

zaštite nisu tako efikasne kao zemna užeta i odvodnici prenapona i pokazuju više nedostataka u upotrebi.

LIT.: И. С. Стекольников, Молния, Москва-Ленинград 1940. — И. С. Стекольников, Физика молнии и грозозащита, Москва-Ленинград 1943. — П. Н. Тверской, Атмосферное электричество, Ленинград 1949. — Я. И. Френкель, Теория явления атмосферного электричества, Ленинград-Москва 1949. — Ј. A. Chalmers, Atmospheric electricity, London 1949. — M. A. Babikov, Technika visokih napona, Beograd 1952. — US National Bureau of Standards, Code for protection against lightning, Washington 1952. — A. Roth, Hochspannungstechnik, Wien 1959. — R. Becker, F. Sauter, Theorie der Elektrizität, Bd. I, Stuttgart 1957. — H. Buchholz, Elektrische und magnetische Potentialfelder, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1957. — L. B. Loeb, Static electrification, Berlin-Heidelberg-New York 1958. — G. Someda, Elementi di elettrotecnica generale, Bologna 1962. — M. Krstić, Gromobranske instalacije, Beograd 1963. — Westinghouse, priručnik: Prenos i distribucija električne energije, Beograd 1964. — Ј. Lončar, Osnovi elektrotehnike, Zagreb 1964.

M. Padelin

ELEKTRIČNA MJERENJA, postupci za mjerjenje iznosa i utvrđivanje karakteristika i zličnih električnih i neelektričnih fizikalnih veličina pomoću električnih mjernih instrumenata, naprava i uređaja. Ona nalaze vrlo široku primjenu u samoj elektrotehnici, gdje se mjere u prvom redu električne veličine (npr. napon, struja, električna energija), i u drugim granama nauke i tehnike, gdje služe uglavnom za mjerjenje neelektričnih veličina (npr. temperature, brzine ili protoka). Električna mjerena imaju danas značajnu ulogu u fundamentalnim istraživanjima, pri razvoju, u proizvodnji, u eksploataciji i pri održavanju. Brzi razvoj svih područja nauke i tehnike postavlja sve veće zahtjeve na električna mjerena, što iziskuje sve složenije i preciznije, a za rukovanje što jednostavnije mjerne naprave.

U prvom poglavlju ovog članka obrađeni su merni instrumenti i uređaji, u drugom mjerne metode i postupci za mjerjenje električnih veličina, a mjerjenje neelektričnih veličina i dodatne naprave koje su pri tome potrebne opisani su u trećem poglavlju.

ELEKTRIČNI MJERNI INSTRUMENTI I UREĐAJI

Instrumenti i uređaji kojima se vrše električna mjerena sa staje se od jednog ili više mernih sistema, smještenih u pogodnom kućištu, i dodatnog pribora (predotpornika, ispravljača, itd.) Koji može biti ugrađen, pridodat ili se može naknadno priključiti.

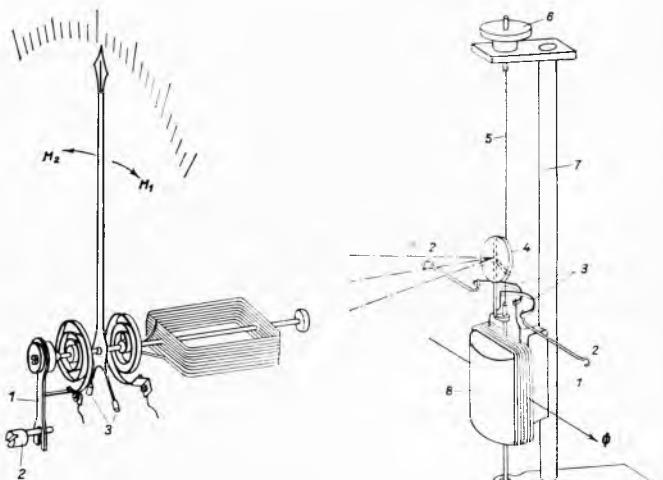
Električne mjerne naprave mogu se podijeliti na pokazne, registracione i kontaktne instrumente, na oscilografie i osciloskope, na mostove i kompenzatore, na električna brojila, na elektroničke i digitalne instrumente i brojače, na etalone (normale), merna pojačala, izvore struje i neke druge naprave i pomoćne uređaje.

Električne mjerne naprave mogu se uz izvjesne dodatke (npr. pretvarače) upotrijebiti i za mjerjenje neelektričnih veličina kao što su temperatura, vlaga i druge (v. poglavlja Električna mjerena električnih veličina i Električna mjerena neelektričnih veličina u ovom članku).

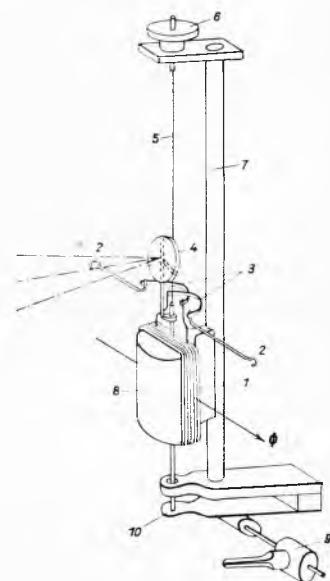
ELEKTRIČNI MJERNI INSTRUMENTI

Konstrukcija mernih sistema i opće karakteristike električnih mernih instrumenata

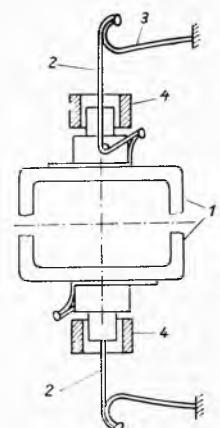
Moment i protumoment. Određenoj vrijednosti mjerene veličine treba da odgovara određeni položaj pomicnog organa instrumenta. To se može postići ako na pomicni organ djeluje, u jednu ruku, moment M_1 ovisan o mjerenoj veličini i, u drugu ruku, mehanički ili električni protumoment (tzv. direkcionim moment) M_2 koji je ovisan o kutu zaokreta pomicnog organa. Pomicni organ zaustaviti će se u onom položaju u kojem su oba suprotna momenta jednakia; stoga je kut zaokreta pomicnog organa funkcija mjerene veličine. Za dobivanje mehaničkog protumomenta upotrebljavaju se direkcione sile spiralnih opruga ili torzionih traka. Najčešće se uzimaju dvije spiralne opruge koje djeluju jedna protiv druge (sl. 1). Kad ne djeluje moment M_1 , opruge dovode pomicni organ u null položaj. Kod osjetljivijih sistema protumoment se dobiva pomoću jedne metalne trake na kojoj pomicni organ visi (zavješeni sistemi, sl. 2) ili je pomoću dviju traka napet (trakom napeti sistemi, sl. 3). Trake su pravokutna presjeka s odnosom stranica i do 20 : 1, a izraduju se od bronce, od platine, od legura s platinom ili od kvarca. Instrumenti u kojih je sistem zavješen trakom imaju ugradenu libelu radi stavljanja instrumenta u ispravan položaj, a naprezanje trake prilikom prenošenja instrumenta izbjegava se arretiranjem pomicnog organa. Električni protumoment dobiva se s pomoću dodatnog svitka postavljenog



Sl. 1. Pomicni organ instrumenta s pomicnim svitkom. 1 Pomicna poluga za naravnavanje nultog položaja, 2 glava s ekscentrom za pomicanje poluge 1, 3 utezi za uravnoteženje pomicnog organa s kazaljkom



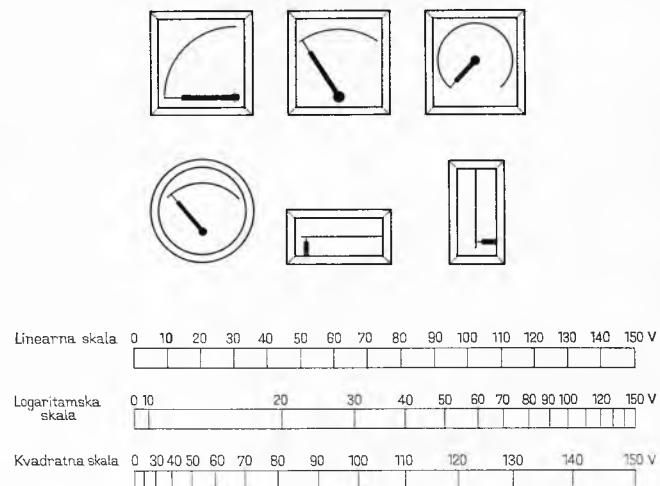
Sl. 2. Zrcalni galvanometar sa zavješnim sistemom. 1 Pomicni svitak, 2 i 3 dovodni za pomicnog svitka, 4 zrcalo, 5 traka za zavješenje pomicnog svitka, 6 okrepljivo dugme, 7 nosač, 8 jezgra od mješkog željeza (magnet nije prikazan), 9 ručka za arretiranje, 10 elastično pero



Sl. 3. Trakom napeti sistem. 1 Pomicni svitak, 2 napeta traka, 3 pero za napinjanje trake, 4 zaštitni prsten

na pomicni organ. Veličina momenta ovisi o jakosti struje koja protječe kroz taj svitak (kvocijentni i diferencijski instrumenti).

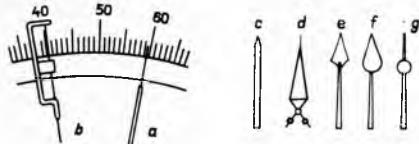
Skala. Položaj pomicnog organa instrumenta registrira se s pomoću kazaljke i skale. Različne oblike skale pokazuju sl. 4. Skala ima određeni broj podjelaka (crtica s prikladnom numeracijom). Veličina skale, broj i debljina crtica ovisi o kvalitetu i namjeni instrumenta. Precizni instrumenti imaju najčešće 150 crtica, a pogonski instrumenti imaju manji broj crtica na većem međusobnom razmaku. Dužina skale, definirana dužinom luka koji prolazi kroz sredinu najkracihih crtica podjele, iznosi od nekoliko desetaka milimetara do ~ 150 mm, ovisno o tačnosti instrumenta. Ovisno o zakonu po kojem se mijenja moment M_1 , skale mogu



Sl. 4. Skale za instrumente

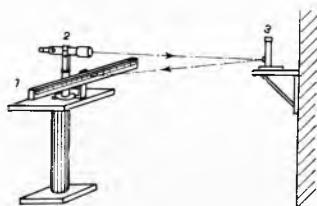
biti linearne, kvadratne, logaritamske i hiperbolne. *Pokazni opseg* mjernog instrumenta obuhvaća duljinu skale na kojoj se mogu promatrati otkloni kazaljke. *Mjerni opseg* je onaj dio pokaznog opsega na kojem se može mjeriti s označenom tačnošću. Kod linearnih skala je apsolutna tačnost mjerjenja duž cijele skale jednaka, stoga se mjerni opseg podudara s pokaznim. Kod nelinearnih skala je apsolutna tačnost mjerjenja na različnim mjestima skale različita. Stoga se gornja i donja granica mjernog opsega označava tačicom uz podjelu.

