male mase.

**Termoelektrični termometri s kompenzatorom** (sl. 79) primjenjuju se samo za vrlo tačna mjerena temperature (npr. za bažđarenje skale drugih termometara).

Mjerjenje se osniva na usporedbi nepoznatog termonepona  $U_\theta$  s nekim poznatim naponom  $U$ . Za vrijeme mjerena se iz termoelementa ne uzima struja da ne dode do pada napona u njegovom krugu. Pad napona u bažđarenju kliznoj žici mijenja se pomicanjem kliznika do te dok ne kompenzira termonepon  $U_\theta$  što ga daje termoelement, tj. dok nulindikator N (osjetljivi instrument) ne pokaze nulu. Položaj kliznika K mjeri je za mjereni termonepon  $U_\theta$  a time i za mjerenu temperaturu  $\vartheta$ , koja se može očitati izravno na skali otpornika.

**Žični otporski termometri** rade s otpornicima kojima je otpor ovisan o temperaturi, dakle s pasivnim pretvaračem, pa im stoga treba dodatni izvor istosmjerne struje napona  $\sim 6$  volti. Ovi se termometri u većini slučajeva primjenjuju u zajednici s instrumentom s unakrsnim svicima u kvocijentnom spoju sa dvožičnim (sl. 80 a) ili trožičnim (sl. 80 b) priključnim vodom. Otpornik s otporom  $R_\theta$  ovisnim o temperaturi nalazi se u krugu prvog (otklonskog) svitka, kroz koji teče struja  $I_1$ , a u krugu drugog (usmjereno) svitka, kroz koji prolazi struja  $I_2$ , nalazi se otpornik stalnog otpora  $R_p$ .

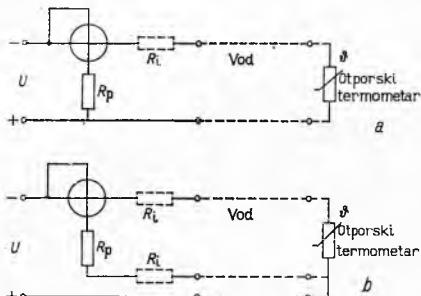
Pokazivanje temperature otporskih termometara s kvocijentnim instrumentom neovisno je o kolebanju napona izvora, bez obzira na broj priključnih vodova. Pri promjenama napona napajanja



Sl. 79. Termoelektrični termometer s kompenzatorom

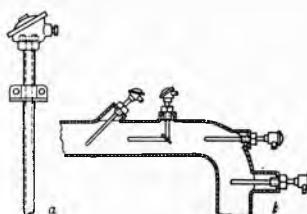
mijenja se, naime, jakost struje u jednom i drugom krugu u istom omjeru, a kako instrument pokazuje kvocijent obiju struja ( $I_1/I_2$ ), to se greške zbog promjena napona napajanja automatski eliminiraju. Upotrijebi li se, međutim, za ovu svrhu običan instrument s pomicnim svitkom, napon izvora otporskog termometra mora biti stabiliziran.

U spoju s trožičnim vodom (sl. 80 b) ni promjene otpora voda izazvane promjenom temperature okoline ne utječu na pokazivanje kvocijentnog instrumenta i rezultat mjerjenja jer ove promjene otpora izazvate temperaturnim promjenama jednako djeluju na strujne krugove obaju svitaka instrumenta. Pomoću otpornika otpora  $R_1$  izjednačava se otpor voda na propisanu vrijednost.



Sl. 80. Žični otporski termometri u kvocijentnom spoju: a s dvožičnim, b s trožičnim priključnim vodom

Termoelementi i otpornici otporskih termometara stavljuju se radi praktične industrijske primjene u zaštitni metalni oklop. Izvedba i vrsta oklopa ovisna je o svrsi primjene i o eventualnoj mogućnosti mehaničkih ili kemijskih oštećenja. Zaštitni oklop (sl. 81 a) povećava masu čitavog detektora i time postaje veća tromost mjerjenja. Da bi mjerni instrument sa što manjom tromošću slijedio promjene temperature mjerjenog medija (tekućine koja strui u cijevi), potrebno je da bude ugrađen na takvom mjestu i na takav način da je prelaz topline na nj što brži (strujanje oko njega što turbulentnije). Nekoliko načina ugradnje termometra u cijevni vod prikazuje sl. 81 b.



Sl. 81. Pogonski električni dodirni termometri. a Zaštitni oklop i priključna kutija, b smještaj u cjevovodu

*Termistorski termometri* primjenjuju kao mjerni pretvarač neki poluvodički otpornik s negativnim temperaturnim koeficijentom. Ovi otpornici pojavljuju se na tržištu pod raznim komercijalnim nazivima, npr. Newi (NSF), NTC (Valvo), Thermistor (tvornice u USA), Thernewid (Siemens & Halske), Urdox (Osram). Poluvodički otpornici imaju nedostatak što im je karakteristika otpora nelinearna. Njihova je osjetljivost i tačnost za neko uže temperaturno područje ipak veća nego osjetljivost drugih temperaturnih pretvarača. Minijaturne dimenzije i izvedba termistora dozvoljavaju dinamičko mjerjenje toplinskih veličina s izvanredno malom vremenskom konstantom, manjom od 1 ms. Radi mjerjenja temperature ovakvi su termistori obično spojeni u mosni spoj bez pojačala ili, rjeđe, sa pojačalom, tako da se umjesto skupljih instrumenata s unakrsnim svicima mogu kao pokazni instrumenti upotrebljavati obični instrumenti s pomicnim svitkom. Zbog neznatne mase detektora ovakvih termometara, pri mjerjenju se mjerom objektu gotovo i ne oduzima toplina, pa termistorski termometri mogu služiti za mjerjenje temperature na malim predmetima, kao npr. na kontaktima, osiguračima, namotima. Zbog brzog reagiranja i male pogreške (oko  $\pm 0,05^\circ\text{C}$ ), termistorski se termometri primjenjuju i u medicinske svrhe.

*Radiacioni termometri*. Mjerjenje temperature neposrednim dodirom s ispitivanim medijem ili tijelom nije uvjek moguće kad je temperatura vrlo visoka. U tom se slučaju za mjerjenje iskoristiava energija koju u obliku elektromagnetskih valova (različite valne dužine) zrače zagrijani objekti. Pri mjerjenju zračenja in-

strument ne stoji u dodiru s mjerjenim predmetom, pa se stoga samo neznatno ugrijava, a time i čuva od oštećenja.

Ovakva se vrsta termometara zove radijaciioni termometri ili radijacioni pirometri. (Nazivaju se i naprosti pirometrima — u užem smislu to riječi. U širem smislu nazivaju se pirometrima svi instrumenti za mjerjenje temperaturâ od crvenog žara naviše.) Postoji više izvedbi koje se osnivaju na različitim principima. Pretvorbe koje su mjerodavne za ovakva mjerjenja dogadaju se još izvan samog instrumenta, a odnose se na fizikalnu ovisnost mjerene temperature  $\vartheta$  i nekog određenog svojstva zračenja (isijavanja), npr. na njegovu energiju  $E$ . Ovako nastala veličina podvrgava se zatim u instrumentu dalnjim pretvorbama (v. npr. sl. 83 b) koje postupno dovode do električne veličine kojom je predstavljena mjerena temperatura.

Jedan dio energije što je sadrži neko tijelo pretvara se u elektromagnetske valove koje ono zrači na raznim valnim dužinama ( $\lambda$ ) u infracrvenom ( $\lambda \geq 780 \text{ nm}$ ), vidljivom ( $780 > \lambda \geq 380 \text{ nm}$ ), a ponešto i u ultravioletnom dijelu spektra ( $\lambda < 380 \text{ nm}$ ), koji se jedan na drugi nadovezuju. Spektralna podjela jakosti zračenja na pojedinim valnim dužinama ovisna je, između ostalog, o temperaturi tijela i o svojstvima njegove površine. Tok zračenja koji pada na neko tijelo dijelomično se apsorbira, dijelomično reflektira, a dijelomično propušta kroz to tijelo. Faktor apsorbacije  $a$  nekog tijela je omjer između onog dijela toka zračenja koji to tijelo apsorbira (upija) i toka koji na nj pada. Analogno se definira faktor refleksije (odbijanja)  $r$  i faktor transmisije (propuštanja)  $p$ .

Prema upravo rečenom vrijedi odnos:

$$a + r + p = 1. \quad (68)$$

*Crnim tijelom* naziva se tijelo koje apsorbira sve zrake što na njega padaju, kojemu je dakle  $a = 1$ , a prema tome  $r = p = 0$ . Crno tijelo, koje maksimalno apsorbira, prema Kirchhoffovu zakonu maksimalno i isijava energiju temperaturnog zračenja. Zračenje crnog tijela (*crno zračenje*) predstavlja dakle maksimum energije što je neko tijelo može na datoj temperaturi isijaviti u obliku temperaturnog zračenja. Energija temperaturnog zračenja ( $E$ ) koju je isijava bilo koje tijelo na određenoj temperaturi može se stoga izraziti energijom  $E_c$  što je isijava crno tijelo na istoj temperaturi i faktorom emisije (zračenja)  $s \leq 1$ , dakle

$$E = s E_c. \quad (69)$$

Crno tijelo se u prirodi ne nalazi potpuno realizirano. (Čada i slične tvari koje apsorbiraju gotovo sve vidljivo zračenje na običnoj sni temperaturi crne, odатle hipotetskom crnom tijelu ime.) Jednake karakteristike kao crno zračenje ima zračenje koje izlazi iz malog otvora u zagrijanom šupljentu tijelu (*mjernom crnom tijelu*). Budući da sve zračenje koje kroz taj otvor uđe u šupljinu u njoj zadrži (apsorbira) reflektirajući se od jednog zida na drugi, po Kirchhoffovu zakonu i zračenje koje iz otvora izlazi mora biti maksimalno, tj. imati svojstva crnog zračenja.

U nastavku navedeni su faktori emisije nekih tvari: srebro (poliran) 0,01, bakar (politan) 0,11, zlato (polirano) 0,13, zlato (tekuće) 0,40, ugljen 0,85.

Upukuna energija zračenja crnog tijela  $E_c$  proporcionalna je prema Stefan-Boltzmannovom zakonu četvrtoj potenciji apsolutne temperature:

$$E_c = \sigma T^4. \quad (70)$$

Koefficijent proporcionalnosti  $\sigma$  je Stefan-Boltzmannova konstanta koja ima vrijednost

$$\sigma = 5,672 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}.$$

Za dva tijela koja izmjenjuju zračenje, a imaju temperature  $T_2$  i  $T_1$ , gdje je  $T_2 > T_1$ , vrijedi:

$$E_c = \sigma (T_2^4 - T_1^4). \quad (71)$$

Energija  $E_{c\lambda T}$  što je zrači crno tijelo na valnoj dužini pri  $\lambda$  određenoj apsolutnoj temperaturi  $T$  određena je Planckovom formulom za spektralno zračenje:

$$E_{c\lambda T} = C_1 \lambda^{-5} (e^{\epsilon_0/\lambda T} - 1)^{-1}. \quad (72)$$

$C_1$  i  $C_2$  su empirijske konstante, a je baza prirodnih logaritama. Planckova formula (72) grafički je prikazana dijagramom na sl. 82, iz kojeg se vidi da relativni intenzitet zračenja ovisi znatno o duljini vala. Iz slike se nadalje vidi da se s porastom temperature maksimum jakosti zračenja pomiče prema kraćim valovima. W. Wien utvrdio je svojim zakonom pomaka (1893) da je valna dužina  $\lambda$  koja odgovara maksimalnoj jakosti zračenja crnog tijela obrnuto proporcionalna apsolutnoj temperaturi  $T$ . Ovaj zakon glasi dakle

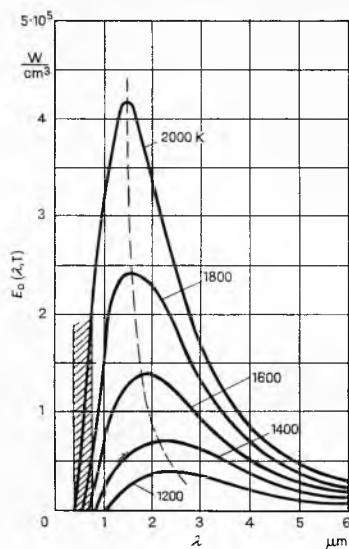
$$\lambda_{\max} \cdot T = b, \quad (73)$$

gdje je  $b$  konstanta koja iznosi  $2,884 \text{ nm} \text{ } ^\circ\text{K}$ .

Na ovom se zakonu temelji činjenica da tijelo koje se ugrijava ponajprije isijava toplinske zrake a zatim postupno mijenja boju od crvenog (velika duljina vala) preko žutog do bijelog zračenja.

Na zakonu izraženom jedn. (71) osniva se pirometar ukupnog zračenja. Energija zračenja neke određene duljine vala  $E_\lambda$  proporcionalna je odgovarajućoj gustoći rasvjete  $B_\lambda$ , pa prema tome  $B_\lambda$  raste jednoznačno s temperaturom  $T$ . Ovo se iskoristiava u pirometrima dijelomičnog zračenja.

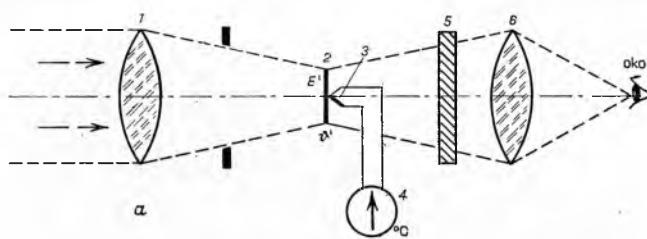
Pirometar ukupnog zračenja osniva se na mjerenu cijelokupne energije zračenja što je zagrijano tijelo isjava na različnim valnim dužinama. Ovu energiju predstavlja površina ispod krivulje na sl. 82, a dana je Stefan-Boltzmannovim zakonom (jedn. 70).