Kazaljke mjernih instrumenata izrađuju se od tankog aluminijskog lima, a ponekad i od tanke staklene cjevčice (kapilare). Oblik kazaljke ovisan je o vrsti i namjeni instrumenta. Precizni



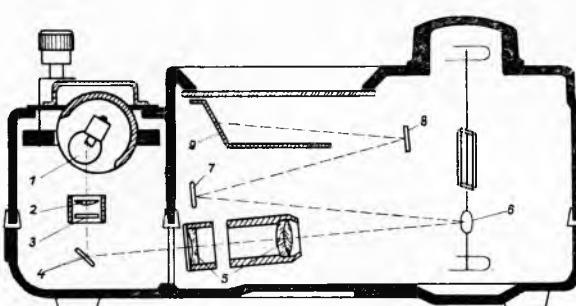
Sl. 5. Kazaljke mjernih instrumenata: a nožasta kazaljka, b nitna kazaljka, c štapasta kazaljka, d antivibratorna kazaljka, e...g kazaljke pogonskih instrumenata

instrumenti imaju kazaljke u obliku noža čija je debljina otprilike jednaka debljini crtica na skali (sl. 5 a). Često se izrađuju kazaljke koje na vrhu imaju napetu tanku metalnu ili svilenu ravninu iznad koje se nalazi mali bijeli zaslon radi lakšeg uočavanja (sl. 5 b). Pogonski instrumenti imaju robustnije kazaljke: štapasta oblika (sl. 5 c), antivibracione izvedbe (sl. 5 d) ili s proširenim dijelom ispod vrha, što omogućava očitanje iz većih udaljenosti (sl. 5 e...g). Kako je kazaljka nešto odmaknuta od skale, postoji mogućnost netačnog očitanja ako promatrač ne gleda okomito na skalu (*pogreška zbog paralakse*). Ta se pogreška eliminira na više načina. Najčešće se uz skalu, a ispred kazaljke, nalazi zrcalo. Kada kod promatranja kazaljka pokriva svoju sliku u zrcalu, promatrač gleda okomito na skalu pa su očitanja tačna. U osjetljivim instrumenata upotrebljavaju se umjesto kazaljke zrcalni sistemi i pokazivanje svjetlosnim znakom. Kod zrcalnih sistema malo zrcalo pričvršćeno na pomični organ (v. sl. 2) reflektira svjetlosnu zraku iz projekcionog aparata na skalu udaljenu 0,3...2 m (sl. 6). Na okruglom ili četverouglatom otvoru projekcionog aparata napeta je tanka nit, čija sjena na osvijetljenom dijelu skale omogućava precizno očitanje. Instrumenti sa svjetlosnim znakom imaju projekcioni aparat i skalu u kućištu in-



Sl. 6. Zrcalni sistem. 1 Skala, 2 projekcioni aparat, 3 instrument

dijelu skale omogućava precizno očitanje. Instrumenti sa svjetlosnim znakom imaju projekcioni aparat i skalu u kućištu in-



Sl. 7. Instrument sa svjetlosnim znakom. 1 Sijalica, 2 kondenzor-leća, 3 zaslon s okruglim otvorom i tankom niti, 4, 7 i 8 zrcala za reflektiranje svjetlosne zrake, 5 leće, 6 zrcalo na pomičnom organu instrumenta, 9 skala

strumenta. Veća osjetljivost ovih instrumenata dobiva se višestrukim reflektiranjem svjetlosne zrake (sl. 7).

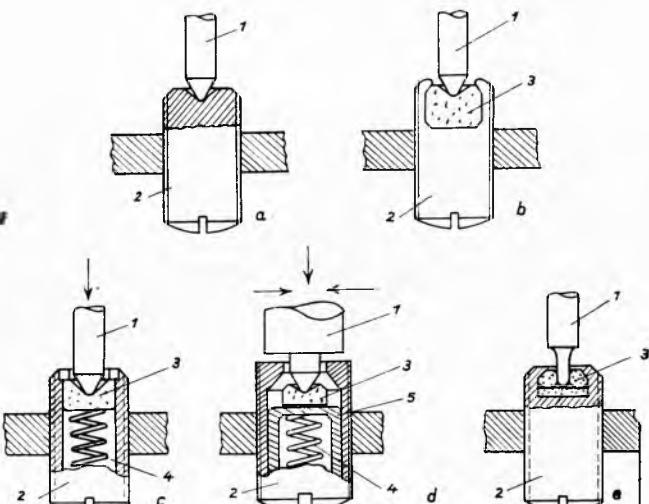
Ležaj osovine instrumenta mora biti izrađen tako da trenje u njemu bude što manje. U instrumentima se upotrebljavaju razli-

cite vrste ležaja. Ležaj sa šiljkom upotrebljava se u preciznim i pogonskim instrumentima. Osovina pomičnog organa instrumenta ima krajeve konusna oblika sa zaobljenim vrhom koji se oslanjaju o ležajevu. U ležajevima sa čepom osovina ima oblik na kraju zaobljenog cilindra. Ovi su ležajevi otporniji prema potresima, a upotrebljavaju se češće u registracionim instrumentima i u instrumentima izloženim trešnji. Po pravilu ležaj je od tvrdog materijala nego osovina; pogonski instrumenti imaju ležajev od bronce, a precizniji instrumenti ležajev od ahata, safira ili rubina (v. *Drago kamenje, umjetno*). Na sl. 8 prikazani su ležajevi od bronce (a) i dragog kamena (b) i ležaj za instrumente izložene trešnji i udarcima (c, d, e). Instrument će biti to tačniji što je moment trenja manji od momenta opruge. Vrijednost jednog sistema s obzirom na ležaj određuje se eksperimentalno dobivenim *brojem dobrote* (γ) po Keinathu:

$$\gamma = \frac{10 M}{G^{1.5}},$$

gdje je M zaokretni moment (pri zaokretanju za 90°) izražen u centimetar-pondima (cm p), G težina pomičnog organa instrumenta u pondima (p), a faktor 10 eksperimentalno je utvrđen. Sistemi s brojem dobrote $0.5\cdots 1$ smatraju se dobrima.

Prigušenje. Zbog djelovanja opruge i tromosti pomičnog organa, kazaljka ne zauzima odmah konačni položaj, već oscilira oko tog položaja. Oscilacije se smanjuju prikladnim prigušenjem.



Sl. 8. Izvedbe ležajeva sa šiljkom. a Ležaj od bronce, b ležaj od dragog kamena, c i d ležaj za instrumente koji su izloženi udarcima i vibracijama, e ležaj sa čepom; 1 osovina pomičnog organa, 2 ležajni vijak, 3 ležajni kamen, 4 opruga, 5 čahura zaštitnog sistema

Elektromagnetsko prigušenje zasniva se na stvaranju vrtložnih struja u specijalno za tu svrhu predviđenim metalnim pločama i metalnim okvirima na pomičnom organu kada se oni kreću u polju permanentnog magneta (v. sl. 9 i 27) i na pojavi struja u namotu (kad je krug zatvoren). Ove struje stvaraju s poljem permanentnog magneta moment koji se protivi gibanju pomičnog organa. **Zračno prigušenje** dobiva se gibanjem lopatica od tanka lima u cjevčici okrugla ili pravokutna presjeka, koja je samo malo veća od lopatice (v. sl. 17, 20 i 28). Gibanje lopatice suprotstavlja se pritisak zraka što ga lopatica tiska ispred sebe. **Tekućinsko prigušenje** vrši se obično uronjavanjem čitavog mjernog sistema u ulje ili glicerin, što otežava kretanje pomičnog organa. Ova vrsta prigušenja upotrebljava se npr. u petljama za svjetlosni oscilograf.

Standardi za električne mjerne instrumente

Standardi za električne mjerne instrumente definiraju izradu, način korištenja mjerne opreme, oznake i granice pogreške. U jugoslavenskom standardu JUS L. G1.020 dane su definicije općih pojmove, klase tačnosti, uvjeti i načini ispitivanja kao i referentni uvjeti za utjecajne veličine električnih mjerne instrumenata.

Pogreške i klase tačnosti električnih mjernih instrumenata. Prema naprijed citiranom standardu instrumenti su razvrstani s obzirom na tačnost u sedam, a mjeri pribor (šantovi i predporunci) u pet klasa tačnosti. Klase tačnosti označavaju se za mjerne instrumente indeksima: 0,1, 0,2, 0,5, 1, 1,5, 2,5, 5, a za pribor indeksima: 0,05, 0,1, 0,2, 0,5, 1,0. Pri tome indeksi klase označavaju dozvoljene granice pogreške u procentima maksimalne vrijednosti mernog opsega za sve instrumente osim za kvocijentna mjerila, omometre i instrumente s logaritamskom i hiperbolnom skalom i za mjerila frekvencije s jezićima. Tako npr. pogreška voltmetra klase 1 s maksimalnom vrijednosti mernog opsega (mernog dometa) 150 V, na bilo kojem mjestu mernog opsega, ne smije prijeći, pod referentnim uvjetima, vrijednost od $\pm 1,5$ V, tj. $\pm 1\%$ od 150 V. Granice pogreške izražene u procentima prave vrijednosti mjerene veličine bit će šire pri manjim otklonima. Pri punom otklonu, tako izražene granice pogreške jednake su indeksu klase, a npr. pri polovici punog otklona bit će dva put veće, pri trećini triput veće itd.

Dozvoljeno preopterećenje (dugotrajno i kratkotrajno) mernih instrumenata također je definirano standardom. Njime je određeno i koji se instrumenti izuzimaju od pokusa kratkotrajnog preopterećenja (elektrostaticki instrumenti, instrumenti s vrućom žicom itd.).

Utjecajne veličine su veličine koje instrument ne mjeri a koje utječu na njegovo pokazivanje. Referentni uvjeti su utvrđene vrijednosti utjecajnih veličina kod kojih instrument mora odgovarati zahtjevima na njemu označene klase. Propisima su odredene vrijednosti pojedinih utjecajnih veličina, tzv. referentne vrijednosti. Utjecajne veličine su npr. temperatura okoline, položaj instrumenta, strana magnetska polja i sl. Npr. referentna vrijednost za temperaturu je $20 \pm 1^\circ\text{C}$ za instrumente klase 0,1 do 0,5 i $20 \pm 2^\circ\text{C}$ za instrumente klase 1 do 5. Pogreška instrumenta treba da je unutar granica pogrešaka određenih indeksom klase ako je upotrijebljen uz navedene referentne vrijednosti temperature i navedenog područja tolerancija. Međutim, standardom je predviđeno da dodatna pogreška instrumenta ne smije prijeći vrijednost klase ako temperatura okoline odstupa $\pm 10^\circ\text{C}$ od referentne vrijednosti. To znači da instrument indeksa klase 1 mora ostati u klasi na temperaturi od 18°C do 22°C , a da smije grijesiti i do 2% na temperaturi okoline od 10°C do 18°C , odnosno od 22°C do 30°C .

Ispitni napon je napon kojim se provjerava dielektrična čvrstoća izolacije mernog instrumenta između kućišta i mernog sistema. Ako je kućište od izolacionog materijala, ispitni napon se priključuje između mernog sistema i metalne ploče na koju se stavi instrument. Ispitivanje se vrši izmjeničnim naponom sinusna oblika, frekvencije između 45 i 60 Hz u trajanju od 1 minute. Za pojedine nazivne radne napone propisan je odgovarajući ispitni napon. Efektivna vrijednost ispitnog napona u kilovoltima označena je na instrumentu brojem u zvjezdici; za ispitni napon 0,5 kV ne stavlja se broj.

Oznake i simboli za instrumente. Na skalu ili vani na kućištu instrumenta upisuju se oznake i simboli kao što su: naziv i znak proizvođača; jedinica mjerene veličine označena simbolom; tvornički broj za instrumente klase 0,1 do 0,5, a kod prenosnih instrumenata za sve klase; indeks klase; simbol vrste struje; simbol mernog sistema. Prema potrebi stavljuju se i drugi simboli. U tablici 1 dani su češće upotrebljavani simboli.