Sl. 82. Raspodjela intenziteta zračenja u spektru, u ovisnosti o temperaturi

Shematski prikaz uobičajenog sistema pirometra ove vrste prikazuje sl. 83 a. Zračenje energije koje dolazi iz veće daljine s užarenog tijela preko leće objektiva 1 fokusirano je na sabirnu ploču 2 od zacrnjenog metala koja se pri tome ugrijava. Time izazvani termonapon koji nastaje na termočlanku 3 (ili termobateriji od više termočlanaka) prislonjenom na sabirnu ploču mjeri se instrumentom sa zakretnim svitkom 4, koji je bažđaren u stupnjevima temperature. Pomoću okulara 6 instrument se usmjerava na ispitivani objekt. Filter 5 zaštićuje pri tome oko od prejakog zračenja.

Shemu djelovanja pirometra prikazuje sl. 83 b iz koje se vidi da pretvorba temperature  $\vartheta$  u energiju ukupnog zračenja nastaje još izvan instrumenta, a odredena je Stefan-Boltzmannovim zakonom. Shema toka djelovanja sadrži još ove označke:  $E'$  energija zračenja filtriranog objektivom 1,  $\vartheta'$  temperatura sabirne ploče 3,  $U$  termonapon,  $I$  struja mjernog sistema,  $\alpha$  otklon kazaljke mjernog instrumenta. Budući da leća objektiva 1 apsorbira infracrveno zračenje dugog vala, običnim se izvedbama ovakvog pirometra ne mogu mjeriti temperature ispod  $600^\circ\text{C}$ . Da bi se sprječila apsorpcija infracrvenih zraka, umjesto leće objektiva primjenjuje se parabolično metalno zrcalo, čime se zbog gotovo potpune refleksije zrcala omogućava mjerjenje i nižih temperatura. Mjerno područje instrumenta sa lećom seže od  $600^\circ\text{C}$  do  $2000^\circ\text{C}$ .



Sl. 83. Optički pirometar ukupnog zračenja. a) Shema uređaja, b) shema djelovanja

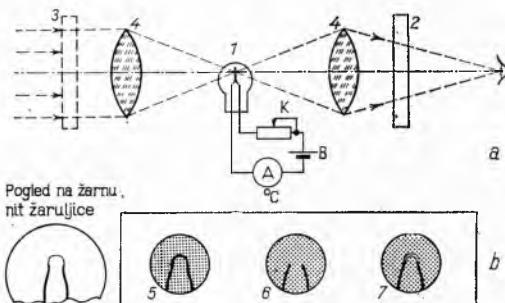
Pirometar djelomičnog zračenja (optički pirometar) služi za utvrđivanje temperature užarenih tijela mjeranjem energije što ih ta tijela zrače u nekom odredenom intervalu valne dužine.

Na sl. 82 vidi se da zračena energija (površina ispod krivulje) ovisi o temperaturi. To vrijedi kako za ukupnu zračenu energiju

tako i za energiju zračenu u bilo kojem intervalu valnih dužina  $\lambda + \Delta\lambda$ . Prema tome može se pirometrom, mjereći energiju zračenu usijanim tijelom u nekom intervalu spektra, utvrditi njegova temperatura. Optički pirometar reagira na područje zračenja široko svega  $\sim 10$  nm koje se nalazi u vidljivom dijelu spektra, po prilici na valnoj duljini 650 nm (desni rub šrafiranoj područja u sl. 82).

Među optičkim pirometrima najčešće se primjenjuje *pirometar s užarenom niti* (sl. 84). U optičkoj osi dalekozora 4 pomoću kojeg se osmatra užareno tijelo nalazi se žaruljica s volframskom niti 1. Filter 2 propušta samo zrake određenog intervala valnih dužina (npr. za mjerjenje nižih temperatura služi crveni filter). Pomicanjem kliznika K na promjenljivom otporniku mijenja se struja koja dolazi iz izvora B sve dotle dok njezina jakost nije upravo tolika da užari volframovu nit žaruljice do iste svjetline kao što je imao pozadina (sl. 84 b). U tom slučaju nit ima istu temperaturu kao i mjerno tijelo. Na taj je način struja koju pokazuje miliampmetar A ugraden u mjerilo postala mjera za temperaturu. Instrument može biti bažđaren izravno u stupnjevima temperature. Mjerno uređaj se može izvesti i tako da se umjesto struje očitava odgovarajući položaj kliznika K promjenljivog otpornika, čija skala mora u tom slučaju biti bažđarena u stupnjevima temperature.

Budući da temperatura niti žarulje ne smije biti viša od  $1500^\circ\text{C}$  (jer se tada mijenja ovisnost temperature o struci), za mjerjenje viših temperatura dodaje se filter za potamnjene 3. Postoje i konstrukcije pirometara u kojih je ogrjevna struja niti konstantna, a ispred žarulje se pomiče tzv. sivi klin, tj. sivi filter koji postupno postaje prema jednoj strani sve tamniji. Položaj ovog filtera je mjera za temperaturu. Temperaturno mjerno područje ovih pirometara nalazi se između  $700$  i  $3500^\circ\text{C}$ ; oni se bažđare pomoću



Sl. 84. Optički pirometar s užarenom niti. a) Shema uređaja: 1 žarna nit, 2 i 3 filtri, 4 leće. b) Izgled žarne niti: 5 kad joj je temperatura niža od mjerene, 6 kad joj je temperatura jednaka mjerenoj, 7 kad joj je temperatura viša od mjerene

mjernog crnog tijela. Mjerna pogreška nalazi se unutar granica  $\sim \pm 0,5\%$ .

**Električno mjerjenje količine topline** potrebno je, između ostalog, u razdjelnim cjevovodnim mrežama toplana, koje toplinom opskrbljuju veći broj potrošača (pogone, uredske i stambene zgrade). Količina topline  $Q_t$  izražava se u kilokalorijama ili džulima ( $1 \text{ kcal} = 4185,5 \text{ J}$ ). Kao nosilac topline služi obično voda ili para. Gustoća toplinskog toka  $\varphi$  što je prima potrošač predstavlja količinu topline primljene u jedinici vremena:  $\varphi = dQ_t/dt$  ( $\text{kcal/s}$  ili  $\text{W}$ ) a može se odrediti kao produkt masenog protoka  $q$  ( $\text{kg/s}$ ) nosioca topline, njegove specifične topline  $c$  ( $\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$ ) i razlike temperature  $\Delta\vartheta$  ( $^\circ\text{C}$ ) između temperaturâ nosioca na ulazu ( $\vartheta_u$ ) i na izlazu ( $\vartheta_l$ ) prema izrazu:

$$\varphi = \frac{dQ_t}{dt} = q c \Delta\vartheta . \quad (74)$$

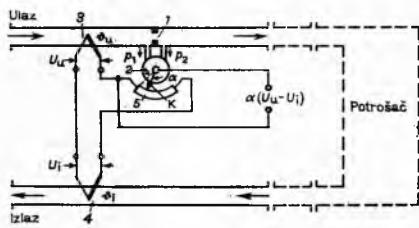
Iz gustoće toplinskog toka  $\varphi$  dobiva se zbrajanjem kroz prostranu vrijeme  $t$ , dakle integriranjem, količina topline

$$Q_t = \int_0^t \varphi dt . \quad (75)$$

Budući da je za jedan upotrijebljeni medij (nosilac topline) specifična toplina  $c$  praktički konstantna, mjerjenje se veličine  $Q_t$  svedi na mjerjenje masenog protoka  $q$  nosioca topline (npr. pomoću mjerne prigušnice) i razlike temperaturâ. Ovo posljednje mjerjenje

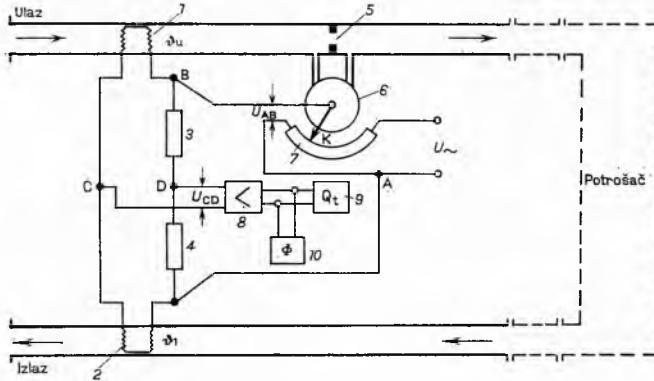
mora biti što tačnije, jer se često radi o razlikama temperaturu od samo nekoliko stupnjeva. Mjerjenje se vrši otporskim termometrima ili termoelementima. Izračinavanje produkta izmjerenih vrijednosti za  $q$  i  $\Delta\theta$  može se vršiti električki ili mehanički.

Mjerilo gustoće toplinskog toka  $\varphi$  s termoelementima i mernom prigušnicom prikazano je na sl. 85. Maseni protok medija  $q$  kroz cjevovod mjeri se hidraulički mernom prigušnicom 1 i prstenastom vagonom 2. Prstenasta cijev ove vase do polovice je napunjena tekućinom koja se pod djelovanjem tlakova  $p_1$  i  $p_2$  podiže u njoj i time zaokreće prstenastu vagu za odgovarajući kut  $\alpha$  koji je mjera za protok medija. Ulazna temperatura  $\vartheta_u$  i izlazna temperatura  $\vartheta_i$  mjeri se termoelementima 3 i 4 koji su suprotno spojeni, pa se na kružnom visokoomskom otporniku 5 dobiva razlika termonaponâ ( $U_u - U_i$ ) koja je proporcionalna razlici temperaturâ  $\Delta\theta$ . Kliznik K ovog otpornika, koji pokreće prstenasta vaga 2, zahvaća napon koji je proporcionalan produktu  $q(U_u - U_i)$ , a time i gustoći toplinskog toka  $\varphi$ , u skladu s izrazom (75). Zbrajanjem mjereneh vrijednosti u električnom brojilu dobiva se količina topline  $Q_t$ .



Sl. 85. Mjerilo gustoće toplinskog toka s prigušnicom i termoelementima

Mjerilo gustoće toplinskog toka  $\varphi$  i količine topline  $Q_t$  pomoću otporskim termometara u mosnom spoju (sl. 86). Temperature  $\vartheta_u$  i  $\vartheta_i$  mjeri se otporskim termometrima 1 i 2 koji su uključeni u mosni spoj s otpornicima 3 i 4. Protok, tj. masa medija koja protječe u jedinici vremena, mjeri se hidraulički pomoću mjerne prigušnice 5 i prstenaste vase 6, koja pokreće kliznik K otpornika 7 (spojenog na mrežu u potenciometarskom spoju); s otpornika 7 uzima se merni napon  $U_{AB}$ , koji se mijenja u ovisnosti o protoku. Napon



Sl. 86. Mjerilo gustoće toplinskog toka i količine topline s otporskim termometrima

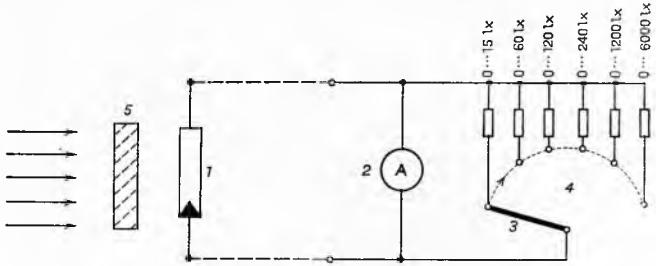
$U_{CD}$  mosta i pripadna struja proporcionalni su protoku  $q$  i razlici temperaturâ  $\Delta\theta$ , a time i gustoći toplinskog toka  $\varphi$ . Uključivanjem ovog napona preko pojačala 8 na električno brojilo 11 na ovome se dobiva mjerena količina topline  $Q_t$ , a na pokaznom instrumentu 10 dobiva se gustoća toplinskog toka  $\varphi$ .

#### Električno mjerjenje svjetlosnih veličina

U fotometriji mogu se neka mjerjenja provoditi i uz primjenu električnih mernih aparata i metoda. Tako se mogu npr. na taj način mjeriti osvijetljenost ( $E$ ), faktor prozirnosti i druge veličine, a posredno mogu se utvrditi i skoro sve ostale optičke veličine.

**Mjerjenje osvijetljenosti.** Električni fotometar (luksmetar) služi za mjerjenje osvijetljenosti (jakosti rasvjete)  $E$  koja se izražava u luksima ( $1 \text{ lx} = 1 \text{ lumen/m}^2$ ). Fotometri se upotrebljavaju kao samostalni instrumenti ili kao dio nekih optičkih mernih

naprava, npr. Ulbrichtove kugle (v. Fotometrija). Oni služe za kontrolu osvijetljenosti radnih mesta, prostorija i javnih površina, a primjenjuju se također u fotografiji, meteorologiji i dr.



Sl. 87. Električni fotometar za mjerjenje jakosti rasvjete

Električni fotometri moraju, naravno, imati istu spektralnu osjetljivost kao čovječe oko i ne smiju biti osjetljivi na infracrveno i ultravioletno svjetlo, što se postiže odgovarajućim filtrima. Konstrukciju električnog fotometra pokazuje sl. 87. Mjerni se uređaj sastoji od selenskog fotoelementa 1 na koji je priključen miliampmetar 2 sa zaokretnim svitkom kojemu je dodan niz šantova 4 koji se preklopom 3 biraju tako da se promijeni osjetljivost mernog sistema i uključi željeno mjerno područje (npr.  $0\cdots 15 \text{ lx}$ ,  $0\cdots 60 \text{ lx}$ ,  $0\cdots 6000 \text{ lx}$ ). Za mjerjenje osvijetljenosti veće od  $6000 \text{ lx}$  primjenjuje se dodatni filter 5 kojim se smanjuje jakost rasvjete, npr. na dvadeseti dio, a time i osjetljivost mjerne aparature. Postojeća osnovna mjerna područja važe u tom slučaju za druge vrijednosti jakosti rasvjete (npr.  $0\cdots 300 \text{ lx}$ ,  $0\cdots 120 \text{ lx}$ ,  $0\cdots 120000 \text{ lx}$ ).

Mjerjenje izvanredno malih jakosti rasvjete i registriranje neznatnih izvora svjetlosti vrši se primjenom fotomultiplikatora (npr. u astronomskoj fotometriji).

**Mjerjenje transparencije (prozirnosti).** Prozirnost, tj. sposobnost propuštanja svjetla, mjeri se na različnim prozirnim ili poluprozirnim (prozračnim) materijalima kao što su papir ili staklo. Prozirnost ili faktor transmisije  $\tau$  definiran je kao omjer svjetlosnog toka  $\Phi_2$  koji izlazi iz ispitivanog predmeta i svjetlosnog toka  $\Phi_1$  koji ulazi u njega, dakle:

$$\tau = \Phi_2 / \Phi_1. \quad (76)$$

Faktor apsorpcije dotičnog predmeta jednak je:

$$a_s = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{\Phi_1}. \quad (77)$$

Mjerila transparencije su jednostavna; sastoje se od izvora svjetla (priključenog na stabilizirani napon) i fotoelementa (ili fotoćelije) na koji pada izlazni tok svjetla  $\Phi$ . Ako se pri direktnom obasjanju fotoelementa na njega priključeni miliampmetar dovede do punog otklona  $a_0$  i ako se njegov otklon smanjuje na vrijednost  $a$  kad se ispitivano tijelo stavi između izvora svjetla i fotoelementa, stupanj je transparencije određen izrazom

$$\tau = \frac{a}{a_0}. \quad (78)$$

Zacrnjenje  $S_t$  fotografiskog filma koje je definirano jednadžbom  $S = \log(1/\tau) = -\log \tau$  može se također mjeriti ovakvim postupkom. Ako je skala miliampmetra logaritamska, može se na njoj izmjereno zacrnjenje direktno očitati.

**Određivanje koncentracije obojenih otopina i plinova.** Koncentracija otopina obojenih tvari može se neposredno odrediti mjerjenjem apsorpcije svjetla u otopini, jer je prema Lambert-Beerovom zakonu izlazni svjetlosni tok  $\Phi_2$  ovisan o debljinu sloja  $l$  i koncentraciji  $c$  razrijedene otopine u koju ulazi svjetlosni tok  $\Phi_1$ . Ova je zakonitost za monokromatsko svjetlo dana izrazom:

$$\Phi_2 = \Phi_1 e^{-\epsilon cl}. \quad (79)$$

$\epsilon$  je prirodni spektralni koeficijent ekstinkcije. Isto izraženo u dekadskom obliku:

$$\Phi_2 = \Phi_1 \cdot 10^{-\epsilon_d cl}. \quad (80)$$

$\epsilon_d$  je dekadski spektralni koeficijent ekstinkcije. Ako se ekstinkcija  $E$  definira kao produkt u eksponentu izraza (80), dakle:

$$E = \epsilon_d c l, \quad (81)$$

dobiva se izraz:

$$\Phi_2 = \Phi_1 \cdot 10^{-E}, \quad (82)$$

iz kojeg slijedi da je ekstinkcija jednaka dekadskom logaritamskom omjeru između svjetlosnog toka koji ulazi i svjetlosnog toka koji izlazi:

$$E = \log \frac{\Phi_1}{\Phi_2}. \quad (83)$$

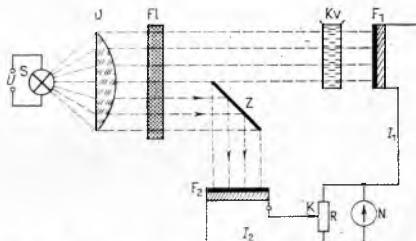
Ekstinkcija se mjeri fotometrom, a koncentracija se iz izmjerene vrijednosti  $E$  određuje računskim putem na temelju izraza (81):

$$c = \frac{E}{\epsilon_a l} = k/E. \quad (81 \text{ a})$$

Konstanta  $k$  dobiva se mjeranjem ekstinkcije  $E$  tekućine poznate koncentracije  $c$ .

Ekstinkcija se može odrediti subjektivno vizualnim fotometrima (npr. Pulfrichovim ili König-Martensovim); električnim se mjeranjem određuje pomoću fotoelektričnih fotometara.

*Fotoelektrični fotometar* prikazan je na sl. 88 u svojoj osnovnoj izvedbi. Žarulja S napaja se iz izvora konstantnog napona  $U$ , dakle neposredno iz akumulatora ili iz gradске mreže preko stabilizatora napona. Snop svjetla usmjeren optičkim sistemom O prolazi kroz filter Fl nakon čega polovica snao prolazi kroz kivet Kv napunjenu ispitivanom otopinom i pada na fotoelement F<sub>1</sub>, a druga se polovica skreće zrcalom Z i pada neposredno na fotoelement F<sub>2</sub>.



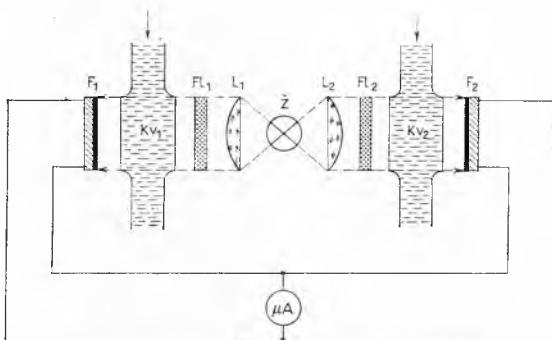
Sl. 88. Električni fotometar za mjerjenje ekstinkcije

Napon, a time i struja  $I_2$  koju daje fotoelement F<sub>2</sub> uvijek su veći od napona i struje I<sub>1</sub> koju daje kivetom zakrita fotoćelija F<sub>1</sub>. Kliznik K otpornika R pomiče se dok se struje I<sub>1</sub> i I<sub>2</sub> ne kompenziraju, te instrument N ne pokazuje nikakav otklon; položaj kliznika K na otporniku R je onda mjer za ekstinkciju E.

Umjesto da se vrijednost ekstinkcije odredi nultom metodom i očita izravno na skali kliznika pošto se kompenziraju naponi, ona se može dobiti i pri razgodenom sistemu iz otklona pokaznog instrumenta.

Veća osjetljivost mjernog uređaja postiže se upotrebom obojenih filtera koji filtriraju ulazni svjetlosni tok i propuštaju samo boje koje su komplementarne boji ispitivane otopine, tj. koje zajedno daju bijelu boju.

Primjenom fotoelektričnih fotometara koji pored mjerne kivete Kv<sub>1</sub> imaju poredbenu kivetu Kv<sub>2</sub> (sl. 89) mogu se precizno

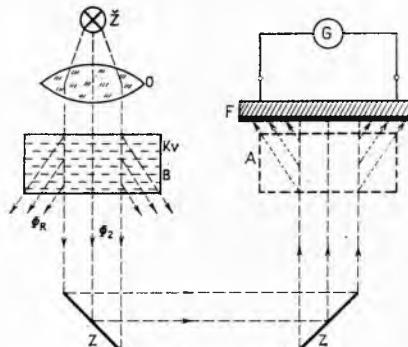


Sl. 89. Električni fotometar s poredbenom kivetom

i kontinuirano određivati neznatne količine različnih tvari u strujama otopina. Tako se mjeri tragovi šećera (1:1 000 000), tragovi

željeza, tvrdoča vode, male količine SiO<sub>2</sub>, koncentracija P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> u otopini, itd.

**Mjerjenje zamućenja.** Stupanj ili postotak zamućenja tekućina izazvanog sitnim lebdećim nečistoćama određuje se na osnovu Tyndallovog efekta, karakteriziranog time da se zraka svjetla koja prolazi kroz koloidne otopine rasipa na sve strane pod utjecajem suspendirane tvari. Na taj se način izlazni svjetlosni tok  $\Phi_2$  umanjuje za rasipni svjetlosni tok  $\Phi_R$ . Ovaj posljednji je mjeru zamućenja. Aparati za mjerjenje zamućenja zovu se *nefelometri*.



Sl. 90. Shema nefelometra

*Fotoelektrični nefelometar* u izvedbi prikazanoj na sl. 90 mjeri pomoću fotoelementa F i instrumenta G intenzitet izlaznog rasipnog svjetlosnog toka ( $\Phi_2 + \Phi_R$ ) ako se kiveta s mjerom tekućinom nalazi neposredno ispred fotoelementa F (položaj A), a intenzitet izlaznog svjetlosnog toka ( $\Phi_2$ ) ako se kiveta nalazi u položaju B. Kvocijent otklona galvanometra očitanog s kivetom u položaju B i otklona s kivetom u položaju A predstavlja mjeru zamućenja, koja se izražava u postocima.

#### Električno mjerjenje kemijskih veličina

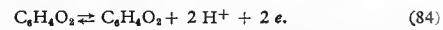
**Mjerjenje koncentracije vodikovih iona.** Pojam  $p_H$ -vrijednosti, kao mjeru kiselosti odn. bazičnosti otopina (koncentracije vodikovih iona) objašnjen je na str. 643 i tamo je također pokazano kako se  $p_H$ -vrijednost može načelno odrediti mjerjenjem elektromotorne sile polučlanka ( $H_2$ /ispitivana otopina) prema normalnoj vodikovoj elektrodi.

Pri određivanju  $p_H$ -vrijednosti mjeri se, dakle, EMS članka sastavljenog od dva polučlanka: jedan je obrazovan od mjerne elektrode uronjene u ispitivanu otopinu a drugi je poredbeni polučlanak poznatog električnog potencijala. (Poredbeni polučlanak naziva se obično poredbenom ili referentnom elektrodom.) Na sl. 17 prikazan je uređaj u kojem je i kao mjerena i kao referentna elektroda upotrijebljena vodikova elektroda. Vodikova je elektroda, međutim, za praksu nespretna, pa se stoga upotrijebljava samo za vrlo tačna laboratorijska mjerjenja, a inače se upotrijebljavaju druge elektrode, opisane u nastavku.

**Mjerne (ili indikatorske) elektrode.** Kao takve elektrode (koje se uranjuju u ispitivanu otopinu) upotrijebljavaju se kinhidronska, antimonska i staklena elektroda.

**Kinhidronska elektroda** ostvaruje se tako da se platinska žica zaroni u ispitivanu otopinu, kojoj je dodato kinona i hidrokinona u jednakim molarnim koncentracijama.

Kinon C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub> i hidrokinon C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>(OH)<sub>2</sub> u vodenoj otopini tvore redukciono-oksidacioni (redoks-) sistem:



Potencijal što ga zauzima indiferentna elektroda (npr. platinska ili zlatna) zaronjena u otopinu koja sadrži kinon, hidrokinon i vodikove elektrone, prema Nernstovoj jednadžbi iznosi

$$E = E_0 - \frac{RT}{2F} \ln \frac{a_k a_{H^+}^2}{a_{H^+} a_{H_2}} = E_0 - \frac{a_k}{a_{H^+}} - \frac{R T}{F} \ln a_H, \quad (85)$$

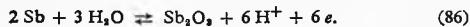
gdje je  $a$  aktivitet, a indeksi se odnose: k na kinon, h na hidrokinon, H na vodikov ion. (Za ostale oznake v. jedn. 16.)  $E_0$  je standardni potencijal, tj. potencijal prema normalnoj vodikovoj elektrodi kad je za sve tvari u članku aktivitet jednak jedinici. Za smjesu jednakog broja molova kinona i hidrokinona (tzv. kinhidron), omjer  $a_k/a_{H^+} \approx 1$ , pa je  $E$  ovisan samo o aktivitetu (i vrlo približno koncentraciji) vodikovih iona, tj. kinhidronske elektrode djeluju kao vodikova elektroda.

Kinhidronska elektroda ne zadovoljava u otopinama alkalinijim od  $p_H$  8, dijelom zbog lake oksidacije hidrokinona u alkalnom

mediju, a dijelom zbog ionizacije hidrokinona uz nastajanje vodikovih iona.

*Antimonska elektroda* ima oblik štapa a napravljena je od lijevanog antimona ili nekog drugog metala koji je elektrolitski prevučen antimonom.

Antimon se na zraku u maloj mjeri oksidira na antimon-trioksid te tako nastala elektroda  $Sb_2S_3$ , djeluje kao tzv. oksidna elektroda na kojoj se odvija reverzibilna reakcija



Ako se antimonska elektroda zaroni u otopinu koja sadrži vodikove ione, na njoj se uspostavlja potencijal koji ovisi o koncentraciji tih iona, tj. ona djeluje kao vodikova elektroda.

Potencijal antimonove elektrode nije linearno zavisao o  $p_{H^-}$ -vrijednosti, kako bi morao biti prema Nernstovoj jednadžbi uz pretpostavku navedene elektrodne reakcije, pa se ta elektroda mora baždariti otopinama poznatog  $p_{H^-}$ . Antimonska je elektroda mehanički otporna, pa je prikladna za pogonska mjerjenja. Prednost joj je i to da se zbog malog unutrašnjeg otpora može na nju neposredno priključiti milivoltmetar kao pokazni instrument, ali strujno opterećenje pri tom mora ostati u granicama  $(1\cdots 2) \cdot 10^{-6} A$ . Njezin je nedostatak što je osjetljiva prema koroziji i redukcijskim sredstvima, a može davati pogrešne rezultate i zbog reakcija sa stranim ionima. Osim toga je za vrijeme pogona treba mehanički čistiti. Antimonska elektroda je upotrebljiva u području  $p_{H^-}$ -vrijednosti od 1 do 12,5, s tačnošću  $\pm 0,2 p_{H^-}$ .

Na isti način kao antimonska elektroda upotrebljava se i bizmutska elektroda. Ni jedna ni druga nisu prikladne za mjerjenja u otopinama koje sadrže metale plemenitite od njih.

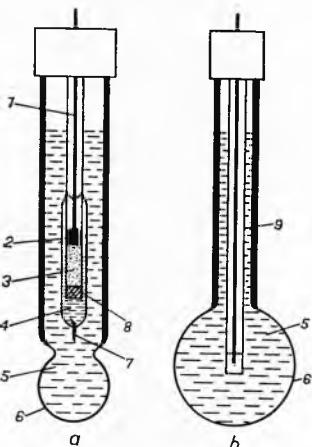
*Staklena elektroda* danas je toliko usavršena da se može smatrati najjednostavnijom i najpouzdanijom mjernom elektrodom za praktična mjerjenja  $p_{H^-}$ -vrijednosti, takoder u tehničkim procesima.