Instrumenti s pomičnim svitkom

Konstrukcija i djelovanje. Instrumenti s pomičnim svitkom predstavljaju jednu od najvažnijih i najviše upotrijebljenih vrsta instrumenata. Oni se sastoje od svitka pravokutna oblika koji se zaokreće u zračnom rasporu između polova ili polnih nastavaka permanentnog magneta i jezgre od mekog željeza (sl. 9). Zračni raspor je svagdje jednakog širine, a magnetsko polje je u njemu homogeno s radikalno usmjerenim silnicama. Kada kroz svitak teče konstantna struja I , na njega djeluje moment M_1 ovisan o jakosti te struje, o magnetskoj indukciji B u zračnom rasporu, broju zavoja svitka N , duljini svitka l i prosječnoj širini svitka h :

$$M_1 = B N l h I = G I,$$

gdje je G karakteristična konstanta za dati instrument. Ovom

Tablica 1
SIMBOLI NA MJERNIM INSTRUMENTIMA

Simbol	Naziv
—	Istosmjerna struja
— —	Izmjenična struja
— — —	Istosmjerna i izmjenična struja
~~~~~	Trofazni merni sistem s jednim strujnim i jednim naponskim krugom
~~~~~	Trofazni merni sistem s tri strujna i tri naponska kruga
★	Ispitni napon 500 V
★ 2	Ispitni napon iznad 500 V (npr. 2 kV)
└	Instrument za vertikalni položaj
└ └	Instrument za horizontalni položaj
15	Indeks (simbol) klase čije su pogreške izražene u procentima maksimalne vrijednosti (npr. 1,5)
15/	Indeks (simbol) klase čije su pogreške izražene u procentima duljine skale (npr. 1,5)
□	Instrument s pomičnim svitkom
□ X	Instrument s unakrsnim svicima
→	Instrument s pomičnim magnetom
‡	Instrument s pomičnim željezom
+	Elektrodinamički instrument
⊕ ⊕	Elektrodinamički instrument zatvoren željezom
⊗ ⊗	Kvocijentni elektrodinamički instrument zatvoren željezom
○ ⊥	Indukcioni instrument
○ ⊥	Instrument s vrućom žicom
■	Bimetalički instrument
+	Elektrostatički instrument
▼	Vibracioni instrument
▼	Izolirani termopretvarač
▼	Neizolirani termopretvarač
□ ⊥	Instrument s pomičnim svitkom i ugradenim ispravljačem
ast.	Astaticki instrument
○ ⊙	Podešavač nule
⚠	Upozorenje na posebno uputstvo

momentu suprotstavlja se protumoment M_2 spiralnih opruga ili torzionalne trake, koji je razmjeran kutu zaokreta a pomičnog organa i direkcionoj konstanti D opruge:

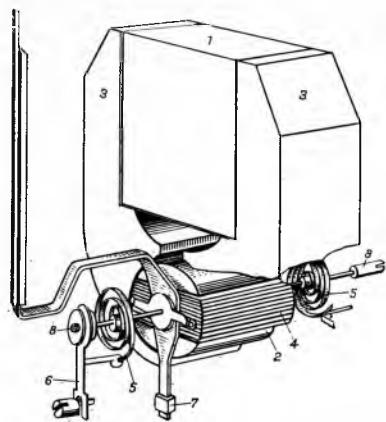
$$M_2 = D a.$$

U položaju ravnoteže, kada su oboje momenta jednaka, vrijedi:

$$I = \frac{D a}{B N l h} = C_1 a; a = \frac{I}{C_1}.$$

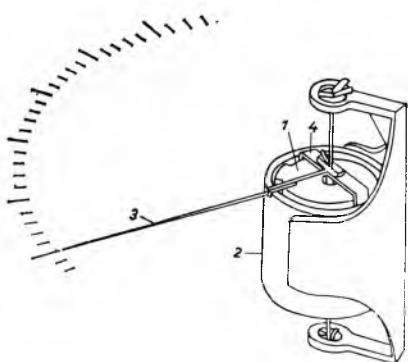
Dakle, kut zaokreta a pomičnog organa instrumenta razmjeran je jakosti struje I , s faktorom proporcionalnosti $1/C_1$, čija se recipročna vrijednost C_1 naziva stručna konstanta. Skala ovog instrumenta je linearна. Osim u izvedbi prikazanoj na sl. 9, iz-

raduju se instrumenti i s magnetom drugog oblika. Često se izrađuju instrumenti s jezgrastim magnetom oko kojeg se okreće



Sl. 9. Instrument s pomičnim svitkom. 1 Permanentni magnet, 2 jezgra od mekog željeza, 3 polni nastavci, 4 pomični svitak, 5 spiralna pera (ujedno i dovod struje do pomičnog svitka), 6 polužica za naravnavanje nultog položaja, 7 utezi za uravnovešenje pomičnog organa s kazaljkom, 8 ležajevi osovine

svitak, a s vanjskim prstenom od mekog željeza (sl. 10). Prigušenje instrumenta s pomičnim svitkom je elektromagnetsko, a postiže se okvirom od aluminija na kojem je namotan svitak.



Sl. 10. Instrument s pomičnim svitkom i jezgrastim magnetom. 1 Jezgrasti magnet, 2 prsten od mekog željeza, 3 kazaljka, 4 pomični svitak

Instrumenti s pomičnim svitkom odlikuju se malom vlastitom potrošnjom električne energije i velikom osjetljivošću a mogu se izraditi s granicama pogreške $\pm 0,1\%$. Oni služe samo za mjerjenje istosmjerne struje.

Proširenje mjernog opsega. Puni otklon kazaljke instrumenta s pomičnim svitkom postiže se pri jakosti struje koja rijetko

prelazi nekoliko desetaka miliampera. U praksi je, međutim, potrebno mjeriti mnogo veće struje i napone. Proširenje opsega za mjerjenje struje postiže se paralelno spojenim otpornicima (šantovima). Zbog velikog temperaturnog koeficijenta bakrene žice namota ($4 \cdot 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$) paralelni se otpornik za proširenje mjernog opsega struje (šant) ne priključuje paralelno svitku već paralelno kombinaciji svitka i kompenzacijonog otpornika R_k (sl. 11). Kompenzacijoni otpornici i šant se prave od materijala čiji je otpor praktički neovisan o temperaturi. Ako se želi mjerni opseg za struju proširiti od I_V na I , otpor šanta treba da iznosi:

$$R_s = \frac{I_V R_V}{I - I_V},$$

gdje je R_V otpor svitka i kompenzacijonog otpora. U praksi se mnogo upotrebljavaju ampermetri s više mjernih opsega koji se obično odabiru jednopolnom preklopkom. Tada se primjenjuje višestruki šant (sl. 11). Žele li se pomoći instrumenta otpora R_V i mjernog opsega I_V postići mjerni opsezi I_0 , I_1 i I_2 , može se za preklopku u položaju 0 napisati:

$$R = \frac{I_V R_V}{I_0 - I_V},$$

gdje je $R = R_1 + R_2 + R_s$. Kada je preklopka u položaju 1, spojen je u seriju s instrumentom otpor R_1 , a njima paralelno serijska kombinacija otpora $R = R_1 + R_2 + R_3$:

$$(I_1 - I_V)(R - R_1) = I_V(R_V + R_1),$$

$$R_2 + R_3 = \frac{I_V(R + R_V)}{I_1}.$$

Uvođenjem oznaka: $I_0 = n_0 I_V$; $I_1 = n_1 I_0$ i $I_2 = n_2 I_0$ dobiva se:

$$R_1 = R \left(1 - \frac{1}{n_1}\right); \quad R_2 = R \left(\frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2}\right); \quad R_3 = \frac{R}{n_2}.$$

Proširenje mjernog opsega za napone postiže se otpornicima koji se spajaju u seriji s instrumentom (predotpornicima). Otpor predotpornika R_p koji treba dodati u seriju određuje se iz izraza:

$$R_p = \frac{R_V}{U_V} (U - U_V),$$

gdje je R_V otpor instrumenta, U_V pad napona na instrumentu, a U mjereni napon. Omjer R_V/U_V naziva se karakteristični otpor voltmetera. On se kreće npr. od $100 \Omega/\text{V}$ do $100\ 000 \Omega/\text{V}$.

Višestruki instrumenti s pomičnim svitkom imaju više strujnih i naponskih opsega. S jednog mjernog opsega na drugi prelazi se s pomoći jedne ili dvije jednopolne preklopke, a kod nekih izvedbi i uticanjem vodiča ili čepova u odgovarajuća glijezda.

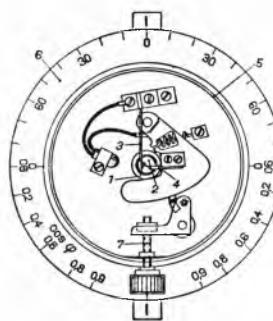
Mjerjenje izmjenične struje s pomoći instrumentata sa pomičnim svitkom moguće je upotrebom dodatnog ispravljača. Za ovu se svrhu u mjerenoj tehnici najviše upotrebljavaju poluvodički ispravljači od bakar(I)-oksida (kuproks) i germanijum-diode. Karakteristika ispravljača je takva da u propusnom smjeru imaju mali otpor, a u nepropusnom smjeru relativno veliki otpor. Otpor poluvodičkih ispravljača ne ovisi samo o smjeru struje nego i o njezinu veličini i o temperaturi okoline. Ako se na serijski spoj pomičnog svitka i ispravljača priključi dovoljno velik izmjenični napon, bit će otklon kazaljke instrumenta proporcionalan aritmetičkoj srednjoj vrijednosti priključenog izmjeničnog napona. Kako je u praksi interesantna efektivna vrijednost izmjenične veličine, skala instrumenta baždari se u efektivnim vrijednostima za sinusni oblik napona i struje. Pri mjerjenju nesinusnih veličina takav instrument pokazivat će više ili manje, ovisno o faktoru oblika mjerene veličine. Radi dobivanja veće osjetljivosti obično se vrši punovalno ispravljanje pomoći dva ili četiri ispravljačka elementa. Veliki temperaturni koeficijent ispravljača kompenzira se dodavanjem odgovarajućeg otpora tako da je ukupni otpor kombinacije neovisan o temperaturi.

Univerzalni instrument je instrument s pomičnim svitkom i ispravljačem sa više strujnih i naponskih mjernih opsega za istosmjerni i izmjenični napon i struju. Takvim se instrumentima mogu mjeriti struje od nekoliko miliampera do najčešće 6 A i naponi od $\sim 1,2 \text{ V}$ do nekoliko stotina volta. Tačnost mjerjenja

Sl. 11. Višestruki šant. R_1 , R_2 i R_3 otpori višestrukog šanta, R_V otpor pomičnog svitka i kompenzacijonog otpora, R_k kompenzacijoni otpor

naponu i struje (frekvencije i do 20 kHz) većinom zadovoljava klasu 1,5.

Instrumenti s pomičnim svitkom i mehaničkim ispravljačem (vektormetri) imaju umjesto poluvodičkog ispravljača mehanički ispravljač koji se odlikuje praktički beskonačnim otporom u nepropusnom smjeru, a vrlo malim otporom u propusnom smjeru, što omogućava mjerjenje vrlo malih izmjeničnih napona i struja. Postoje dvije izvedbe mehaničkog ispravljača: ispravljači s mehaničkim upravljanjem kontakta i ispravljači s elektromagnetskim upravljanjem kontakta. U *ispravljačima s mehaničkim upravljanjem kontakta*, kontakt se otvara i zatvara ekscentričnim izdanom na vratilo dvopolog sinhronog motora koji je priključen na istu mrežu kao i mjerena veličina (sl. 12). Izdanak u ritmu frekvencije mreže odvaja kontaktno pero od mirujućeg kontakta. Otvaranje i



Uvede li se bezdimenzionalna veličina nazvana stepenom prigušenja $s = \frac{P}{2\sqrt{D}J}$, bit će: $T = \frac{T_0}{\sqrt{1-s^2}}$, $\delta = \frac{2\pi s}{T_0}$ i $\omega = \frac{2\pi\sqrt{1-s^2}}{T_0}$.

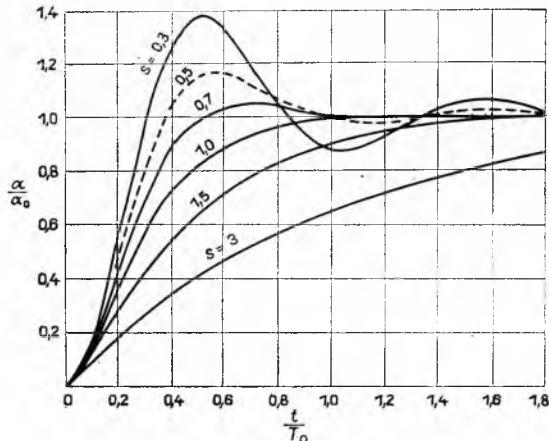
Iz toga slijedi da će gibanje biti titrajno prigušeno kada je $s < 1$. Granično aperiodsko gibanje nastupa kada je $s = 1$, tj. $\omega = 0$, pa se dobije:

$$\alpha(t) = a_0 \left[1 - (1 + \omega_0 t) e^{-\delta t} \right] = a_0 \left[1 - \left(1 + \frac{2\pi t}{T_0} \right) e^{-2\pi t/T_0} \right].$$

Aperiodsko gibanje se dobiva kada je $s > 1$, odn. kada su korjeni karakteristične jednadžbe realni:

$$\alpha(t) = a_0 \left[1 - e^{-\delta t} \frac{\omega_0}{\beta} \operatorname{sh} \left(\beta t + \operatorname{arth} \frac{\beta}{\delta} \right) \right].$$

Na sl. 15 prikazana su gibanja pomičnog organa nakon uključivanja konstantne mjerene veličine uz stepen prigušenja $s > 0$. Za mjerne instrumente odabira se



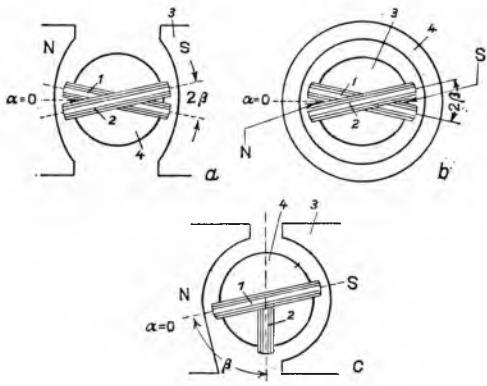
Sl. 15. Gibanje pomičnog organa instrumenta nakon uključivanja konstantne mjerene veličine

stepen prigušenja između 0,8 i 1. Kriterij je za odabiranje stepena prigušenja kod mernih instrumenata očitanje sa što većom tačnošću u što kraćem vremenu od momenta uključivanja mjerene veličine.