Sl. 91 prikazuje dvije izvedbe takve elektrode. Staklena posudica 1 koja na dnu završava tankom membranom najčešće kuglasta oblika, napravljenom od specijalnog stakla velike električne vodljivosti, napunjena je otopinom konstantne  $p_{H^-}$ -vrijednosti; u nju je zaronjena pogodna odvodna elektroda, npr. srebrna žica prevučena srebrokloridom (v. dalje poredbene elektrode). Kad se takva elektroda zaroni u otopinu koja sadrži vodikove ione, ona zauzima električni potencijal koji ovisi o koncentraciji tih iona u otopini, tj. ona se ponaša kao vodikova elektroda.

Prepostavlja se da se na unutrašnjoj i vanjskoj površini staklene membrane djelovanjem otopine (hidratacijom) stvaraju slojevi količnog gela, koji djeluju kao izmjenjivači iona: na objema površinama stakla izmjenjuju se ioni natrijuma iz stakla i ioni vodika iz otopine. Usljed toga nastaju na tim granicama faza skokovi potencijala, čija veličina ovisi o kemijskom potencijalu vodikovih iona u čvrstoj fazi, a time i o koncentraciji vodikovih iona ( $p_{H^-}$ -vrijednosti) u otopinama s obju strana membrane.

Budući da je  $p_{H^-}$  otopine u elektrodi konstantan (pufer-otopina), potencijal staklene elektrode uz inače iste uvjete ovisi o  $p_{H^-}$ -vrijednosti ispitivane otopine u koju je ona zaronjena. Potencijal staklene elektrode ovisi o prirodi stakla, varira od jedne elektrode do druge, a malo se i mijenja tokom duljeg vremena, pa svaku staklenu elektrodu treba baždariti. Unutarnji otpor staklene elektrode visok je, iznosi  $10^6 \cdots 10^9 \Omega$ . Prema namjeni, elektrode se izvode kao visokoomske, srednjeomske i niskoomske. Mjerno područje ovih elektroda ovisno je o njihovom otporu, a nalazi se između  $p_{H^-} 0$  i 14 (proteže se npr. od 0 do 11  $p_{H^-}$  ili od 5 do 14  $p_{H^-}$ ). Temperaturno je područje primjene od 0 do  $\sim 130^\circ C$ .

Staklene elektrode nalaze široku primjenu u praksi jer je njihov napon neovisan o štetnom utjecaju stranih iona i jer su neosjetljive prema oksidacionim i redukcionim tvarima. Pored toga nijovo je reagiranje brzo, a mjerna tačnost velika.



Sl. 91. Staklene elektrode; a sa kalomskom odvodnom elektrodom, b sa srebrokloridnom odvodnom elektrodom: 1 odvodna žica, 2 živa, 3 živa + kalomel, 4 otopina  $KCl$ , 5 tamponska otopina, 6 staklena membrana, 7 azbestna nit kao spoj medju elektrolitima, 8 staklena vuna, 9 odvodna elektroda

Zbog velikog unutrašnjeg otpora staklene se elektrode ne smiju opteretiti, tj. kroz njih ne smije teći struja. Na njih se mogu priključiti pokazni instrumenti, registracioni instrumenti ili regulatori samo preko osjetljivih mjernih pojačala velikog ulaznog otpora ili preko kompenzatora. Elektrode treba s pojačalom spojiti pomoću oklopjenog priključnog kabela, da bi se izbjegao utjecaj što ga na mjeru rezultat može imati i posve mala pogreška u izolaciji.

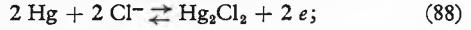
Uredaji za mjerjenje koncentracije vodikovih iona baždare se pomoću tzv. tamponskih ili puferskih otopina, tj. otopina u kojima se odredena  $p_{H^-}$ -vrijednost razmjerne malo mijenja pri razrjeđenju, pri onečišćenju kiselinom ili bažnim tvarima iz posuda ili zraka i pri dodatku malih količina jakih kiselina ili baza. To su otopine koje sadrže slabu kiselinsku ili bazu i njihova sol u upoređljivim količinama, npr. ekvivalentna količina octene kiseline i natrijum-acetata. U takvoj otopini kiselina HA je malo disociirana i sol  $NaA$  je gotovo potpuno disociirana; količina nedisociранe kiseline u otopini je dakle praktički jednaka dodatoj količini kiseline, a količina acetatinih iona ekvivalentna količina dodate soli. Prema zakonima kemijske ravnoteže vrijedi jednadžba:  $c_H \cdot c_A = K_{HA}$ , gdje je  $c_H$  koncentracija vodikovih iona,  $c_A$  koncentracija acetatinih iona,  $c_{HA}$  koncentracija nedisociранe kiseline, a vrijednost  $K_{HA}$  je konstantna na konstantnoj temperaturi. Iz te jednadžbe slijedi da je koncentracija vodikovih iona

$$c_H = K_{HA} \cdot \frac{c_{HA}}{c_A}. \quad (87)$$

Koncentracija vodikovih iona ovisna je dakle o omjeru koncentracija nedisociранe kiseline i acetatinoga (praktički jednatom omjeru količina dodate kiseline i njezine soli), a ne o koncentraciji samih tih iona (odn. dodatnih količina kiseline i soli), a mijenja se u omjeru tih koncentracija. Tako će u otopini ekvivalentnih količina octene kiseline i natrijum-acetata biti koncentracija vodikovih iona  $c_H = 1,8 \cdot 10^{-8}$  mol/l, bez obzira na to da li sadrži po 0,01, 0,1 ili 1 mol kiselinske i soli, aako se npr. otopini koja sadrži po 0,1 mol kiselinske i soli doda 0,01 mol baze ( $NaOH$ ), neutralizirat će se 0,01 mol kiselinske i nastati 0,01 mol acetata, tj. oslobodit će se 0,01 mol acetatinog iona. Koncentracija vodikovih iona će uslijedito opasti u omjeru  $0,09/0,11$ , tj. za 20%, a  $p_{H^-} = -\log c_H$  porast će od  $-\log 1,8 \cdot 10^{-8} = 4,74$  na  $-\log 1,4 \cdot 10^{-8} = 4,85$ , tj. za 2,3%. Kad bi se čistoj otopini octene kiseline te koncentracije dodala i mnogo manja količina baze, koncentracija vodikovih iona u njoj bi se stubokom promjenili uslijed relativno velikog povećanja koncentracije acetatinoga iona u odnosu na koncentraciju nedisociранe kiseline. Prisutnost natrijum-acetata uz kiselinsku u početnoj otopini ublažuje dakle djelovanje dodatka lužine (a tako i kiseline) na  $p_{H^-}$ , kao što odbojnici na željezničkim vagonima (njem. Puffer, franc. tampon) svojim oprugama ublažuju djelovanje sudara. Odatle ime takvima otopinama.

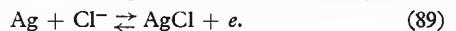
*Poredbene ili referentne elektrode* su polučlanci poznatog i konstantnog potencijala koji se s drugim polučlankom što ga tvori mjerna elektroda zaronjena u ispitivanu otopinu spajaju u potpun galvanski članak radi mjerjenja potencijala te elektrode. Kao poredbene elektrode upotrebljavaju se pri određivanju koncentracije vodikovih iona (odn.  $p_{H^-}$ -vrijednosti) najčešće kalomska ili srebrokloridna elektroda.

*Kalomska elektroda* prikazana je shematski na sl. 92. Na dnu staklene posude nalazi se živa u koju je utaknuta platinска žica radi spoja s mjernim instrumentom; na živi leži sloj paste napravljene od smjese metalne žive i živa (I)-klorida (kalomela,  $Hg_2Cl_2$ ), a ostanak prostora posude, kao i elektrolitski most kojim se uspostavlja veza s ispitivanom otopinom, napunjeni su otopinom kalijum-klorida. Elektrodna je reakcija kalomske elektrode:

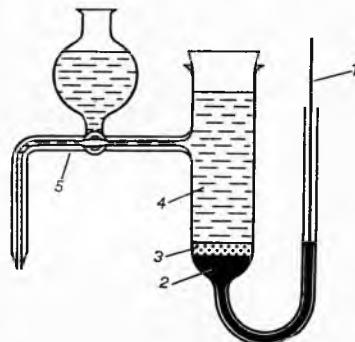


potencijal koji se uspostavlja na elektrodi ovisan je o koncentraciji klor-iona, tj. elektrolita. Pravě se standardne (normalne) kalomske elektrode sa zasićenom, normalnom (molarnom) i desetinunormalnom otopinom  $KCl$  (zasićena, „n-i“ i „n/10-“ kalomska elektroda). Potencijali su tih elektroda na  $25^\circ C$   $-337$ ,  $-283$ ,  $-284$  mV u odnosu na normalnu vodikovu elektrodu. Postoje mnoge izvedbe kalomskih elektroda, s posudama različitih oblika kojima je uglavnom svrha da onemoguće difuziju elektrolita iz ispitivane otopine do same elektrode (v. npr. sl. 91).

*Srebrokloridna elektroda* sastoji se od srebrenе žice (ili žice od drugog plemenitog metala prevučene srebrom), koja je na površini elektrolitski ili djelovanjem klora pretvorena djelomično u srebro-klorid i zaronjena u otopinu klorida. Elektrodna je reakcija:



Potencijal srebrenе elektrode u zasićenoj otopini  $KCl$  iznosi  $-203$  mV na  $26^\circ C$ .



Sl. 92. Kalomska elektroda. 1 Odvodna žica, 2 živa, 3 pasta kalomel + živa, 4 otopina  $KCl$ , 5 elektrolitski most

### Električna analiza

Kvantitativna kemijska analiza neke tvari sastoji se u određivanju njezinog sastava, tj. procentnog udjela svih njezinih sastojaka u ukupnoj njezinoj masi, ili u određivanju sadržaja jednog ili više sastojaka u toj tvari, tj. količine, koncentracije ili procentnog udjela toga sastojka (ili tih sastojaka) u ispitivanoj tvari. Kemijska se analiza može vršiti kemijskim ili fizikalnim sredstvima i postupcima. U ovom će se poglavljaju razmotriti od fizikalnih postupaka kemijske analize neki koji se služe električnim sredstvima a upotrebljavaju se većinom za određivanje sadržaja samo jednog sastojaka u ispitivanoj tvari. Električna se sredstva ili neposredno primjenjuju za određivanje sadržaja jednog sastojka (npr. određivanje vlage u čvrstoj tvari mjeranjem njezinog električnog otpora) ili se primjenjuju nakon pretvorbe mjerodavne ne-električne veličine u električnu (npr. određivanje sadržaja CO u plinu mjeranjem topline razvite pri njegovom sagorijevanju) ili se dodaju neelektričnom postupku kao dodatna pomoćna sredstva koja mu olakšavaju primjenu ili povećavaju tačnost (primjer: upotreba fotočelije za mjerjenje intenziteta spektralnih linija u emisionej spektrometriji).

Tako definirana električna analiza široko se primjenjuje na materijale u sva tri agregatna stanja. U nastavku bit će kao tipični primjeri te primjene razmotrene električne metode određivanja vlage u zraku, tekućinama i čvrstom materijalu, određivanje sadržaja  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$  i nekih drugih sastojaka u plinovima i određivanje sadržaja kisika u vodi.

**Određivanje vlage zraka (higrometrija) električnim mjerjenjem.** Vlagom zraka naziva se sadržaj vodene pare u vlažnom zraku. Vlaga se zraka izražava kao absolutna vlaga, kao relativna vlaga ili rosištem vlažnog zraka.

Absolutna vlaga  $\varrho_p$  predstavlja masu vodene pare sadržane u jedinicu volumena ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) ili u jedinicu mase ( $\text{kg}/\text{kg}$ ), odn. masi  $m$  vlažnog zraka:

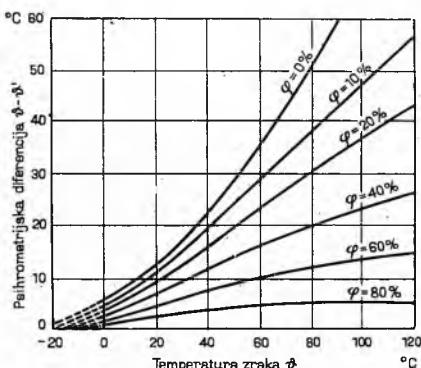
$$\varrho_p = \frac{m_p}{V}, \text{ odn. } \varrho_p = \frac{m_p}{m}, \quad (90)$$

gdje je  $m_p$  masa vodene pare u volumenu  $V$ , odn. masi  $m$  vlažnog zraka.

Relativna vlaga  $\varphi$  je omjer mase vodene pare sadržane u nekom volumenu vlažnog zraka i mase vodene pare koja bi bila sadržana u istom volumenu kad bi zrak bio zasićen vodenom parom. Taj je omjer jednak omjeru absolutne vlage ispitivanog zraka i absolutne vlage zraka zasićenog vodenom parom na danoj temperaturi i jednak je — prema Daltonovom zakonu — omjeru parcijalnog tlaka vodene pare u vlažnom zraku i ravnotežnog napona vodene pare na danoj temperaturi:

$$\varphi = \frac{m_p}{m_{pz}} = \frac{\varrho_p}{\varrho_{pz}} = \frac{p_p}{p_{pz}}. \quad (91)$$

Kako količina vodene pare  $\varrho_{pz}$  koju jedinica vodom zasićenog zraka sadrži i ravnotežni napon vodene pare opadaju s temperaturom, relativna vlaga s opadanjem temperature raste. Temperatura na kojoj bi pri ohlađivanju ispitivanog zraka njegova relativna vlaga postala jednaka 100%, tj. na kojoj je ravnotežni napon vodene pare jednak parcijalnom tlaku vodene pare u ispitivanom zraku, odn. na kojoj bi ispitivani zrak bio zasićen onom količinom vodene pare koju sadrži (te bi se pri daljem ohlađivanju iz njega taložila voda u obliku rose) zove se rosište tog zraka. Sto je absolutna vlaga zraka, odn. parcijalni tlak vodene pare u njemu manji to mu je rosište niže; rosište može dakle također služiti kao mjeri vlažnosti zraka.