Sve što je rečeno u opisu instrumenta s pomičnim svitkom u pogledu proširenja mernog opsega i prigušenja važi uglavnom i za druge vrste mernih instrumenata.

Ostale vrste mernih instrumenata

Instrumenti s unakrsnim svicima (kvocijentni magneto-električni instrumenti). Dva svitka zaokrenuta jedan prema drugom za kut 2β i čvrsto povezana nalaze se u zračnom rasporu između srednje valjkaste jezgre i polova ili polnih nastavaka permanentnog magneta (sl. 16 a). Za razliku od instrumenata s



Sl. 16. Različite izvedbe instrumenta s unakrsnim svicima.
a Izvedba s rasporom nejednake širine, b s jezgrastim magnetom, c s nesimetričnom izvedbom svitka; 1 i 2 svici, 3 magnet, 4 jezgra (ili prsten) od mekog željeza, α kut zaokreta, 2β kut između svitaka

pomičnim svitkom, ovi instrumenti imaju raspor koji nije svagdje jednak širine, tako da gustoća magnetskog toka duž raspora nije jednolika. Zbog toga moment koji djeluje na svitke nije

funkcija samo struja I_1 i I_2 kroz svitke, nego i položaja svitaka:

$$M_1 = k_1 I_1 f_1(a), \quad M_2 = k_2 I_2 f_2(a),$$

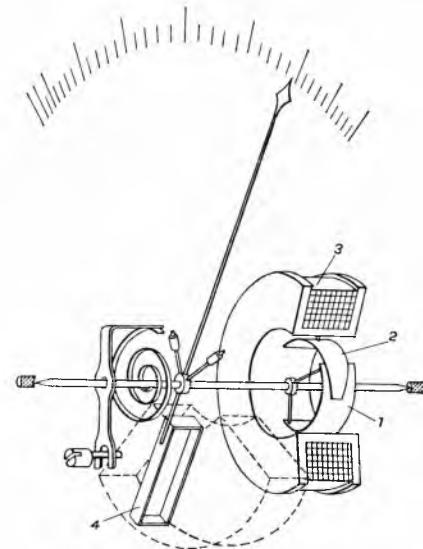
gdje su k_1 i k_2 koeficijenti koji ovise o izvedbi svitaka. Smjerovi struja I_1 i I_2 odabrani su tako da se momentu M_1 jednog svitka suprotstavlja moment M_2 drugog svitka. Zato ovaj instrument nema spiralnih opruga za stvaranje protumomenta. Pomični organ zauzet će položaj u kojem su oba momenta jednaka, pa je otklon ovisan o omjeru (kvocijentu) struja I_1 i I_2 :

$$a = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right).$$

Osim izvedbom prikazanom na sl. 16 može se nejednolika raspodjela gustoće toka duž zračnog raspora postići i drugim izvedbama, npr. jezgrastim magnetom (sl. 16 b) ili nesimetričnom izvedbom svitaka (sl. 16 c).

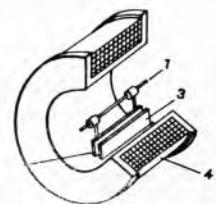
Instrumenti s unakrsnim svicima upotrebljavaju se za merenje omjera dviju struja, dvaju napona, napona i struje (tj. otpora) i ostalih veličina koje se mogu na ove svesti. Naročito se upotrebljavaju za daljinsko merenje temperature pomoću otpornih pretvarača.

Instrumenti s pomičnim željezom. Protjecanjem struje kroz svitak stvara se magnetsko polje koje uzrokuje zaokretanje pomičnog organa od mekog željeza. Promatranjući energiju sadržanu u magnetskom polju svitka i rad koji se vrši zaokretanjem pomičnog organa može se dokazati da je moment proporcionalan kvadratu struje kroz svitak. Zbog toga je skala kvadratna. Oblikovanjem pomičnog željeza i drugim zahvatima mogu se postići različiti karakteri skale. Za protumoment služi spiralna opruga ili torziona traka, a prigušenje je većinom zračno. Ovi su instrumenti konstruk-



Sl. 17. Instrument s pomičnim željezom i okruglim svitkom. 1 Pomični željezni listić, 2 nepomični željezni listić, 3 svitak, 4 lopatica za zračno prigušenje

tivno vrlo jednostavni, robustni i jeftini, pa se stoga često primjenjuju. Postoji više izvedbi instrumenta s pomičnim željezom. Izvedba prikazana na sl. 17 ima dva kružno savinuta listića od mekog željeza; jedan od njih je pričvršćen na tijelo svitka, a drugi na osovinu koja se može okretati. Struja koja teče kroz svitak magnetizira listiće istoimeni, tj. na isti polaritet, pa se oni međusobno odbijaju. Pogodnim oblikom listića može se postići više ili manje linearna skala. U izvedbi prikazanoj na sl. 18 listići su smješteni radikalno. Zaokretni moment uslijed odbijanja listića pada približno s kvadratom njihove udaljenosti. Time se kompenzira porast momenta s kvadratom mjerene struje i skala je skoro posve linearne. Instrumentom s pomičnim

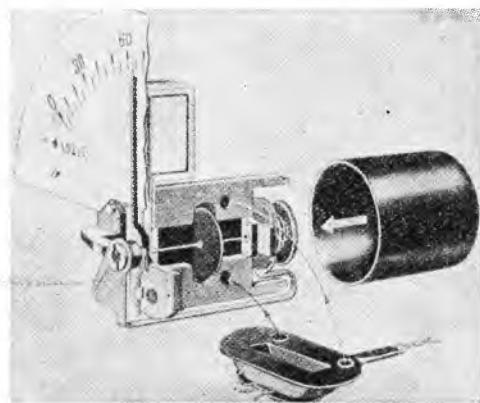


Sl. 18. Instrument s pomičnim željezom i lineariziranim skalom. 1 Osovina, 2 pomični listić, 3 nepomični listić, 4 svitak

željezom mogu se mjeriti kako izmjenične veličine od 15 herca do više stotina herca tako i istosmrne veličine.

Kad se mjere izmjenične veličine, instrument pokazuje efektivnu vrijednost. Suvremenim izvedbama postižu se granice pogrešaka koje zadovljavaju klasu 0,1. Budući da nemaju pokretnih dijelova kroz koje protjeće struja, preopterljivost je ograničena samo mehaničkom čvrstoćom pokretnih dijelova i zagrijavanjem svitka. Jednostavnim zahvatima može se postići kratkotrajno preopterećenje čak stostrukom nazivnom strujom. Vlastita potrošnja ovih instrumenata je razmjerno velika i iznosi 0,2 do više VA. Proširenje mjernog opsega ampermetara postiže se odvojcima na svitku, a napredni opseg proširuje se predotporima.

Instrumenti s pomičnim magnetom temelje se na pojavi da se magnetska igla postavlja u smjer magnetskih silnica. Oni se sastoje od male okretljive magnetizirane okrugle pločice (sl. 19) ili igle i svitka kroz koji protjeće mjerena struja, čije polje otklanja iglu. Protumoment stvara spiralna opruga, magnetsko polje posebnog nepomičnog permanentnog magneta ili magnetsko polje posebnog svitka. Pomični magnet postavlja se u smjer rezultante polja mernog svitka i permanentnog magneta ili drugog svitka. Potrošak ovih instrumenata iznosi nekoliko desetaka milijata, a izrađuju se u klasi 0,2 do 2,5. Zbog osjetljivosti prema stranim magnetskim poljima takvi instrumenti moraju se dobro oklopiti. Robustne su izvedbe i relativno malih dimenzija, pa se primjenjuju u vozilima i drugim uređajima izloženim trešnji. Ovi instrumenti služe obično za mjerjenje struje.



Sl. 19. Instrument s pomičnim magnetom

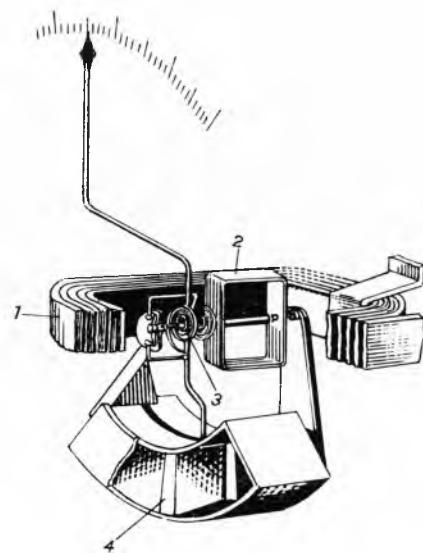
Kvocijentni instrumenti s pomičnim magnetom imaju dva svitka koji stoje jedan prema drugome pod kutom od 90° , a nemaju permanentni magnet za protumoment. Magnetska polja obaju svitaka djeluju na pomični magnet. Otklon pomičnog magneta ovisi o omjeru struja kroz svitke. Ovi instrumenti se primjenjuju u vozilima i avionima kao pokazivači položaja, pritiska i temperature primjenom odgovarajućih pretvarača.

Elektrodinamički instrumenti. U magnetskom polju nastalom protjecanjem struje I_1 kroz nepomični svitak nalazi se pomični svitak kroz koji teče struja I_2 (sl. 20). Moment koji djeluje na pomični svitak ovisi o dimenzijama obaju svitaka, broju zavoja, efektivnim vrijednostima struja kroz njih i kosinusu faznog pomaka φ između struja:

$$M_1 = k_1 I_1 I_2 \cos \varphi.$$

Ovom momentu suprotstavlja se moment spiralnih opruga, koje ujedno služe za dovod struje pomičnom svitku. Prigušenje je zračno ili elektromagnetsko. Elektrodinamički instrumenti upotrebljavaju se kao ampermetri, voltmetri i (najčešće) kao vatmetri. U ampermetrima i voltmetrima oba su svitka serijski spojena (sl. 21 a i b). U spoju kao ampermetar kroz oba svitka teče struja trošila, pa je moment M_1 , a time i otklon pomičnog svitka, određen kvadratom mjerene struje. Prilikom mjerjenja napona oba svitka su spojena u seriju s otpornikom R i priključena na napon U. Ako se s R_V označi ukupni otpor voltmetra (suma otpora svitaka i otpora predotpornika), kroz svitke teće struja $I_V = U/R_V$. Moment M_1 i otklon ovisni su o kvadratu struje, odnosno kvadratu

napona. Skala je u oba slučaja kvadratna a mjere se efektivne vrijednosti izmjeničnih veličina. Spoje li se svici prema sl. 21 c, kroz nepomični svitak od malo zavoja debele žice teče struja I trošila. Kroz serijski spoj pomičnog svitka s mnogo zavoja tanke žice i predotpornika R teče struja proporcionalna naponu trošila.



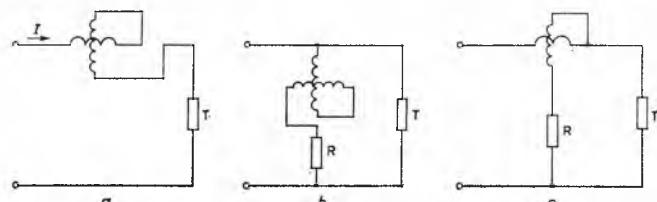
Sl. 20. Elektrodinamički instrument. 1 Nepomični svitak, 2 pomični svitak, 3 spiralna opruga, 4 lopatica za zračno prigušenje

Uz dovoljno veliki otpor R_w (ukupni otpor svitka i predotpornika) struja I_w kroz pomični svitak bit će u fazi s naponom trošila. Stoga je fazni pomak između struja I i I_w praktički jednak faznom pomaku φ između struje i napona trošila pa vrijedi:

$$M_1 = k_1 I I_w \cos \varphi = k_1 \frac{I U \cos \varphi}{R_w} = \frac{k_1}{R_w} P = k_2 P,$$

gdje su k_1 i k_2 koeficijenti zavisni od konstrukcije instrumenta, U napon mreže, a P snaga trošila.