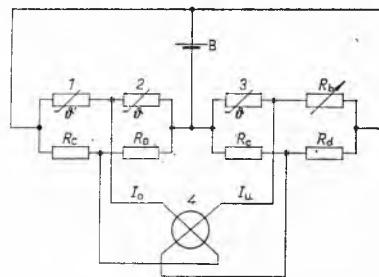


Sl. 93. Ovisnost psihrometrijske diferencije o temperaturi i relativnoj vlažnosti zraka

Mjerjenje vlage u zraku može se izvoditi psihrometrijskim postupkom i postupkom mjerjenja ravnotežne temperature izjednačenja higroskopnih tvari.

**Psihrometrijski postupak** osniva se na činjenici da se voda preko čije površine struji zrak nezasićen vodenom parom ohlađuje uslijed toga što se voda isparava svojom vlastitom toplinom,

i da se ohlađuje to više što je manje vlažan zrak koji preko njezine površine struji. Uredaj za mjerjenje vlage po tom principu, psihrometar, sastoji se od jednog običnog termometra (osuhog), koji mjeri temperaturu zraka  $\theta$ , i jednog termometra ovijenog vlažnom tkaninom (mokrog) koji pokazuje temperaturu  $\theta'$  vode preko koje struji ispitivani zrak. Razlika  $\theta - \theta'$  između temperature suhog i mokrog termometra (psihrometrijska diferencija) to je manja što je ispitivani zrak vlažniji; ona je jednaka nuli kad je zrak zasićen vodenom parom jer se onda sa vlažnog termometra voda ne isparuje. Psihrometrijska diferencija može poslužiti za određivanje apsolutne i relativne vlage zraka uz pretpostavku da brzina strujanja zraka uz termometar iznosi najmanje 1,5 m/s. Psihrometrijski se postupak primjenjuje već odavnina uz upotrebu živinih termometara; ako se ovi nadomjesti električnim otporskim termometrima ili termoelementima, vlažnost se zraka može mjeriti električki. Ovisnost relativne vlage  $\varphi$  o temperaturi zraka i psihrometrijskoj diferenciji  $\theta - \theta'$  prikazana je na dijagramu sl. 93. Pomoću tog dijagrama može se iz vrijednosti očitanih na termometrima odrediti relativna vlaga  $\varphi$ . Neposredno i kontinuirano električno mjerjenje relativne vlage može se provoditi pomoću sklopa (sl. 94) koji sadrži tri otporska termometra i izvor struje B.



Sl. 94. Sklop za psihrometrijsko mjerjenje relativne vlage pomoću otporskih termometara

Mokri termometar 1 i suhi termometar 2 nalaze se u prvom mosnom spoju, na čijoj dijagonali nastaje napon, pa teče struja  $I_0$ , proporcionalna psihrometrijskoj razlici  $\theta - \theta'$ . Treći suhi termometar 3 nalazi se u drugom mosnom spoju. Ako se uzme da se krivulje na dijagramu sl. 93 mogu približno prikazati izrazom:

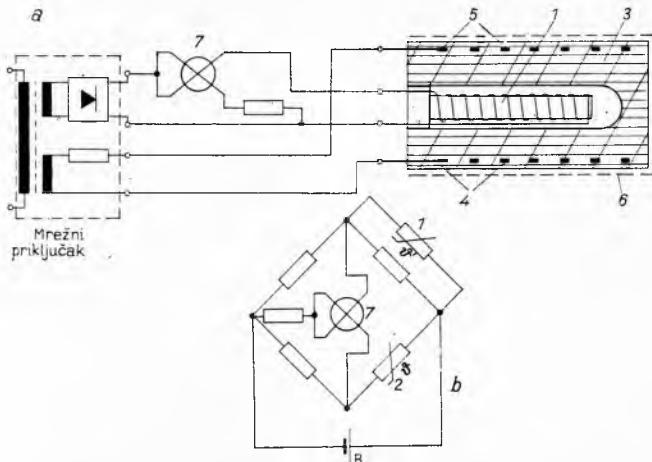
$$1 - \varphi = \frac{c(\theta - \theta')}{a + \theta - b\theta^2}, \quad (92)$$

gdje su  $a$ ,  $b$  i  $c$  konstante, drugi mosni spoj mora biti dimenzioniran tako da na njegovoj dijagonali teče struja  $I_u$  proporcionalna izrazu  $(a + \theta - b\theta^2)$ , dakle nazivniku u jedn. (92). Struje  $I_0$  i  $I_u$  dovode se na otklonski i na usmjereni svitak instrumenta s unakrsnim svicima 4, pa će otklon  $a$ , tj. pokazivanje tog instrumenta, biti proporcionalno izrazu  $1 - \varphi$ , dakle i relativnoj vlažnosti  $\varphi$ . Ovakvim se sklopm može mjeriti relativna vlaga u području od 10 do 100% s pogreškom od  $\sim 3\%$ . Psihrometrijski postupak izgubio je na važnosti kad je uveden vlagomjer s litijum-kloridom, koji radi na principu ravnotežne temperature na kojoj postoji ravnoteža između vlažnog zraka i zasićene otopine higroskopne tvari, tzv. temperature izjednačenja.

**Postupak s mjeranjem temperature izjednačenja.** Parcijalni tlak vodene pare iznad vodene otopine topljive tvari uvihek je manji od ravnotežnog napona para čiste vode na istoj temperaturi. Razlika je to veća što je veća koncentracija otopine. Tlak vodene pare nad koncentriranim otopinama vrlo topljivih tvari manji je i od parcijalnog tlaka vodene pare u zraku obične vlažnosti. (Takve tvari su stoga do te mjeri higroskopne da se raskvasuju ako se u čvrstom stanju ostave na zraku, tj. navlače iz njega vodu dok ne nastane otopina nad kojom je tlak vodene pare jednak tlaku vodene pare u zraku.) Ako se koncentrirana otopina takve higroskopne tvari grijie dok se njezin ravnotežni napon para izjednači s parcijalnim tlakom vodene pare u okolnom zraku, temperatura otopine pri kojoj je nastupilo izjednačenje tlakova, tzv. temperatura izjednačenja  $\theta_1$ , može služiti kao mjeri za vlagu zraka. Za mjerne svrhe pokazala se je kao najprikladnija zasićena otopina litijum-klorida ( $\text{LiCl}$ ).

## ELEKTRIČNA MJERENJA

Za mjerjenje temperature izjednačenja radi određivanja vlage zraka služi uređaj (sl. 95 a) koji se sastoji od žičnog otporskog termometra 1 utaljenog u staklenu cijev oko koje se nalazi navlaka od staklene vune 3, natopljene zasićenom otopinom LiCl. Preko ovakve navlake omotane su protusmjerno dvije odvojene elektrode od srebrne žice 4 i 5. Ovakva mjerna sonda perforiranim je kućištem 6 zaštićena od prejakog strujanja zraka, od mehaničkog oštećenja i od prašine. Električnom strujom koja teče između elektroda 4 i 5, prolazeći kroz otopinu u navlaci 3, ta se otopina zagrijava.



Sl. 95. Mjerilo vlage s litijum-kloridom. a Sklop za mjerjenje apsolutne vlage, b sklop za mjerjenje relativne vlage

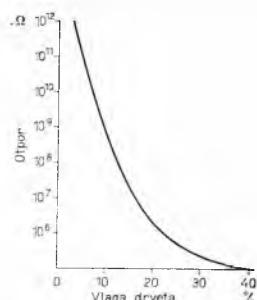
(Da bi se spriječilo elektrolitsko djelovanje struje, za grijanje se primjenjuje izmjenična struja.) Iz zagrijane otopine isparuje se voda; time se smanjuje električna vodljivost preostale otopine, pa postaje manja i struja grijanja. Uslijed toga se otopina u navlaci hlađi, te iz zraka upija vodenu paru. Time joj vodljivost opet naraste, s njome naraste i struja grijanja, te nastaje opet isparivanje vode. Taj se proces periodički ponavlja sa sve manjom amplitudom promjene temperature, dok se temperatura ne ustali na vrijednosti pri kojoj se isto toliko vode isparuje koliko se iz zraka upija. Tu ravnotežnu temperaturu  $\theta_i$  mjeri otporski termometar 1. Budući da između ravnotežne temperature  $\theta_i$  i rosišta postoji jednoznačna ovisnost, pokazni instrument 7 na koji je priključen otporski termometar može biti baždaren u vrijednostima apsolutne vlage  $\varrho_p$ . Uredaj s litijum-kloridom služi ovdje kao mjerni pretvarač; njime se najprije dobiva temperatura koja je jednoznačna funkcija rosišta, a zatim se ova temperatura pretvara u promjenu otpora otporskog termometra. Da bi se spriječio štetni utjecaj kolebanja mrežnog napona, primjenjuje se instrument s unakrsnim svicima (kvocijentni instrument).

Sl. 95 b prikazuje kako se primjenom pretvarača s LiCl (1), koji posredno mjeri rosište zraka, i otporskog termometra 2 koji mjeri temperaturu zraka, može pomoći mosnog spoja odrediti relativna vlaga  $\varphi$ .

Prednost opisanog postupka naprava psihrometrijskom postupku jest veća tačnost i brzina reagiranja, ali je područje vlažnosti zraka unutar kojeg se on može primijeniti uže.

**Električno mjerjenje vlage tekućih i čvrstih tvari** izvodi se najčešće određivanjem električnog otpora ili relativne dielektričnosti.

**Određivanje vlage mjerjenjem električnog otpora.** Specifični otpor mnogih higroskopnih tvari u znatnoj mjeri ovisi o njihovoj vlazi. Tako se npr. u drvu nalaze različne soli koje se ovise o sadržaju vode u njemu više ili manje cijepaju u ionu i time više ili manje sudjeluju u vodenju struje. Ovisnost između vlage i električnog otpora drva mjereno na uzorku određenih dimenzija među dvjema metalnim elektrodama prikazana je na sl. 96. Uz pomoć takvog grafikona



Sl. 96. Ovisnost električnog otpora drva o njegovoj vlažnosti

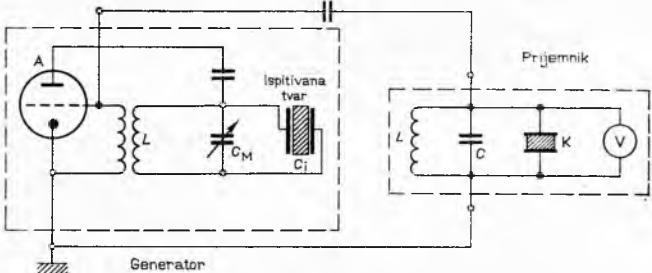
može se određivanje vlage svesti na mjerjenje njegovoga otpora. Mjerjenje se u osnovi vrši tako da se pri nekom konstantnom naponu  $U$  očitava na ampermetru jakost struje, koja je prema Ohmovu zakonu u tom slučaju mjerila za otpor:  $R = U/I$ . Na isti način mjeri se specijalnim spravama vlaga tekstila, celuloze, kože i građevnog materijala, također praškastih i zrnatih tvari kao što su žito, brašno, škrub i kava.

**Električno mjerjenje vlažnosti određivanjem relativne dielektričnosti** osniva se na činjenici da je relativna dielektričnost mnogih nevodljivih tekućina i čvrstih tvari mala ( $\epsilon_r = 2 \dots 10$ ) u poređenju s relativnom dielektričnošću vode ( $\epsilon_r \approx 80$ ), te stoga i male količine vode u takvima tvarima u znatnoj mjeri mijenjaju njihovu dielektričnost.

Mjerjenje relativne dielektričnosti vrši se kondenzatorskim pretvaračem u kojem ispitivana tvar predstavlja dielektrik. Kapacitet ispitne ćelije, tj. kondenzatorskog pretvarača, može se između ostalog odrediti postupkom rezonancije.

Mjerilo dielektričnosti s kondenzatorskim pretvaračem (kojim se može odrediti i sadržaj vode) sastoji se (sl. 97) od visokofrekventnog generatora i prijemnog uređaja. Generator spojen u tzv. Meisnerovom spoju s elektronkom proizvodi oscilacije čija frekvencija ovisi o induktivitetu  $L$  svitka, kapacitetu  $C$  bažđarenog okretljivog kondenzatora i kapacitetu  $C_1$  na njega paralelno spojene ispitne ćelije; ova se sastoji od dvije paralelne kondenzatorske ploče među koje se stavlja ispitivana tvar. Kapacitet  $C_1$  ćelije ovisi o relativnoj dielektričnosti ispitivane tvari. Proizvedeni elektromagnetski titraji dovode se do prijemnika koji je ugoden na stalnu prijemnu frekvenciju  $f_0$  (npr. 1,8 MHz). Kvarc, priključen paralelno prijemnom titrajnom  $LC$ -krugu, zasvjetli kad nastupi rezonancija, tj. kad je prijemna frekvencija  $f_g$  jednaka frekvenciji generatora  $f_g$ . Kvarc nadalje zbog svojeg malog prigušenja prouzrokuje naglo opadanje napona cijevnog voltmetra  $V$ , što također pokazuje da je  $f_g = f_0$ .

Mjerjenje se obavlja tako da se najprije generator pomoću okretljivog kondenzatora podeši na rezonantnu frekvenciju prijemnika, a zatim napuni ispitna ćelija ispitivom tvaru. Time se, zbog promijenjenog kapaciteta  $C_1$  (ovisnog o relativnoj dielektričnosti ispitivane tvari) promijeni frekvencija  $f_g$  generatora.



Sl. 97. Mjerilo vlage s kondenzatorskim pretvaračem i mjerjenjem kapaciteta postupkom rezonancije

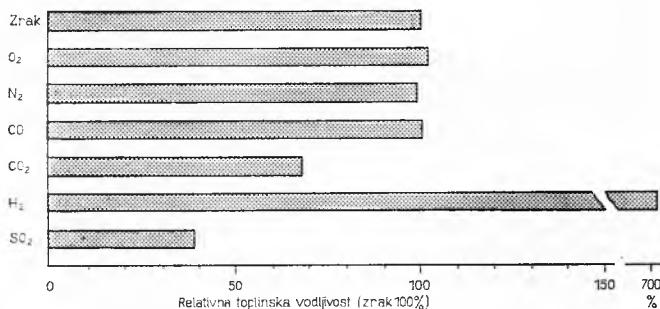
Zaokretanjem mjernog kondenzatora  $C_n$  ponovo se razgodenja frekvencija generatora  $f_g$  učini jednakom frekvenciji  $f_0$  (što pokazuje nagli pad napona na voltmetu). Iz očitane vrijednosti kapaciteta  $C_m$ , u skladu s izrazom za kapacitet kondenzatora (jedn. 34) ili iz bažđarene krivulje može se odrediti postotak vode u ispitivanoj tvari. Opisani se postupak može primijeniti za određivanje vlage u tekućinama (npr. u ulju, masti, alkoholu) i čvrstim tvarima (npr. u sjemenju, brašnu, papiru, duhanu), a granice pogreške mjerjenja su reda veličine  $\pm 0,1\%$ .