Prema tome je otklon kazaljke proporcionalan snazi koju uzima trošilo. Skala takvog vatmetra je gotovo linearna. Zbog relativno slabih magnetskih polja koja stvara nepomični svitak, postoji znatan utjecaj vanjskih magnetskih polja. Ti utjecaji smanjuju se astaticim izvedbama, oklopima od željeznog lima ili zatvaranjem magnetskog toka svitka kroz željezne jezgre.



Sl. 21. Spajanje svitaka elektrodinamičkog instrumenta: a za mjerjenje struje, b za mjerjenje napona, c za mjerjenje snage

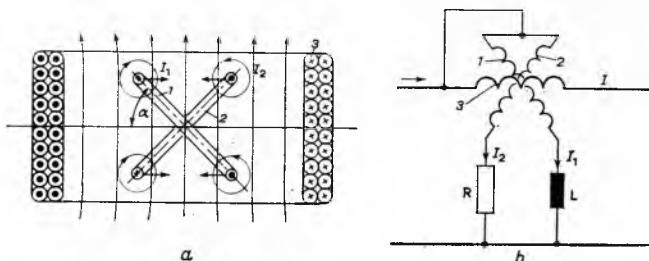
Astaticke izvedbe sastoje se od dva istovetna mjerna sistema čiji su pomični svici učvršćeni na istu osovinu. Smjerovi struja kroz njihove svitke odabrani su tako da se momenti nastali od utjecaja vanjskih homogenih magnetskih polja poništavaju.

Oklapanje se izvodi oklopima od dobro vodljivog magnetskog materijala.

Elektrodinamički sistemi zatvoreni željezom razlikuju se od sistemâ oklopljenih željezom po tome što željezo kod prvih ima aktivnu ulogu provođenja magnetskih tokova nepomičnog i pomičnog svitka.

Proširenje strujnog opsega izvodi se serijskim ili paralelnim spajanjem polusvitaka nepomičnog svitka. Prespajanje se najčešće vrši čepovima. Napredni opsezi mijenjaju se predotporima u seriji s pomičnim svitkom. Ovi instrumenti izrađuju se u svim klasama. Precizne izvedbe najčešće su sa svjetlosnim znakom.

Kvocijentni elektrodinamički instrumenti imaju dva unakrsna pomična mehanički povezana svitka i jedan nepomični svitak (sl. 22). Ako kroz nepomični svitak teče struja I a kroz jedan od pomičnih svitaka struja I_1 , djelovat će na taj svitak



Sl. 22. Kvocijentni elektrodinamički instrument. a) Osnovni raspored svitaka, b) priključak elektrodinamičkog mjerila faktora snage; 1 i 2 pomični naponski svici, 3 nepomični svitak; R djelatni i L induktivni otpornici za postizanje faznog pomaka između I_1 i I_2 .

moment ovisan o veličini tih struja, o faznom pomaku φ među njima i o kutu otklona α svitaka prema horizontalnoj osi:

$$M_1 = k_1 I_1 I_2 \sin \varphi \cos \alpha.$$

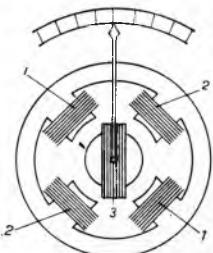
Kada su pomični svici učvršćeni jedan na drugi pod kutom od 90° i kad je struja I_2 kroz drugi pomični svitak za 90° fazno pomaknuta prema struci I_1 , djeluje na drugi svitak moment:

$$M_2 = k_2 I_1 I_2 \sin \varphi \cos \alpha.$$

Budući da nema protumomenta opruga, pomični svici zauzeti će položaj u kojem su oba momenta jednaka, tj.:

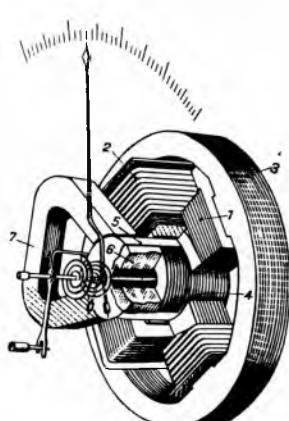
$$\tan \varphi = \frac{I_1}{I_2} \tan \alpha.$$

Priključe li se pomični svici na isti napon, bit će omjer struja I_1 i I_2 konstantan, pa je otklon kazaljke ovisan o faznom pomaku između struja I i I_1 . Zato se ovaj instrument upotrebljava kao *mjerilo faktora snage* ($\cos \varphi$ -mjerilo). Otklon kazaljke ovisan je o faznom kutu u onda kada kut između pomičnih svitaka i fazni kut između I_1 i I_2 nije 90° . Izvode se kao instrumenti zatvoreni željezom, i to u dvije izvedbe: s nepomičnim unakrsnim (naponskim) svicima ili s pomičnim. Na sl. 23 prikazan je instrument s nepomičnim naponskim svicima. Tačnost instrumenata zadovoljava klasu 1,5 do 2,5. Kvocijentni elektrodinamički instrumenti mogu se upotrebljavati kao *sinhronoskop* (instrumenti kojima se kontrolira da li su napon sinhronog generatora



Sl. 23. Kvocijentni elektrodinamički instrument zatvoren željezom s nepomičnim naponskim svicima I i 2 .

i napon one mreže na koju se sinhroni generator priključuje jednaki po frekvenciji i faznom pomaku). U tu svrhu se svitak 3 (v. sl. 22) priključi na napon generatora, a svici I i 2 na mrežu. Dok se frekvencija generatora i mreže ne izjednaće, svitak 3 i na njemu pričvršćena kazaljka okretat će se u jednom ili drugom smjeru brzinom koja je određena razlikom frekvencija. Kada se frekvencije generatora i mreže izjednače kazaljka se zaustavi u položaju koji je određen faznim pomakom između napona mreže i generatora. Ako je fazni pomak jednak nuli, kazaljka će se zaustaviti u položaju označenom crticom na skali.



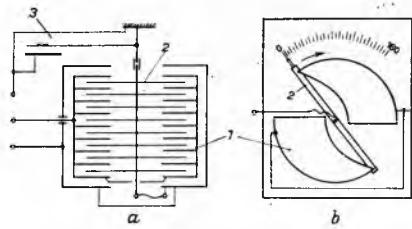
Sl. 24. Indukcioni instrument. 1 i 2 Statorski svici, 3 stator od transformatorskog lima, 4 jezgra od transformatorskog lima, 5 aluminijski bubenjić, 6 željezna jezgra, 7 permanentni magnet za prigušenje

Indukcioni instrumenti su po konstrukciji i principu rada slični asinhronim Ferrarisovim motorima (v. *Električni strojevi*). Slično kao i u tih motora rotor instrumenta je izrađen od vodljiva materijala, npr. aluminijsuma, u obliku bubenjića i okretljivo smješten u uskom rasporu između lameliranih polova statora i unutrašnje jezgre napravljene od limova (sl. 24). Na statoru nalaze se dvofazni namotni (4 svitka). Dva i dva nasuprotna statorska svitka serijski su spojena i kroz njih teku struje I_1 i I_2 koje stvaraju magnetske tokove Φ_1 i Φ_2 . Tokovi su jedan prema drugome prostorno pomaknuti za 90° . Ako su tokovi i fazno pomaknuti za kut φ , nastaje okretno magnetsko polje. Zbog okretnog polja induciraju se u rotoru naponi i pojavljuju vrtložne struje te se rotor nastoji zaokrenuti. Moment M_1 koji djeluje na rotor iznosi:

$$M_1 = k \Phi_1 \Phi_2 \sin \varphi = k_1 I_1 I_2 \sin \varphi.$$

Tome momentu suprotstavlja se moment spiralnih opruga. Ravnotežni položaj pokazuje veličinu mjerene vrijednosti. Prigušenje je elektromagnetsko, a postiže se s pomoću permanentnog magneta koji okružuje bubenjić. Indukcioni instrumenti se upotrebljavaju za mjerjenje izmjeničnih struja, naponu, djelatne i jalone snage i kao kvocijentna mjerila. Posebna izvedba indukcijskog instrumenta upotrebljava se za određivanje redoslijeda fazna trofaznog sistema.

Elektrostatički instrumenti koriste se pri radu principom privlačenja tijela koja su nabijena raznimenim nabojem, odnosno odbijanja tijela s istoimenim nabojem. Na ovom principu rade i iz elektrostatike poznati *elektroskop* i *elektrometri*. Mjerni sistem elektrostatičkih instrumenata sastoji se od dviju pločica ili dviju grupa pločica koje su jedna od druge dobro izolirane i od kojih su jedne fiksne, a druge pomične i spojene s kazaljkom. Takav instrument predstavlja kondenzator čiji su naboji razmjeri priključenom naponu, pa prema tome elektrostatički instrumenti služe samo za mjerjenje napona. Elektrostatičke sile, koje su proporcionalne kvadratu priključenog napona, uzrokuju međusobnim privlačenjem naboja pomaknute elektrode u smislu povećanja kapaciteta kondenzatora. Postoji više izvedbi elektrostatičkih instrumenata, koje se razlikuju po tome što se u jednima promjena kapaciteta postiže promjenom razmaka između elektroda, a u drugima promjenom djelujuće površine elektroda. Na sl. 25 prikazan je

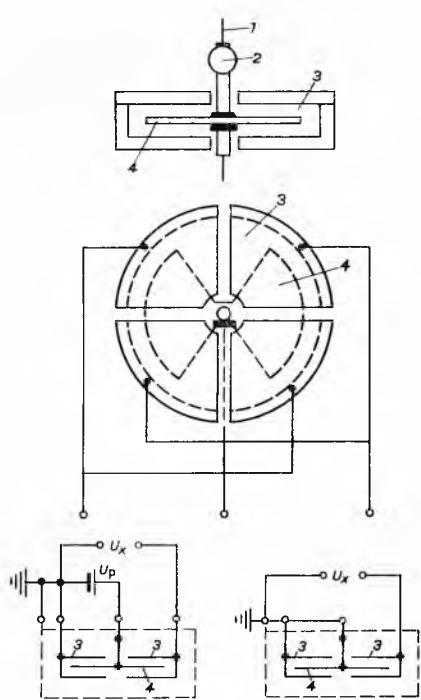


Sl. 25. Elektrostatički voltmetri. a) Multicelularni voltmetar, b) dvokomorni elektrostatički voltmetar; 1 nepomične elektrode, 2 pomične elektrode, 3 skala i kazaljka

multicelularni elektrostatički instrument, koji se sastoji od niza pomičnih i nepomičnih pločica. Pomične pločice zavješene na traci zavlače se među nepomične kada se priklječi mjereni napon. Njihovi mjeri opsezi kreću se od nekoliko desetaka volta do 1500 V. U *kvadrantnom elektrometru* (sl. 26) visi na tankoj metalnoj ili kvadrnoj niti okretljiva elektroda koja se nalazi u metalnoj posudi podijeljenoj na četiri izolirana kvadranta. Dva i dva nasuprotna kvadranta povezuju se. Shematski se zato crtaju samo dvije nepomične elektrode. Kvadrantni elektrometar može se spojiti na više načina, ovisno o visini i vrsti mjerjenog napona. U *idiostatičkom spoju* (sl. 26, dolje desno) okretljiva elektroda spojena je s jednom nepomičnom elektrodom i oklopom koji je uzemljen. Mjereni napon (istosmjerni ili izmjenični) priključuje se između nepomičnih elektroda. Kut otklona pomičnog organa proporcionalan je kvadratu priključenog napona pa je skala kvadratna. U *heterostatičkom spoju* (sl. 26, dolje lijevo) mjereni napon U_x priključen je na obje nepomične elektrode, a između pomične i uzemljene nepomične elektrode priključen je mnogostruko veći pomoći napon U_p . Ovisno o pomoćnom naponu U_p , hete-

ELEKTRIČNA MJERENJA

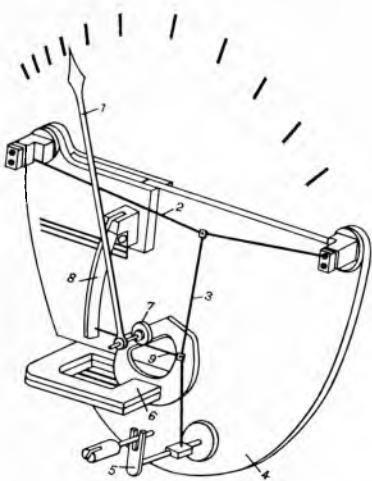
rostatičkim spojem mogu se mjeriti mnogo niži naponi nego idiosastičkim spojem. Specijalne izvedbe elektrostatičkih voltmetara upotrebljavaju se za mjerjenje visokih napona.