**Analiza plinova.** Većina suvremenih analizatora plina koji se primjenjuju za kontinuiranu automatsku analizu, odnosno za mjerjenje (pokazivanje), registraciju i automatsku regulaciju, predstavljaju uređaje koji se neposredno ili posredno osnivaju na električnim principima.

Mjerjenje udjela  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$  i  $\text{SO}_2$  u smjesama sa zrakom ili nekim drugim plinom osniva se na činjenici da je toplinska vodljivost pomenutih triju plinova vrlo različna od toplinske vodljivosti zraka ili nekog drugog plina s kojim oni sačinjavaju smjesu. Neki sagorljivi plinovi, kao  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , mogu se mjeriti na temelju toplinskog efekta reakcije njihova izgaranja. Kisik je neobično paramagnetičan, pa to može služiti kao osnova za nje-

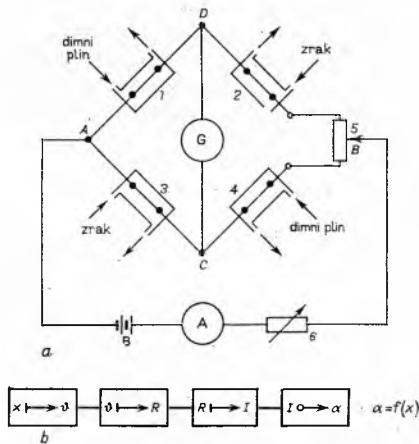
govo određivanje u smjesama. Plinovi kojima su molekule sastavljene od različitih atoma apsorbiraju infracrveno zračenje u vrpcama valnih dužina koje su za njih karakteristične, te se mjeranjem te apsorpcije može odrediti sadržaj navedenih plinova u plinskoj smjesi. Spomenuti nenelektrični efekti mogu se pretvorbiti u električne veličine mjeriti električnim sredstvima. U nastavku su za to navedeni tipični primjeri.

*Električno mjerjenje sadržaja ugljik-dioksida u dimnim plinovima.* Iz sl. 98 vidi se da se relativne toplinske vodljivosti ugljik-dioksida ( $\text{CO}_2$ ), vodika ( $\text{H}_2$ ) i sumpor-dioksida ( $\text{SO}_2$ ) znatno razlikuju od vodljivosti zraka i njegovih osnovnih komponenata ( $\text{N}_2$  i  $\text{O}_2$ ), pa se ta činjenica može iskoristiti za električno mjerjenje udjela ovih plinova u ukupnom volumenu plinske smjesi, a napose procenta ugljik-dioksida u dimnim plinovima. Za to se



Sl. 98. Relativna toplinska vodljivost nekih plinova u odnosu na zrak

upotrebljava mosni spoj (sl. 99 a) u kojem su dva otpornika od platinске žice (tj. metala otpornog prema oksidaciji) smještena u komorama 1 i 4 kroz koje struje dimni plinovi, a druga su dva isto takva otpornika smještena u komorama 2 i 3 kroz koje strui zrak jednake temperature i vlage kao ispitivani dimni plin. Otpornici se u sve četiri grane mosta griju na  $\sim 100^\circ\text{C}$  strujom iz izvora B i u ravnoteži su (nulinodiktor G je bez otklona) kad su sve četiri komore ispunjene istim plinom (zrakom). Kad kroz komore 1 i 4 struje dimni plinovi, zbog manje vodljivosti ugljik-dioksida toplina sa žice otpornika u tim komorama sporije se odvodi nego u drugim dvjema komorama, pa se temperatura tih žica povisuje.



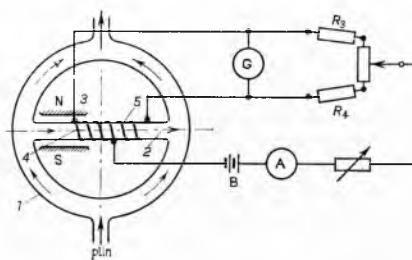
Sl. 99. Mjerni most za određivanje sadržaja ugljik-dioksida u dimnim plinovima. a) Shema uređaja, b) shema djelovanja

Uslijed toga se povećava i električni otpor otpornika u komorama 1 i 4, i to toliko više koliko je veći postotak ugljik-dioksida u ispitivanom plinu. Promjenom električnog otpora u granama mosta gdje su komore 1 i 4 poremećuje se ravnoteža mosta, u dijagonali CD pojavljuje se struja i instrument G pokazuje otklon koji je mjera za postotak  $\text{CO}_2$  u dimnom plinu. Mjerno područje tog instrumenta seže od 0 do 20%  $\text{CO}_2$ . Struja grijanja namješta se otpornikom 6 i kontrolira ampermetrom A. Otpornik 5 služi za uspostavljanje početne ravnoteže mosta. Shema toka djelovanja prikazana je na sl. 99 b.

*Mjerjenje sadržaja ugljik-monoksida i vodika u dimnom plinu.* Uglik-monoksid i vodik pri katalitičkom izgaranju u zraku razvijaju toplinu kojom se platinska žica otpornika u mosnom spoju zagrije za nekoliko stotina stupnjeva Celzija i time povećava njezin otpor. Kao katalizator služi fino razdijeljena platina koja je kao tanak sloj nanijeta izvana na keramičku cjevčicu kojom je oklopljena žica radi zaštite od korozije. Shema mjernog mosta analognog je shemi na sl. 99 a, ali budući da je razlika među temperaturama mjerene i poredbene žice otpornika velika, nisu potrebne četiri komore; postoji po pravilu svega jedna komora kroz koju strui plin i u kojoj se nalaze mjerne žice 1 i poredbena žica 2 — prva s katalizatorom, druga bez njega — a na mjestima komora 3 i 4 nalaze se obični električni otpornici. Mjerno područje instrumenta za određivanje postotka  $\text{CO} + \text{H}_2$  u dimnom plinu seže od 0 do 4%.

Nastom principu kao taj instrument i uz primjenu jednakog električnog sklopa konstruiran je električni eksplozimetar, koji služi za određivanje sadržaja zapaljivih plinova u jamskom zraku, napose metana (v. *Eksplozije u rudnicima*, str. 527).

*Električno mjerjenje kisika u plinskim smjesama* može se provesti na osnovu velike paramagnetičnosti kisika. Princip tog mjerjenja objašnjen je naprijed (v. sl. 39). Sl. 100 prikazuje instrument konstruiran na osnovi tog principa. Ispitivani plin vodi se kroz prstenastu komoru 1 s poprečnom cijevi 2 na kojoj se nalazi ogrjevni namot (4) nalazi se u polju jakog trajnog magnetsa 3, a drugi kraj te cijevi i namota (5) nalazi se izvan tog polja. Ako se u ispitivanom plinu nalazi kisik, on će zbog svoje paramagnetičnosti biti uvučen u poprečnu cijev. Ogrjevni namoti 4 i 5 sačinjavaju s otpornicima



Sl. 100. Mjerni most za određivanje sadržaja kisika u plinskoj smjesi

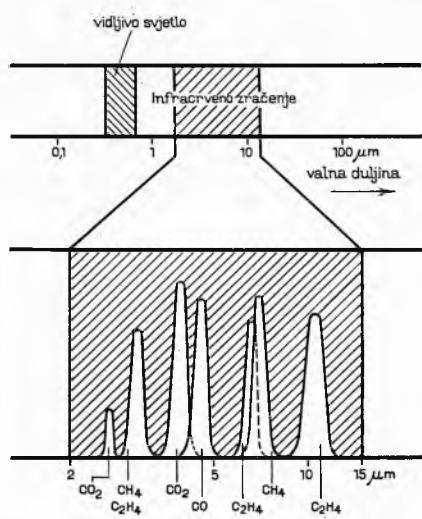
otpora  $R_3$  i  $R_4$  Wheatstoneov most, u čijoj se jednoj dijagonali nalazi galvanometar G, a na drugoj izvor struje B, ampermetar A i promjenljivi otpornik za regulaciju struje. Kisik uvučen u poprečnu cijev prima toplinu od ogrjevnog namota i zagrijava se. Kad mu tako temperatura poraste iznad Curieove tačke, on gubi magnetičnost, pa ga stoga potiskuje udesno hladni kisik što ga uvlači magnet. Na taj način dolazi u poprečnom kraku do trajnog strujanja plina (magnetskog vjetra), čija je brzina proporcionalna sadržaju kisika u plinskoj smjesi. Zbog strujanja plina više se ohlađuje prva polovica namota (4), od druge polovice (5), pa se most razgada. Otklon kazaljke instrumenta G koji se nalazi u dijagonali mosta napajanog iz izvora struje B proporcionalan je brzini strujanja plina, odnosno sadržaju kisika u ispitivanom plinu. Svi ostali dijelovi u mosnom spoju imaju jednaku ulogu kao i oni na slici 99 a.

*Infracrvena apsorpcijska spektrometrija.* Od čitavog infracrvenog dijela spektra elektromagnetskog zračenja (0,75–350  $\mu\text{m}$ ), za analizu plinova mjerjenjem apsorpcije infracrvenih zraka iskorištava se samo područje od 2 do 15  $\mu\text{m}$ . U tom se području nalaze, među ostalim, apsorpcijske vrpe plinova  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$  (sl. 101).

Infracrvena apsorpcijska spektrometrija dijeli se na disperzijsku i nedisperzijsku. U disperzijskoj spektrometriji dobiva se spektar apsorpcije spektralno rastavljenog zračenja, u nedisperzijskoj spektrometriji upotrebljava se nerastavljeno infracrveno zračenje. Postupci disperzijske spektrometrije vrlo su tačni ali omogućavaju samo diskontinuirano (laboratorijsko) mjerjenje; za tehničku praksu je stoga važnija nedisperzijska spektrometrija, kojom se mogu vršiti i kontinuirana pogonska mjerjenja.

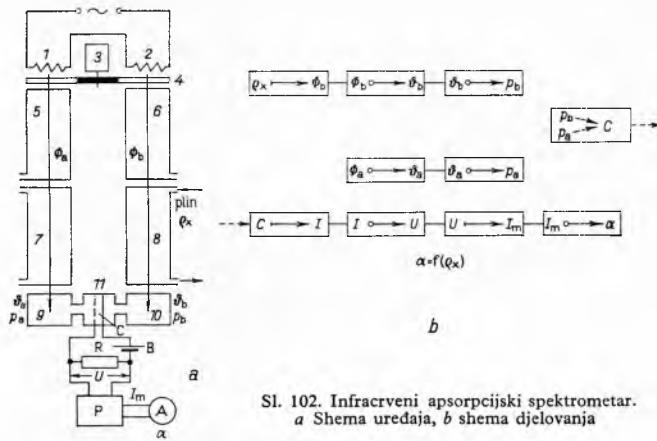
## ELEKTRIČNA MJERENJA

U nedisperzijskoj spektrometriji upotrebljavaju se dva postupka, zvana pozitivno i negativno filtriranje. U praksi se najčešće primjenjuje postupak pozitivnog filtriranja, koji je shematski



Sl. 101. Infracrveni apsorpcijski spektri nekih plinova

prikazan na sl. 102 a. Dva usporedna snopa infracrvenih zraka,  $\Phi_a$  i  $\Phi_b$ , koji izlaze iz dva istovrsna izvora  $I$  i  $2$  (užarenih elektroda), prolaze kroz filterske čelije  $5$  i  $6$ , a zatim snop zraka  $\Phi_a$  prolazi kroz poredbenu komoru  $7$ , a snop zraka  $\Phi_b$  kroz komoru za analizu  $8$ . Nakon toga oba snopa infracrvenih zraka dolaze na pripadne mjerne čelije  $9$  i  $10$  koje su jedna od druge odijeljene jednom šupljikavom i jednom nepropusnom elastičnom metalnom membranom. Te dvije membrane tvore pločasti membranski kondenzator  $II$ . Ispitivani plin strui kroz čeliju  $8$ , a u čeliji  $7$  nalazi se neki neaktivni plin (npr.  $N_2$ ) ili je ona evakuirana. Mjerne čelije  $9$  i  $10$  napunjene su onim plinom čiji se postotak u analiziranoj smjesi želi odrediti. Kad se u ispitivanom plinu ne bi nalazila komponenta koja se želi mjeriti, u komorama  $9$  i  $10$  dolazilo bi do jednakog apsorpcije infracrvenih zraka, pa bi u obje ove čelije jednakog volumena nastalo jednako povišenje temperature  $\vartheta$ , a time i tlaka  $p$ , i metalna membrana kondenzatora  $II$  ostala bi na miru. Ako



Sl. 102. Infracrveni apsorpcijski spektrometar.  
a) Shema uređaja, b) shema djelovanja

kroz mjeru komoru  $8$  prolazi plin koji sadrži traženu komponentu plina, u ovoj komori će doći do apsorpcije infracrvenih zraka u mjeri koja odgovara koncentraciji  $\varrho_x$  te komponente. Na taj će način apsorpcija u mjerenoj komori  $10$  biti manja od apsorpcije u komori  $9$  pa će u njima vladati različite temperature  $\vartheta_a$  i  $\vartheta_b$  i prema tome različiti tlakovi  $p_a$  i  $p_b$ , a razlika tlaka bit će ovisna o koncentraciji tražene komponente u ispitivanom plinu. Budući da se za vrijeme mjeranja oba snopa zraka prekidaju zaslonom  $4$  što ga okreće sinhroni motor  $3$ , membranski kondenzator periodski titra s amplitudom koja je ovisna o postotku mjerne kom-

ponente u ispitivanom plinu. Na isti se način i u jednakoj ovisnosti mijenja kapacitet kondenzatora, pa stoga na visokoomskom otporniku  $R$ , koji se nalazi u seriji s kondenzatorom  $C$  i istosmjernim izvorom struje  $B$ , nastaje izmjenični napon  $U$ , proporcionalan koncentraciji tražene komponente plina  $\varrho_x$ . Ovaj se napon preko pojačala  $P$  dovodi na ampermetar  $A$ , pa kroz njega teče struja  $I_m$ , zbog koje dolazi do otklona  $a$  kazaljke, ovisnog o koncentraciji  $\varrho_x$  tražene komponente plina. Kako se vidi i na sl. 101, apsorpcijske se vrpce nekih plinova među sobom više ili manje prekrivaju, npr. apsorpcijske vrpce metana ( $CH_4$ ) i etilena ( $C_2H_4$ ). Da bi se i pored toga sadržaj jednog od tih plinova mogao odrediti u prisutnosti drugoga, filterske su komore  $5$  i  $6$  napunjene plinom koji smeta određivanju (npr. etilenom pri određivanju metana); time se apsorpcijske vrpce tog plina uklone podjednako iz oba snopa infracrvenog svjetla. Shema toka djelovanja ove metode analize plina prikazana je na sl. 102 b. Najmanja mjerena područja te metode jesu:  $0\cdots 0,01\% CO$ ,  $0\cdots 0,05\% CO_2$ ,  $0\cdots 0,02\% CH_4$ ,  $0\cdots 0,025\% H_2O$ . (Navedeni procenti su volumenski ili molarni.)

**Određivanje sadržaja kisika u vodi** osniva se na katodnoj depolarizaciji galvanskog članka kisikom otopljenim u elektrolitu, koji je u ovom slučaju ispitivana voda. Kao mjeri pretvarač služi čelija s anodom od plemenitog metala ( $Ag$ ,  $Pt$ ,  $Au$ ) i katodom od neplemenitog metala ( $Pb$ ,  $Zn$ ,  $Fe$ ), kroz koju strui ispitivana voda. Na elektrode priključen je neposredno instrument sa zaokretnim svitkom za mjerjenje jakosti struje; preko njega je ovaj strujni krug u stvari kratko spojen. Zbog toga se katoda elektrokemijski polarizira, tj. na njoj se stvara atomarni vodik. Ako u vodi nema kisika, nastala polarizacija sprečava daljnji tok struje. Ako se u vodi nalazi kisik, ovaj s vodikom katode tvori vodu, dakle nastaje depolarizacija, pa kroz instrument teče struja proporcionalna sadržaju kisika u vodi. Opisana mjerena čelija ide u grupu aktivnih pretvarača jer za mjerjenje nije potreban poseban izvor struje. Elektrodni potencijal je ovisan o temperaturi, pa se stoga temperatura ispitivane vode mora održavati konstantnom.

V. Muljević

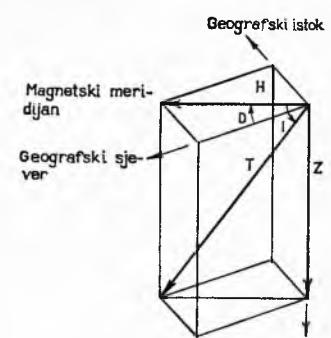
#### Električna mjerena u geofizičkim ispitivanjima

Radi proučavanja podzemne geološke građe i pronalaženja rudnog blaga izvode se mjerena različnih fizikalnih veličina na Zemlji i u njezinoj kori te na uzorcima stijena i minerala. Ova ispitivanja obuhvaćaju pretežno nenelektrične veličine za čije mjerjenje nisu uvijek potrebne električne mjerne aparature. Pri nekim od tih mjerjenja igraju ipak značajnu ulogu detektori i pretvarači koji se zasnivaju na nekom elektroničkom ili električnom principu, električni i elektronički mjeri instrumenti i uređaji kao i neke električne mjerne metode. U nastavku će se obraditi primjena električnih mjerena u geomagnetskim, seizmičkim, gravimetrijskim, geotermijskim i geoelektričnim ispitivanjima.

**Geomagnetska mjerena** izvode se kao apsolutna i kao relativna mjerena. Apsolutna mjerena služe za utvrđivanje jakosti magnetskog polja Zemlje i njegovih komponenata, a izvode se mahom za bazična istraživanja u geofizici. Relativnim mjerjenima, kojima se najviše služi primjenjena geofizika, utvrđuju se razlike magnetskih veličina na različitim tačkama Zemljine površine i odstupanja od normalnih vrijednosti.

**Zemaljski magnetizam.** Zemlja predstavlja približno homogeno magnetiziranu kuglu čiji smjer magnetiziranja odstupa od osi rotacije Zemlje za  $\sim 12^\circ$ . Magnetski južni pol Zemlje nalazi se u blizini njezinog geografskog sjevernog pola. Uobičajeno je da se vektor jakosti Zemljinskog magnetskog polja, tzv. *totalni intenzitet*  $T$ , na bilo kojoj tački Zemljine površine rastavlja u dvije komponente: *horizontalni intenzitet*  $H$  i *vertikalni intenzitet*  $Z$  (sl. 103). Kut između zemaljskog i magnetskog meridijana (smjera horizontalnog intenziteta) zove se *deklinacija*  $D$ ; ona ima pozitivni predznak za odstupanje prema istoku. Kut između horizontalnog intenziteta (magnetskog meridijana) i totalnog intenziteta zove se *inklinacija*  $I$ . Među ovim veličinama postoje ovi odnosi:

$$T = \sqrt{H^2 + Z^2}, \quad H = \cos I, \quad Z = T \sin I.$$



Sl. 103. Rastavljanje totalnog intenziteta zemaljskog magnetizma na komponente.  $T$  Totalni intenzitet,  $H$  horizontalni intenzitet,  $Z$  vertikalni intenzitet,  $I$  magnetska inklinacija,  $D$  magnetska deklinacija

**Magnetizacija minerala i stijena** potječe od polarizacije atomskih magnetskih dipola pod utjecajem zemaljskog magnetskog polja. Osim toga postoji ponekad i remanentna polarizacija koja je nastala još u toku procesa formiranja neke materije.

Kao mjerilo za magnetizaciju (magnetsku polarizaciju) nekog materijala pod utjecajem nekog homogenog magnetskog polja služi tzv. (*relativna magnetska susceptibilnost*)  $\chi$  koja predstavlja omjer između magnetske polarizacije  $I$  i jakosti magnetizirajućeg polja  $H$ :

$$\chi = I/H = \mu_r - 1,$$

gdje  $\mu_r$  znači relativni permeabilitet.

Nalaze li se ispod površine Zemlje neki minerali i stijene koji imaju drugačiju magnetsku susceptibilnost nego ostali materijali zemaljske kore, dolazi oko njihovih nalazišta do deformacije Zemljinog magnetskog polja, pri čemu su odstupanja obično vrlo mala. Odstupanja mogu se utvrditi apsolutnim i relativnim magnetskim mjerjenjima; dobiveni rezultati mogu (u kombinaciji s gravimetrijskim i geoelektričkim mjerjenjima) poslužiti za donošenje nekih zaključaka o mineraloškom sastavu Zemljine kore.

Pojedine veličine Zemljinog magnetizma mogu se mjeriti nenelektričnim i električnim aparatom i metodama. Najznačajnije električne aparature za mjerjenje Zemljinog magnetizma i njegovih promjena bit će u nastavku ukratko opisane.

**Zemljin induktor** je instrument koji služi za apsolutno mjerjenje magnetske inklinacije  $I$ , ali se njime mogu mjeriti i ostale magnetske veličine ( $D$ ,  $H$  i  $Z$ ). On se sastoji od kardanski obješenog svitka koji rotira u zemaljskom magnetskom polju. Pri tome se u svitku induciraju mali izmjenični naponi; njihova veličina ovisi o položaju osi rotacije svitka u odnosu na smjer magnetskog polja Zemlje. Ako je os rotacije paralelna smjeru magnetskih silnica, u svitku se ne inducira nikakav napon. To je smjer totalnog intenziteta. On se može utvrditi pomoći osjetljivog galvanometra. Kut između ovog smjera i horizontatale, tj. inklinacija, može se ovim aparatom izmjeriti s tačnošću od  $\pm 0,1'$ .

**Magnetometar sa zasićenim jezgrama** (v. str. 630) upotrebjava se za precizna apsolutna mjerjenja jakosti zemaljskog magnetskog polja. Postavljanjem osi jezgara u odgovarajući smjer može se tako mjeriti totalni, vertikalni ili horizontalni intenzitet.

**Magnetometar s pomičnim svitkom** (v. str. 630) služi za mjerjenje jakosti magnetskog polja s nešto manjom tačnošću. Mjerjenje se svodi na mjerjenje električne struje potrebne za kompenzaciju djelovanja zemaljskog magnetskog polja. Sam intenzitet određuje se računskim putem iz izmjerene jakosti struje i poznate konstante instrumenta.

**Protonski magnetometar** služi za relativno mjerjenje totalnog intenziteta  $T$  zemaljskog magnetskog polja (v. str. 630). On radi na principu nuklearne magnetske rezonancije protona. Oko posude u kojoj se nalazi tekućina bogata protonima, npr. voda ili benzen, postavljen je svitak kojim protječe istosmjerna struja. Smjer magnetskog polja tog svitka u posudi treba da je otprilike okomit na smjer Zemljina magnetskog polja. Jakost polja svitka znatno je veća od jakosti zemaljskog magnetskog polja. Ako je tekućina u posudi tvar bogata protonima, ovi se zbog svog dipolnog magnetskog momenta postavljaju u smjer paralelan smjeru magnetskog polja svitka. Protoni se zbog spina (vrtnje elektrona oko vlastite osi) ponašaju kao zvrvkovi. Čim se isključi struja i prestane postojati magnetsko polje svitka, na protone djeli samo još zemaljsko polje koje stoji sada okomito na os rotacije. Zbog zaokretnog momenta koji se uslijed toga pojavljuje, os rotacije počinje izvoditi precesiono kretanje. Kruženje vektora nuklearne magnetizacije inducira u svitku smještenom oko posude slabe izmjenične napone koji nakon odgovarajućeg pojačanja i filtracije daju signal dovoljno jak za priljučak magnetometra na električne brojače ili registratore. Iz frekvencije precesije može se odrediti jakost magnetskog polja Zemlje.

Osim na terenu, magnetska mjerjenja vrše se i na uzorcima minerala i stijena radi utvrđivanja njihove susceptibilnosti i njihove remanentne polarizacije.

**Magnetska susceptibilnost uzoraka minerala i stijena** mjeri se na više načina, npr. specijalnim osjetljivim vagama u nehomogenom polju. Postoje i električni mjeraci susceptibilnosti koji rade na principu indukcije napona u mjernom svitku. Neki od tih mjeraca omogućuju i direktno očitanje iznosa susceptibilnosti, npr. tzv. *kapametar* (tvornički naziv prema grčkom slovu *kapa*, simbolu za susceptibilnost).

**Mjerjenje remanentne magnetske polarizacije** slabo magnetičnih stijena (uglavnom pri paleontološkim ispitivanjima) izvodi se rotacijskim induksijskim magnetometrom, koji je sličan Zemljinom induktoru. Inducirani naponi se nakon pojačanja, filtracije

i demodulacije dovode na pokazni instrument koji je baždaren izravno u jedinicama polarizacije (teslama).

**Seizmička refleksijska i refrakcijska mjerena** danas se mnogo primjenjuju u geofizičkoj prospexi.

U bušotini izazvana eksplozija stvara elastične valove koji se šire kroz slojeve Zemljine kore, u njima se lome i reflektiraju. Pomicanje tla koje ovi valovi izazivaju na površini Zemlje mjeri se vertikalnim seismografsima, i to prvenstveno tzv. *geofonima* u kojima se potresi pretvaraju u električne veličine i registriraju. Iz vremena koje protekne između trenutka eksplozije i nailaska valova do pojedinih geofona može se, ako je poznata brzina širenja valova, odrediti položaj reflektirajućih slojeva, npr. ležišta nafta (sl. 104).

**Geofon** je aparat kojim se mjeri vertikalni potresi i koji radi na elektrodinamičkom principu. Membranskom oprugom zavješeno tijelo veće mase nosi na sebi svitak koji se može kretati u rasporu između željezognog okuća i s njime fiksno spojenog permanentnog magneta (slično kao u elektrodinamičkim zvučnicima, v. *Elektroakustika*). Okuće koje je s donje strane šiljasto, zabija se u zemlju. Pri potresima tla svitak ostaje zbog mase svog tijela na početku u mirovanju, dok se okuće miče zajedno s tlom.

Zbog relativnog kretanja između svitka i magnetskog polja u zavoru induciraju se u svitku izmjenični naponi koji su to veći što je veća brzina pomicanja tla. Da se izbjegne štetan utjecaj rezonancije, vlastita frekvencija geofona mora biti niža od frekvencije potresa; ona u geofonima koji se primjenjuju za refleksiona seizmička mjerena iznosi 10–20 Hz, a za refrakciona seizmička mjerena samo 2–10 Hz. U geofonu se dakle pokreti tla (mali putevi, brzine kretanja i ubrzanja) elektrodinamičkim aktivnim pretvaračem pretvaraju u električne izmjenične napone koji se nakon pojačanja i filtracije mogu registrirati pogodnim električnim registratorom.

**Gravimetrijska mjerena** služe za utvrđivanje gravitacijskog polja sile teže na Zemlji.

Apsolutna mjerena gravitacije teško izvode s dovoljnom tačnošću. Jednostavnija su relativna mjerena i njima se uglavnom bavi gravimetrija. Nalaze li se u zemaljskoj kori minerali ili stijene veće gustoće, dolazi do izobiljenja gravitacijskog polja. Iz razlike sile teže na različitim tačkama površine može se zaključivati na sastav zemaljske kore. Gravitacijska mjerena ne omogućuju, međutim, tačno određivanje oblike i dubine slojeva koji izazivaju deformaciju polja, pa se za ovu svrhu moraju dodatno primijeniti seismička refleksijska mjerena. Za gravitacijska mjerena služe električni gravimetri.