Sl. 26. Kvadrantni elektrometar. 1 Torsiona traka, 2 zrcalo, 3 kvadranti, 4 okretna elektroda

Elektrostatički instrumenti odlikuju se vrlo malim potroškom, neosjetljivošću prema stranim magnetskim poljima i mogućnošću mjerjenja napona frekvencije i do 10^8 Hz. Radi zaštite od vanjskih električnih polja ovi se instrumenti zatvaraju u okuće koje djeliće kao Faradayev kavez. Elektrostatički instrumenti služe za mjerjenje istosmernog i izmjeničnog napona. Zbog relativno malih elektrostatičkih sila osjetljivost im je mala (najniži merni opseg 10 V), a tako i tačnost.

Instrumenti s vrućom (zagrijanom) žicom zasnivaju se na pojavi da se metalna žica produžuje kad joj poraste temperatura.

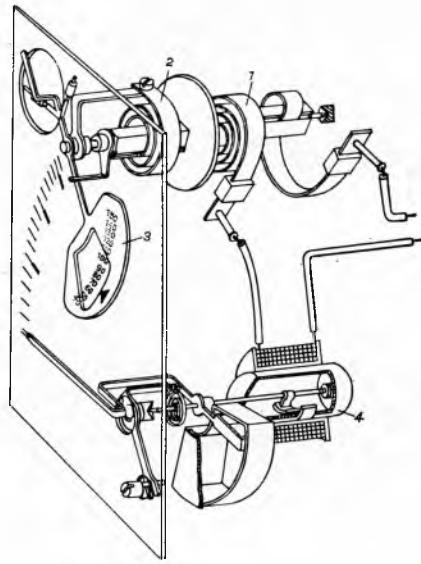


Sl. 27. Instrument s vrućom žicom. 1 Kazaljka, 2 vruća žica, 3 prtezna žica, 4 osnovna ploča, 5 korektura nule, 6 magnet za prigušenje vrtložnim strujama, 7 užiljebljeni kotačić, 8 opruga, 9 konac za pokretanje kazaljke

Mjerena struja teče kroz tanku nategnutu žicu od legure platina-srebro ili platina-iridijum i zagrijava je. Njezino se istezanje na pogodan način prenosi na kazaljku (sl. 27). Kako je zagrijavanje a prema tome i rastezanje žice ovisno o kvadratu struje, to je i skala

tih instrumenata (koji služe kao ampermetri a rjeđe kao voltmetri) kvadratna. Ovim instrumentima mogu se mjeriti istosmjerne i efektivne vrijednosti izmjenične struje do frekvencije 10^5 Hz. Tačnost i preopteretljivost tih instrumenata je mala. Danas su ih u jastostrujoj mjerenoj tehnici zamjenili instrumenti s pomičnim željezom, a u visokofrekventnoj mjerenoj tehnici instrumenti s termopretvaračem ili kristalnom diodom.

Bimetalični instrumenti su u pogledu konstrukcije vrlo jednostavni. Oni imaju spiralu od bimetalala (dviju traka metaala različitih temperaturnih koeficijenata toplinskog istezanja, koje su jedna uz drugu valjanjem čvrsto priljubljene), koja je spirala na jednom kraju čvrsto upeta, a drugi je kraj pričvršćen na osovinu s kazaljkom (sl. 28). Kroz spiralu ili kroz namot od otporne žice koji je tjesno namotan oko spirale teče mjerena struja. Uslijed zagrijavanja spirale, ona se više ili manje zaokreće i otklanja kazaljku. Zagrijavanje bimetalala proporcionalno je kvadratu mjerene struje, pa ovi instrumenti mjeru efektivnu vrijednost struje i imaju kvadratnu skalu. Utjecaj temperature okoline kompenzira se spiralom namotanom u suprotnom smjeru. Bimetalični instrumenti razlikuju se od ostalih vrsta instrumenata time što treba dugo vrijeme dok im kazaljka zauzme konačni položaj (vrijeme namještanja). Ovisno o konstrukciji vrijeme namještanja iznosi 8 do 15 minuta. Bimetalični instrument z bog

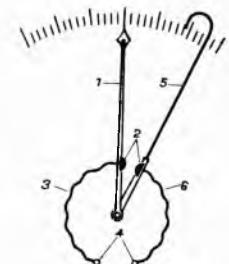


Sl. 28. Bimetalični instrument sa dodatnim instrumentom s pomičnim željezom. 1 Mjerna bimetala traka, 2 kompenzaciona bimetala traka, 3 kazaljka bimetalačnog instrumenta, 4 instrument s pomičnim željezom

toga daje sliku stvarnog termičkog opterećenja vodova i uređaja. Bimetalični instrumenti često su opremljeni i kazaljkom maksimalnog otklona koju merna kazaljka potiskuje ispred sebe i ostavlja je u položaju najvećeg otklona. Osim toga u kućištu s bimetaličnim instrumentom ugrađuje se vrlo često i instrument s pomičnim željezom koji pokazuje efektivnu vrijednost i nije tako trom.

Kontaktni instrumenti služe za uključivanje signalnih i regulacionih strujnih krugova čim mjerena veličina postigne unaprijed postavljenu vrijednost. Oni se prema izvedbi uklonljnih naprava dijele na instrumente s neposrednim uklapanjem i instrumente s posrednim uklapanjem.

Instrumenti s neposrednim uklapanjem (sl. 29) imaju osim kazaljke mernog sistema još jednu ili dvije kazaljke koje se mogu po volji pomicati i postavljati u željeni položaj. Kazaljke imaju kontakte od plemenitog metala koji su s pomoću traka spojeni na priključne stezaljke. Kad se kazaljka sistema otkloni toliko da



Sl. 29. Instrument s neposrednim uklapanjem kontakta. 1 Kazaljka mernog sistema, 2 kontakti, 3 i 4 dovod i odvod struje kontaktima, 4 priključne stezaljke, 5 kontaktka kazaljka

se kontakti dodirnu, zatvara se pomoći strujni krug koji je spojen na priključne stezaljke. Radi postizanja pouzdanog kontakta pomični organ treba da ima dovoljno velik zaokretni moment (npr. ~ 1 cm p), pa je potrošak takvih instrumenata nešto veći. *Instrumenti s posrednim uklapanjem kontakata* služe za uklapanje većih snaga. Postoje različite izvedbe koje se razlikuju po načinu na koji se registrira da je kazaljka zauzela unaprijed određeni položaj. Često se za registriranje položaja kazaljke upotrebljava izvedba s fotootpornikom ili s fotočelijom. Na kazaljci za namještanje nalazi se npr. fotootpornik koji osvjetljava žarulja. Kada kazaljka mjerljeg sistema postigne određenu vrijednost, ona pokrije fotootpornik. Zbog smanjenja osvjetljenja poveća se otpor fotootponika, struja u njegovom krugu se smanji i uslijed toga relej uklopi, odn. isklopi, pomoći strujni krug. Potrošak izvedbi s posrednim uklapanjem ne razlikuje se od potrošaka instrumenata normalnih izvedbi.

Galvanometri

Galvanometri su vrlo osjetljivi instrumenti koji služe za mjerjenje vrlo malih struja i napona (reda veličine 10^{-11} A, odn. 10^{-7} V). Oni se prvenstveno upotrebljavaju u laboratorijskim mjerjenjima, a naročito kao nulindikatori u mernim mostovima i kompenzatorima. Prema konstrukciji sistema oni se dijele na galvanometre s pomičnim svitkom, galvanometre s pomičnim magnetom i vibracione galvanometre. Pomični organ galvanometra obično je trakom napet ili na traci zavješen, a pokazivanje rezultata vrši se zrcalom ili svjetlosnim znakom.

Galvanometri s pomičnim svitkom konstruktivno se bitno ne razlikuju od običnih pokaznih instrumenata s pomičnim svitkom. Velika stručna osjetljivost postiže se pomičnim svitkom s velikim brojem zavoja tanke žice. Broj zavoja ograničen je zračnim rasporedom, omskim otporom i težinom svitka. Prigušenje je elektromagnetsko, ali se ne postiže s pomoći aluminijskog okvirica, kako je to uobičajeno u instrumentima s pomičnim svitkom, nego s pomoći struja koje teku kroz svitak i vanjski krug. One se javljaju uslijed napona koji se inducira u svitku prilikom njegova skretanja, a imaju tendenciju da zakoče kretanje svitka. Veličina struje u svitku, a prema tome i prigušenje, ovisi dakle o otporu svitka i vanjskog kruga na koji je galvanometar priključen. Kod nekog određenog otpora R_a vanjskog kruga pomični organ galvanometra gibanje će se aperiodički kad bude izведен iz položaja ravnoteže. Taj otpor R_a naziva se *vanjskim graničnim otporom*. Kad na stezaljke galvanometra nije priključen vanjski krug, odn. kad je on otvoren, pomični organ izveden iz položaja ravnoteže gibanje će se prigušeno oscilatorno s titravnim vremenom od nekoliko sekundi. Zbog toga se prilikom transporta moraju stezaljke galvanometra kratko spojiti. Time se sprečava oštećenje instrumenta, jer je zbog malog otpora prigušenje kazaljke i sistema veliko, tako da se kazaljka i pri jačim potresima jedva pomakne.

Balistički galvanometar je izvedba galvanometra s pomičnim svitkom pri kojoj ovaj ima znatan moment inercije, pa mu je titrano vrijeme dugo. Upotrebljava se za mjerjenje količine naboja. Prostruji li kroz balistički galvanometar naboј Q u vremenu t_0 vrlo malom prema titravnom vremenu T_0 neprigušenog galvanometra ($8\text{--}30$ s), pomični organ galvanometra ne dospije da se pomakne za vrijeme prolaska kratkotrajne struje, ali se zbog mehaničkog impulsa uzrokovano strujnim udarom pomični organ otkloni ovisno

o veličini impulsa. Mehanički impuls $\int_0^{t_0} M_1 dt$ može se odrediti, ako se zna da je moment $M = G i$:

$$\int_0^{t_0} M_1 dt = G \int_0^{t_0} i dt = G Q,$$

gdje je G konstanta određena dimenzijama i brojem zavoja pomičnog svitka, kao i indukcijom u zračnom rasporu (vidi str. 592). Gibanje pomičnog organa može se odrediti pomoći diferencijalne jednadžbe:

$$J \frac{d^2 a(t)}{dt^2} + P \frac{da(t)}{dt} + D a(t) = 0.$$

Desna strana jednadžbe jednaka je nuli jer kroz pomični organ tokom njegova gibanja ne teče struja iz vanjskog izvora. Rješenjem

diferencijalne jednadžbe, npr. uz upotrebu jednostrane Laplaceove transformacije, s pretpostavkom da je $a(0) = 0$ i početna brzina $\dot{a}(0) = G Q/J$, dobije se:

$$a(t) = \frac{G Q}{2 J \beta} e^{-\delta t} (e^{\beta t} - e^{-\beta t}).$$

Oznake odgovaraju onima koje su spomenute u odsjeku Dinamika pomičnog organa (v. str. 594). Uz $\beta = j \omega_0$, odnosno kod stepena prigušenja, $s=0$, što se praktički ne može postići, dobilo bi se titrano neprigušeno gibanje s titravnim vremenom

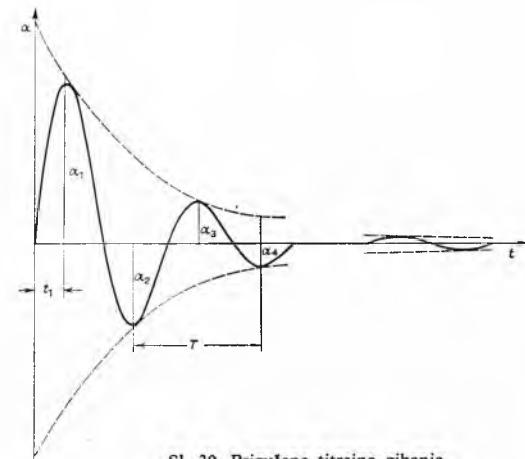
$$T_0 = \frac{2 \pi}{\omega_0} = 2 \pi \sqrt{\frac{J}{D}}.$$

Ako je $G = D/C_1$ (C_1 je faktor proporcionalnosti nazvan strujnom konstantom), bit će:

$$a(t) = \frac{2 \pi Q}{C_1 T_0} \sin \omega_0 t.$$

Prvi maksimalni otklon a_1 pomičnog organa nastupio bi nakon vremena $t_1 = T_0/4$ i ovisio bi o količini elektriciteta Q :

$$a_1 = 2 \pi Q / C_1 T_0.$$



Sl. 30. Prigušeno titrano gibanje

Dakle količina elektriciteta Q balistički mjerena mogla bi se odrediti iz prvog maksimalnog otklona:

$$Q = \frac{C_1 T_0}{2 \pi} a_1 = C_{Bp} a_1.$$

Konstanta C_{Bp} naziva se *balističkom konstantom za neprigušen galvanometar*.

Praktički je interesantno titrano prigušeno gibanje pomičnog organa galvanometra koje nastupa kada je $s < 1$:

$$a(t) = \frac{G Q}{\omega J} e^{-\delta t} \sin \omega t.$$

Najveći postignuti balistički otklon a_1 , koji nastaje zbog strujnog udara, dat je izrazom:

$$a_1 = \frac{2 \pi Q}{C_1 T_0} \exp\left(-\frac{\delta}{\omega} \arctan \frac{\omega}{\delta}\right).$$

Iz balističkog otklona a_1 može se odrediti količina elektriciteta Q na osnovu relacije $Q = C_{Bp} a_1$. Konstanta C_{Bp} , zvana *balistička konstanta prigušenog galvanometra*, iznosi:

$$C_{Bp} = \frac{C_1 T_0}{2 \pi} \exp\left(\frac{\delta}{\omega} \arctan \frac{\omega}{\delta}\right) = \frac{C_1 T_0}{2 \pi} \exp\left(\frac{\Lambda}{2 \pi} \arctan \frac{2 \pi}{\Lambda}\right),$$

gdje je $\Lambda = \delta T$ *logaritamski dekrement prigušenja*. Logaritamski dekrement prigušenja je prirodnji logaritam omjera k između dviju uzastopnih amplituda istog predznaka (sl. 30):

$$k = \frac{a_1}{a_3} = \frac{a_3}{a_5} = \dots,$$

te se može eksperimentalno odrediti. Titrajno vrijeme T_0 neprigušenog galvanometra može se odrediti mjerom vremena T između svakog drugog prolaska kazaljke galvanometra kroz nulu i logaritamskog dekrementa prigušenja:

$$T_0 = \frac{T}{\sqrt{1 + \frac{A^2}{4\pi^2}}}.$$

Granično aperiodsko gibanje nastupa kada je $\beta = 0$, odn. $s = 1$.

Otklon pomičnog organa definiran je jednadžbom: $a(t) = \frac{G Q}{J} e^{-\delta t}$.

U tom slučaju je $A = \infty$, pa se iz balističke konstante prigušenog galvanometra dobije *balistička konstanta* C_B graničnog aperiodskog gibanja:

$$C_B = \frac{C_i T_0}{2\pi} e.$$

Uz veće prigušenje, tj. uz $s > 1$, pomični organ galvanometra giba se aperiodski, a otklon je definiran izrazom:

$$a(t) = \frac{G Q}{J \beta} e^{-\delta t} \sin \beta t.$$

Fluksmetar je galvanometar sa zanemarljivom direkcionom silom i ekstremno velikim elektromagnetskim prigušenjem uslijed vrlo malog otpora njegovog pomičnog svitka i vanjskog kruga. Uz $D = 0$ iz diferencijalne jednadžbe gibanja dobije se:

$$a(t) = \frac{G Q}{P} (1 - e^{-2\delta t}).$$

Kako je δ vrlo veliko, može se zanemariti eksponencijalni član. Budući da instrument nema direkcione sile, njegov pomični organ može zauzeti na početku mjerena bilo koji položaj. Označi li se početni položaj sa a_1 , a otklon na kraju mjerena sa a_2 , bit će:

$$a_2 - a_1 = \frac{G Q}{P}.$$

Uz zanemareno mehaničko prigušenje i ako elektromagnetsko prigušenje uz ukupni otpor galvanometarskog kruga R iznosi $P_e = G^2/R$, dobije se: $G(a_2 - a_1) = R Q$.

Kako je $R Q = R \int i dt = f e dt$, znači da fluksmetar mjeri naponske udare. Iz izraza za inducirani napon $e = N \frac{d\Phi}{dt}$ slijedi:

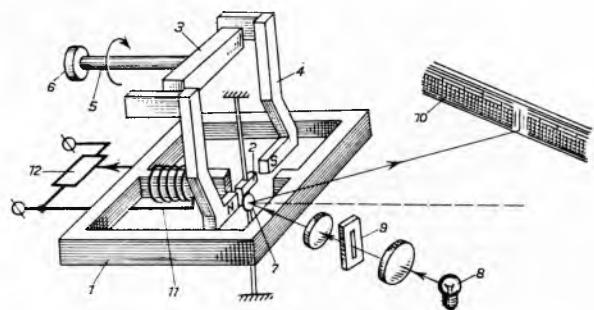
$$G(a_2 - a_1) = N(\Phi_2 - \Phi_1),$$

gdje je N broj zavoja svitka koji se priključuje na stezaljke fluksmeta i Φ_1 i Φ_2 početni i konačni tok kroz taj svitak prilikom mjerena toka. Fluksmetar se vrlo mnogo upotrebljava za precizna magnetska mjerena i potisnuo je u tim mjerjenima balistički galvanometar, koji se prije u tu svrhu mnogo upotrebljavao.

Galvanometri s pomičnim magnetom služe za mjerene vrlo malih napona i struja. Pomični organ sastoji se od jednog ili više permanentnih magneta obješenih o kvarcnu nit. Oni se zaokreću pod djelovanjem magnetskog polja što ga stvaraju jedan ili dva svitka kroz koja protjeće mjerena struja. Zbog zaštite od vanjskih polja ti galvanometri oklapaju se višestrukim oklopom od materijala dobrih magnetskih svojstava. Odlikuju se velikom naponskom osjetljivošću (nekoliko hiljada mm/m po mikrovoltu).

Vibracioni galvanometar je instrument čiji pomični organ titra frekvencijom mjerene izmjenične struje; služi kao vrlo osjetljiv i selektivan nulindikator (pokazivač da je jačina struje jednaka nuli) u mostovima i kompenzatorima izmjenične struje koji rade pri frekvencijama od 15 do 3000 Hz. Postoje dvije izvedbe vibracionih galvanometara: vibracioni galvanometar s iglom i vibracioni galvanometar sa svitkom ili petljom.

Vibracioni galvanometar s iglom (sl. 31) sastoji se od pomičnog magneta vrlo malih dimenzija koji je napet trakom i može se zaokretati između polnih nastavaka permanentnog magneta i elektromagneta. Kad izmjenična struja protjeće kroz svitak elektromagneta, stvara se izmjenično magnetsko polje okomito na polje permanentnog magneta. Izmjenično magnetsko polje izaziva titranje pomičnog magneta a time i zrcala koje reflektira zraku svjetlosti na skalu, pa se na skali dobije svjetla pruga. Širina svjetle pruge ovisi o



Sl. 31. Vibracioni galvanometar s iglom. 1 Elektromagnet, 2 pomični magnet, 3 permanentni magnet, 4 polni nastavci permanentnog magneta, 5 osovina, 6 ručica za pomicanje permanentnog magneta, 7 zrcalo, 8 sijalica, 9 dijafagma, 10 skala galvanometra, 11 svitak elektromagneta, 12 regulacija struje svitka

jakosti i frekvenciji struje koja teče kroz svitak 11. Što je frekvencija struje bliža rezonantnoj frekvenciji magneta to je uz istu

struju svjetla pruga šira. Rezonantna frekvencija pomičnog magneta ovisi o jačini polja magneta 3. Pomicanjem ručice 6 može se zaokretati permanentni magnet 3 i time mijenjati rezonantna frekvencija magneta 2. Osjetljivost vibracionih galvanometara najčešće se definira tako da se navede širina svjetle pruge u milimetrima uz ukupnu dužinu svjetlosne zrake od 1 m i struju od 1 μ A, odn. napon od 1 μ V. Kod 50 Hz osjetljivost iznosi 100 do 700 mm/ μ Am i od 0,5 do 3,5 mm/ μ Vm.

Vibracioni galvanometar s petljom, koji se danas rjeđe upotrebljava, djeluje na principu instrumenta s pomičnim svitkom. Kroz petlju koja se nalazi između polova permanentnog magneta teče mjerena struja. Uslijed zaokretanja petlje zaokreće se i malo zrcalo zaliđeno na njoj, te se na skali vidi svjetla pruga (sl. 32). Zatezanjem petlje oprugom ili pomicanjem oslonaca mijenja se njezina rezonantna frekvencija.

Sl. 32. Sistem vibracionog galvanometra s petljom. 1 i 2 priključne stezaljke, 3 i 4 tanka nit ili traka, 5 spojnica, 6 i 7 oslonci, 8 opruga, 9 zrcalo

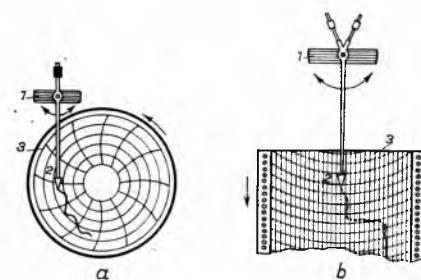
(sl. 32). Zatezanjem petlje oprugom ili pomicanjem oslonaca mijenja se njezina rezonantna frekvencija.

ELEKTRIČNI MJERNI UREĐAJI

Uredaji za registriranje vremenski promjenljivih veličina

Pored instrumenata za neposredno očitavanje mjereneh veličina često se upotrebljavaju instrumenti i uređaji za registriranje sporo ili brzo promjenljivih veličina. U tu svrhu služe registracioni ili zapisni instrumenti, oscilografi i osciloskopi. Registracioni instrumenti registriraju vremenski sporo promjenljive veličine, a oscilografi i osciloskopi služe za registriranje i promatanje vremenski vrlo brzo promjenljivih pojava.

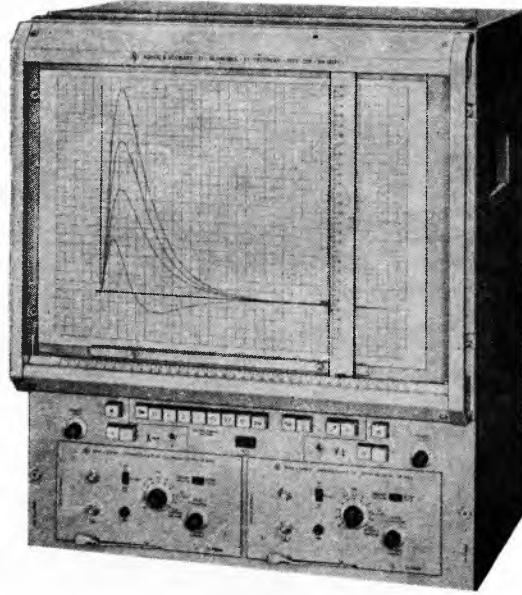
Registracioni ili zapisni instrumenti sastoje se od jednog ili više mjernih sistema i mehanizama za registriranje. Mjerni sistemi su u principu slični kao u mjernih instrumenata. Prema načinu registriranja registracioni se instrumenti dijele na registracione instrumente s neprekinitutim crtanjem i registracione instrumente s tačkastim crtanjem.



Sl. 33. Princip rada registracionog instrumenta s papirom a kružnog i b trakastog oblika. 1 Pomični svitak, 2 pisaljka, 3 papir za registriranje

U instrumentima s neprekinitim crtanjem pisalo je u neprestanom dodiru s papirom. Zbog trenja pisala o papir potrebno je da mjerni sistem ima i do 20 puta veći zaokretni moment nego instrument s kazaljkom. Papir ima najčešće oblik trake perforirane na jednom ili oba ruba ili je kružnog oblika (sl. 33). Traku jednolično pomicaju zupčasti kotačić tjeran satnim mehanizmom ili sinchronim motorom, zahvaćajući zupcima rupice perforacije. Pisalo koje se nalazi na vrhu kazaljke mjernog sistema registracionog instrumenta s neprekinitim crtanjem može pisati pomoću tinte, elektrokemijskim djelovanjem na posebno preparirani papir, skidanjem tankog sloja čade ili voska, tankim mlazom tinte bez dodira s papirom ili spaljivanjem naparenog metalnog sloja električnim iskrama.