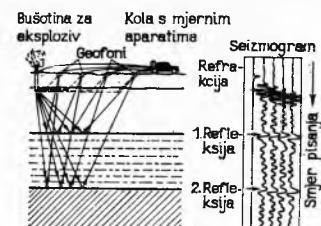
**Gravimetri** su instrumenti za direktno mjerjenje relativne vrijednosti sile teže između dva mesta. Oni se sastoje od mase zavješene na specijalan način pomoći dvije opruge od metala ili kvarca. Pri promjeni sile teže masa mijenja svoj položaj. Te su promjene položaja vrlo male, pa se za njihovo utvrđivanje primjenjuju mikroskopi, svjetlosne metode, a ponekad i električne mjerne metode. Za električno utvrđivanje promjena položaja služe u gravimetrima pretvarači s diferencijalnim fotočelijama, također induktivitetski i kondenzatorski pretvarači s pogodnim mosnim spregama. Dovoljna osjetljivost postiže se u tom slučaju primjenom jednostepenih i dvostepenih elektroničkih pojačala.

**Geotermička mjerena** sastoje se u mjerenu temperature u dubokim buštinama i na površini Zemlje (na dubini 1–2 m).

Geotermička ispitivanja provode se radi dobivanja podataka o slojevima u zemaljskoj kori. Normalni temperaturni gradijent kore iznosi  $\sim 30^{\circ}\text{C}/\text{km}$  dubine. Ako se pojave odstupanja od tog gradijenta, može se zaključiti da postoje slojevi s većom toplinskom vodljivošću (kao npr. naslage soli), topli izvori, radioaktivni minerali, itd. Praktična primjena geotermičkih ispitivanja sudi se na mjerenu temperature blizu površine radi proučavanja lateralnih varijacija temperature i na dubinsku mjerenu radi proučavanja vertikalnog rasporeda temperature duž bušotine.

Za geotermička mjerena primjenjuju se električni termometri s termoelektričnim pretvaračem. Topli kraj termometra nalazi se u sondi koja se spušta u buštinu, a hladni na površini.

**Geoelektrična mjerena** služe također za otkrivanje minerala i vode ili za ispitivanje tla prilikom podizanja građevina. Ova se mjerena mogu podijeliti na mjerenu vodljivosti tla, na mjerenu potencijala i na elektromagnetska mjerena. Pri mjerenu vodljivosti utvrđuje se uz pomoć polarizacije da li se radi o vodljivim mineralima ili o elektrolitskoj vodljivosti vode. Mjerjenjem potencijala na različnim tačkama tla utvrđuje se položaj ekvipotencijalnih linija. Za ovo mjerene mogu poslužiti struje koje se u tlu umjetno izazovu ili struje koje se pojavljuju u tlu zbog nekih



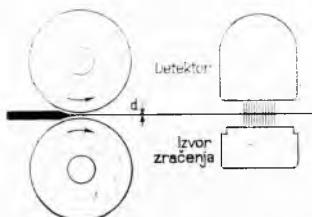
Sl. 104. Primjena geofona pri istraživanju podzemnih slojeva

prirodnih pojava. Neravnomjerno raspoređene ekvipotencijalne linije ukazuju na prisustvo vodljivih slojeva. Pri elektromagnetskim mjerjenjima posebnim se odašiljačem stvara izmjenično magnetsko polje čija frekvencija iznosi ponekad i nekoliko kiloherca. Struje koje se zbog tog polja javljaju u tlu stvaraju sekundarno polje koje se registrira podesnim prijemnikom. Ako tlo nije homogeno, dolazi do poremećaja sekundarnog magnetskog polja, iz koga se može zaključivati o prisustvu minerala, vode itd.

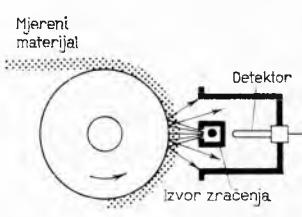
Z. Krulc

### Električna mjerena nuklearnih zračenja

Dektori nuklearnog zračenja (v. *Detekcija nuklearnog zračenja*, str. 240) mogu se u kombinaciji s izotopima, koji služe kao izvor zračenja, primijeniti i za mjerjenje nekih nedelektričnih veličina. U tom slučaju se izvor  $\alpha$ - i  $\beta$ -zračenja postavlja s jedne strane objekta na kome se nešto mjeri, a detektor kojim se utvrđuje slabljenje tog zračenja zbog prisustva tog objekta, s druge strane



Sl. 105. Mjerjenje debljine materijala detekcijom slabljenja zračenja radioaktivnog izvora



Sl. 106. Utvrđivanje debljine nekog materijala mjerjenjem slabljenja radioaktivnog zračenja na principu difuzne refleksije zračenja od transportnog valjka

(sl. 105). Moguće je i drugi raspored, pri kome su izvor i detektor na istoj strani (sl. 106). Pri tome se mjeri slabljenje  $\beta$ -zračenja reflektiranog od čeličnih valjaka ili ploča preko kojih prolazi mjereni materijal. Na ovom principu može se mjeriti gustoća materijala, debljina nemetalnih i metalnih traka i folija, debljina pokrivenih slojeva i namaza, razina tekućina i rasutih tereta u spremnicima, itd.

LIT.: M. B. Stout, Basic electrical measurements, New York 1950. — B. Obuhov, Električna mjerena, Zagreb 1950. — J. Spencer, Maintenance and servicing of electrical instruments, Pittsburgh 1951. — K. B. Карапанов, Методы электрических измерений, Москва-Ленинград 1952. — F. K. Harris, Electrical measurements, New York 1952. — F. E. Terman, J. M. Reutt, Electronic measurements, New York 1952. — A. B. Фримен (ред.), Электрические измерения, Москва-Ленинград 1954. — И. Л. Казанов, Электронные и ионные преобразители, 2 ч., Москва-Ленинград 1955. — Р. M. Pfleider, Elektrische Messung mechanischer Größen, Berlin 1956. — M. Stöckl, Elektrische Meßtechnik, Stuttgart 1956. — I. F. Kinnard, Applied electric measurements, New York 1956. — M. Lapinski, Czujniki pomiarowe, Warszawa 1957. — H. F. Grave, Gleichrichter-Meßtechnik, Leipzig 1957. — А. М. Туричин, П. В. Новицкий, Проволочные преобразователи и их техническое применение, Москва-Ленинград 1957. — В. О. Артюнов, Электрические измерительные приборы и измерения, Москва-Ленинград 1958. — Z. Trnka, M. Dusek, Elektrické měřítko pfistroje, Praha 1958. — H. P. Радевский, Датчики механических параметров, Москва 1959. — А. М. Тареев, Д. М. Казарновский, Испытания электроизоляционных материалов, Москва-Ленинград 1959. — Д. И. Агайкин, Е. Н. Костина, Н. Н. Кузнецова, Датчики систем автоматического контроля и регулирования, Москва 1959. — А. М. Туричин, Электрические измерения неэлектрических величин, Москва-Ленинград 1959. — R. Langbein, G. Werkmeister, Elektrische Meßgeräte, Leipzig 1959. — F. Mlakar, Optica električna mjerena, Ljubljana 1959. — M. A. Берлинер, Электрические методы и приборы для измерения и регулирования влажности, Москва-Ленинград 1960. — В. Т. Пряников, А. В. Талыцкий (ред.), Курс электрических измерений, 2 ч., Москва-Ленинград 1960. — H. Neumann, Das Messen mit elektrischen Geräten, Berlin 1960. — В. А. Акуловский, Емкостные дифференциальные датчики перемещения, Москва 1960. — Л. Ф. Куликовский, Индуктивные измерители перемещений, Москва 1961. — В. Н. Богомолов, Устройства с датчиками Холла и датчиками магнитосопротивления, Москва 1961. — И. И. Кифер, В. С. Пантошин, Испытания ферромагнитных материалов, (Магнитные измерения), Москва-Ленинград 1962. — H. F. Grave, Elektrische Messung nichtelektrischer Größen, Leipzig 1962. — J. Stanek, Technik elektrischer Meßgeräte, Berlin 1962. — W. Hunsinger, G. Mühlbich: Palm, Elektrische Meßgeräte und Meßeinrichtungen, Berlin-Heidelberg-New York 1963. — C. C. Хризман, Цифровые измерительные приборы, Киев 1963. — Р. M. Pfleider, H. Jahn, Elektrische Meßgeräte und Meßverfahren, Berlin-Heidelberg-New York 1965. — J. Loncar, Električna mjerena, Zagreb 1965. — П. П. Орнатский, Автоматические измерительные приборы, Киев 1965. — R. Kautsch, Elektrische Meßtechnik zur Messung nichtelektrischer Größen, Berlin 1966. — H. Jüttmann, Elektrotechnische Grundlagen für das Messen und Regeln, Düsseldorf 1966. — V. Popović, Mjerena u telekomunikacijama i elektronici, Beograd 1967. — R. Drachsel, Grundlagen der elektrischen Meßtechnik, Berlin 1968. — V. Đ. Јовановић, Električna mjerena, Beograd 1968. — L. Merz, Grundkurs der Meßtechnik, Tl. I: Das Messen elektrischer Größen, München-Wien 1968; Tl. II: Das elektrische Messen nichtelektrischer Größen, München-Wien 1968. — V. Bego, Električna mjerena, Zagreb 1968. — E.-G. Woschni, Elektrische Informationsverarbeitung nichtelektrischer Größen, Leipzig 1969.

V. Bego D. Vujević V. Muljević

**ELEKTRIČNA PRAŽNJENJA (IZBIJANJA) U PLINOVIMA**, različiti načini prolaska elektriciteta kroz plinove pri kojima, zbog sudarnih procesa, zbog stvaranja prostornih naboja i zbog difuzije dolazi do određenih popratnih pojava. Plinovi, ako su zaštićeni od ionizirajućeg zračenja, na temperaturama nižim od  $\sim 1000^\circ\text{K}$  odlični su izolatori. Da bi neki plin postao električki vodljiv, u njemu moraju nastati slobodni nosioci elektriciteta (elektroni i ioni). Električna struja u plinovima je konvektivna; sastoji se od nosilaca elektriciteta koji izlaze iz elektroda odnosno nastaju u samom plinu, te se kreću kroz plin prema elektrodi suprotne predznaka.

Na osnovu uvjeta formiranja nosilaca elektriciteta dijele se izbijanja na *samoštala* i *nesamoštala*. U prvima se proces izbijanja odražava putem internih pojava u samom plinu, neovisno o djelovanju vanjskog ionizirajućeg zračenja; o nesamoštalom izbijanju se govori da proticanje struje kroz plin prestane čim se odstrane ili izoliraju vanjski izvori koji uzrokuju ionizaciju plina (X-zrake,  $\beta$ - ili  $\gamma$ -zrake).

Izbijanja se jedna od drugih razlikuju po svjetlosnim, toplinskim i akustičkim efektima koji ih prate i također po stepenu ionizacije i kemijskim ravnotežama koje se pri tome uspostavljaju. Električna izbijanja se klasificiraju na osnovu fenomena na elektrodama, gustoće struje u plinu i frekvenciji uzbudnog polja, te se razlikuju Townsendovo izbijanje, iskra, tinjavo izbijanje, korona, luk i radio-frekventno izbijanje.

### Osnovni procesi u električnim izbijanjima

U ioniziranim plinovima pojavljuje se nekoliko osnovnih tipova sudarnih procesa: elastični sudari, neelastični sudari, interakcije praćene emisijom elektromagnetskog zračenja, superelastični sudari, interakcije uz apsorpciju elektromagnetskog zračenja i neradijativni rekombinacioni procesi.

Pod *elastičnim sudarima* se razumijevaju interakcije pri kojima ne dolazi do pretvorbe translacione energije u unutarnju energiju čestica. Brzina kojom se uspostavlja ravnotežna raspodjela kinetičke energije u plinu u znatnoj mjeri ovisi o efikasnosti elastičnih sudara.

Pri *neelastičnim sudarima* dolazi do povećanja unutarnje energije jedne čestice ili obiju čestica na račun njihove translacione energije. Ovamo idu različni ekscitacioni i ionizacioni sudarni procesi.

Sudari elektronâ (ili ionâ) s neutralnim česticama ili ionima može pratiti *emisiju elektromagnetskog zračenja*, čija energija odgovara energiji rekombinacije ili zahvata. Tipični su primjeri radioaktivni zahvat elektrona na atomima i radioaktivna rekombinacija elektrona u pozitivnih iona.

*Superelastični sudari* su suprotne neelastičnim, tj. unutarnja energija jedne čestice ili eventualno obiju čestica pretvara se u translacionu energiju tih čestica. Iz te grupe pojava ispitana je detaljnije jedino superelastični sraz elektrona s nekim metastabilnim atomima.

*Sudari praćeni apsorpcijom elektromagnetskog zračenja* dovode do povećanja kinetičke energije jedne čestice ili obiju čestica. Ti sudari su inverzni procesima s emisijom elektromagnetskog zračenja, a pojavljuju se pri interakcijama elektrona s ionima u vrlo gustoj plazmi.

Djelomično ili potpuno ionizirani plin u kojemu je broj pozitivnih i negativnih nosilaca elektriciteta jednak, a koji zauzima volumen veći od nekog kritičnog volumena ovisnog o temperaturi elektrona, zove se *plazma*. Zbog djelovanja kulonskih sila plazma ispoljava svojstva bitno različita od svojstava plinova, te se u novije vrijeme smatra četvrtim agregatnim stanjem (v. *Plazma*). Pretežni dio materije u svemiru u plazmatskom je stanju. U laboratoriju se plazma dobiva u različnim električnim izbijanjima i udarnim valovima.

Pri *neradijativnim rekombinacionim sudarima* predaje se energija spajanja elektrona (ili negativnih iona) s pozitivnim ionima (odnosno, kod spajanja neutralnih atoma, energija disocijacije molekule) trećoj čestici u obliku translacione energije.

Navedeni tipovi sudarnih procesa odnose se u osnovi također na metale i poluvodiče, koji se mogu shvatiti kao makroskopske molekularne tvorevine (v. *Struktura metala u članku Atom, TE 1*, str. 477).

Osim sudarnih procesa važnu ulogu u nekim električnim prženjenjima ima apsorpcija elektromagnetskog zračenja na atome i ionima uz ekscitaciju ili ionizaciju tih čestica. Uzbu-