Registracioni instrumenti s tačkastim crtanjem imaju osjetljivije mjerne sisteme. Kazaljku koja se giba slobodno iznad trake papira pritišće jedan stremen u jednakim vremenskim razmacima na papir. Između papira i kazaljke nalaze se bojom natopljene vrpce. Kazaljka prilikom svakog spuštanja stremena ostavlja tačkasti trag čiji položaj odgovara vrijednosti mjerene veličine u tom momentu. Takav instrument može jednim mjernim sistemom registrirati više mjerne veličine na istu traku papira. To se postiže s pomoću preklopke koju zaokreće satni mehanizam i u određenim vremenskim razmacima ukapča mjerni sistem u različne mjerne krugove.



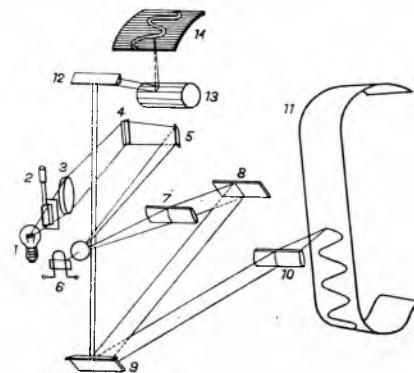
Sl. 34. Koordinatni pisač

Istodobno mehanizam postavlja između papira i kazaljke vrpcu druge boje za svaku mjerenu veličinu. Na taj način dobije se 3, 6, 12 ili više raznobojnih tačkastih krivulja. Brzina kretanja papira ovisi o brzini promjene mjerene veličine, a može iznositi od 5 do 36 000 mm/h.

Koordinatni pisači crtaju u kartezijskom koordinatnom sistemu graf ovisnosti jedne mjerene veličine o drugoj. Sastoje se od dva samopodesiva kompenzatora (v. str. 606), od kojih jedan izaziva pomake pisala u smjeru osi X, a drugi u smjeru osi Y. Pored izvedbi s nepomičnim papirom i pisalom koje se može gibati u dva među sobom okomita smjera (sl. 34) proizvode se koordinatni pisači u kojima se papir giba u smjeru osi Y, a pisalo u smjeru osi X. To se postiže npr. pričvršćenjem na bubanj koji se može zaokrenuti za izvjestan kut. Pomoću atenuatora uključenih u krugove samopodesivih kompenzatora može se dobivati dijagram u željenom mjerilu.

Svetlosni oscilograf ima mjerne sistem koji se sastoji od uske žičane petlje napete između polova permanentnog magneta (sl. 35). Kada kroz petlju teče struja, nastaju sile koje nastoje petlju postaviti u položaj okomit

na magnetske silnice. Kako je masa petlje i na njoj pričvršćenog zrcala neznatna, ona će slijediti praktički bez tromosti promjene momentane vrijednosti struje. Gibanje zrcala prenosi se prikladnim optičkim sistemom (sl. 36) na foto-papir i na mutno staklo. Zraka svjetlosti koncentrirana kondenzorom prolazi



Sl. 36. Svetlosni oscilograf. 1 Izvor svjetlosti, 2 dijafraagma s promjenjivim otvorom, 3 kondenzor-leća, 4 i 5 zrcala, 6 petlja sa zrcalom, 7 leća, 8 zrcalo, 9 prizma, 10 leća, 11 fotoosjetljivi papir ili film, 12 prizma, 13 poligonalno zrcalo, 14 mutno staklo

kroz usku pukotinu i pada na zrcalo. Nakon reflektiranja zraka svjetlosti se pomoću leće koncentriira u oštru svjetlu mrlju koja pada na fotoosjetljiv papir ili film. Papir ili film giba se određenom brzinom u smjeru okomitom na kretanje svjetle mrlje. Da bi se mjerena pojавa mogla i direktno promatrati, jedan dio reflektirane zrake odvaja se i nakon odbijanja od rotirajućeg poligonalnog zrcala pada na mutno staklo.

Rješenjem diferencijalne jednadžbe gibanja dobije se izraz za kut zaokreta petlje α kada kroz nju teče struja $I_m \sin \omega t$:

$$\alpha(t) = \frac{GI_m}{\sqrt{(D^2 - J\omega^2)^2 - (\omega P)^2}} \sin \left(\omega t - \arctan \frac{\omega P}{D - \omega^2 J} \right),$$

gdje je G konstanta odredena dimenzijsama petlje odn. svitka i indukcijom u zračnom rasporu, D direkciona konstanta, P konstanta prigušenja, J moment tromosti pomicnog organa. Iz jednadžbe slijedi da je otklon α funkcija mjerene struje i frekvencije i da postoji fazni pomak između struje i zaokreta petlje. Definira li se stepen prigušenja jednadžbom:

$$s = \frac{P}{2\sqrt{D}J}$$

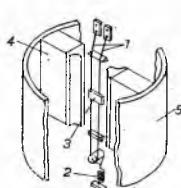
i označi se sa v omjer mjerene frekvencije ω i rezonantne frekvencije petlje $\omega_0 = \sqrt{D/J}$, izraz za maksimalnu amplitudu glasi:

$$a_m = \frac{GI_m}{D\sqrt{(1-v^2)^2 + (2sv)^2}}.$$

Kod istosmjerne struje ili kod vrlo niskih frekvencija maksimalni otklon bit će:

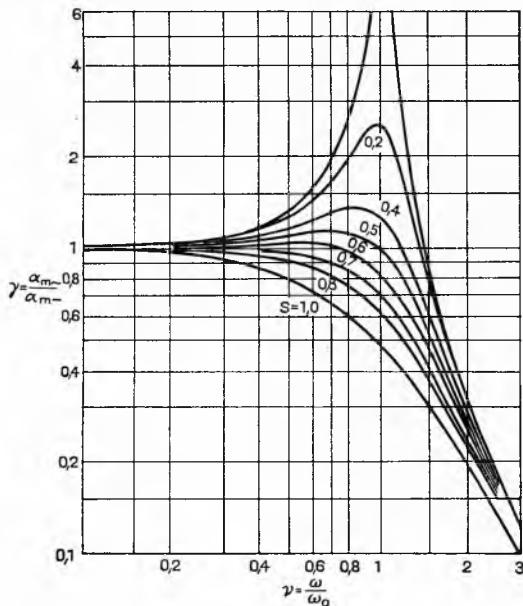
$$a_m = \frac{GI_m}{D}.$$

Iz izraza za a proizlazi da je otklon petlje ovisan o stepenu prigušenja i o omjeru između frekvencije mjerene pojave i rezonantne frekvencije petlje. Označi li se sa γ odnos između a_m kod izmjenične i istosmjerne struje te se taj odnos grafički prikaže kao funkcija od v uzimajući za parametar stepen prigušenja ($s = 0,1\dots 1$), dobije se amplitudna karakteristika mjernega sistema (sl. 37). Pri faktoru prigušenja 0,7 moguće je snimanje pojava sve do frekvencije koja iznosi $0,4 \omega_0$ praktički bez pogreške. Zato se mjerni sistem prigušuje npr. s pomoću ulja, a rezonantna frekvencija petlje uzima se najmanje dva puta veća od frekvencije najviših primjetnih harmoničkih članova mjerene pojave. Osim petlji, naročito za snimanje pojava niskih frekvencija, upotrebljavaju se uski svici namotani žicom debljine desetak mikrometara (mikrona). Osjetljivost tih sistema je mnogostruko veća od petljastih, a dimenzije mnogo manje. Kućišta suvremenih sistema sa svitkom imaju promjer ~ 4 mm i duljinu ~ 70 mm. Magnetsko polje za skupinu od 6 ili 12



Sl. 35. Mjerni sistem svjetlosnog oscilografa. 1 Žičana petlja, 2 zatezna opruga, 3 zrcalo, 4 polovi permanentnih magneta, 5 prsten od feromagnetskog materijala

svitaka dobiva se iz specijalnih permanentnih magneta. Za snimanje momentanih vrijednosti snage služe petlje koje umjesto permanentnog magneta imaju elektromagnet. Zaokret petlje bit će proporcionalan struji kroz elektromagnet i naponu na petlji.



Sl. 37. Amplitudna karakteristika mjernog sistema svjetlosnog oscilografa

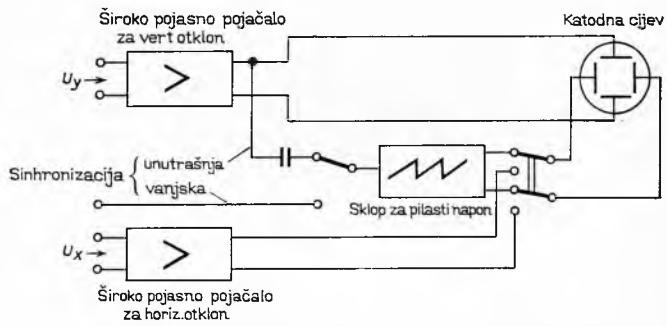
Svetlosni oscilografi se primjenjuju za snimanje pojava koje se odigravaju u području frekvencija do 10 000 Hz. Oni imaju redovito više mjernih sistema i osim toga posebni sistem s preciznim oscilatorom koji crta uz rub oscilograma, ili preko cijele njegove širine, oznake vremena. Širina papira ili filma može biti od 60 do 200 mm, a brzina se može regulirati od nekoliko centimetara do više metara na sekundu. Izrađuju se oscilografi sa 2, 4, 6, 8, 12 ili više sistema s ugradenim predotporima i šantovima koji omogućuju mjerjenje struja do nekoliko ampera i naponu do više stotina volti.

Katodni osciloskop ili kraće *osciloskop* je elektronička pokazna naprava koja služi za promatranje i ev. snimanje oblika vremenski promjenljivih električnih naponova i struja kao što su npr. izmjenične struje različnih frekvencija i impulsi različnih oblika i trajanja. U osciloskopima to se postiže djelovanjem mjerene pojave na snop elektrona koji udara na fosforecentni zastor katodne cijevi. Katodna cijev (sl. 38) je visoko evakuiran stakleni balon posebnog oblika u kojem se nalazi niz elektroda. Indirektno grijana katoda

elektrone. Oblikom i potencijalom anoda formira se elektrostatičko polje koje djeluje kao elektronska leća čiji je fokus na zastoru cijevi. Otklanjanje snopa elektrona postiže se pomoću dva para paralelnih pločica; jedan je par postavljen okomito prema drugom. Otklon snopa proporcionalan je duljini l pločica i naponu U na pločicama, a obrnuto proporcionalan anodnom naponu U_a i razmaku d između pločica. Relativna staticka osjetljivost S definirana je omjerom između otklona y svjetle mrlje i naponu U koji je taj otklon izazvao:

$$S = \frac{y}{U} = \frac{l L}{2 U_a d}.$$

L je razmak između centra pločica i zastora. Osim električnim poljem, snop elektrona može se otklanjati i magnetskim poljem, ali taj način otklanjanja rijetko se primjenjuje u mjernej tehnici. Nakon prolaza između pločica snop elektrona udara u zastor premazan fosforecentnim materijalom. Kinetička energija elektrona ovdje se pretvara u svjetlost čija boja ovisi o kemijskom sastavu premaza zastora. Mjesto u koje udari snop svjetli još neko vrijeme nakon udara, tj. ima svojstvo perzistencije. Ovisno o pojavi koja će se promatrati, biraju se katodne cijevi s kraćom ili duljom perzistencijom. Ako npr. treba promatrati neperiodske pojave, upotrebljavaju se katodne cijevi s dugom perzistencijom, dugom i više sekunda. Specijalne katodne cijevi imaju poseban sklop elektroda za uskladištenje (pamćenje) podataka, tako da se na zastoru može promatrati pojava i više desetaka minuta nakon njezinog završetka. Svjetlina mrlje funkcija je količine i brzine elektrona. Uz veći anodni napon elektroni postižu veću brzinu, ali veći anodni napon također smanjuje osjetljivost. Dovoljno svjetla mrlja uz nesmanjenu osjetljivost postiže se ubrzavanjem elektrona pomoću anode za naknadno ubrzanje, koja je u obliku vodljivog sloja nanesena na konični dio cijevi. Pozitivni potencijal anode za naknadno ubrzanje iznosi i do 20 kV. Napon koji se želi promatrati dovodi se na onaj par pločica koji snop elektrona otklanja vertikalno. U tom slučaju na zastoru se vidi vertikalna crta. Da

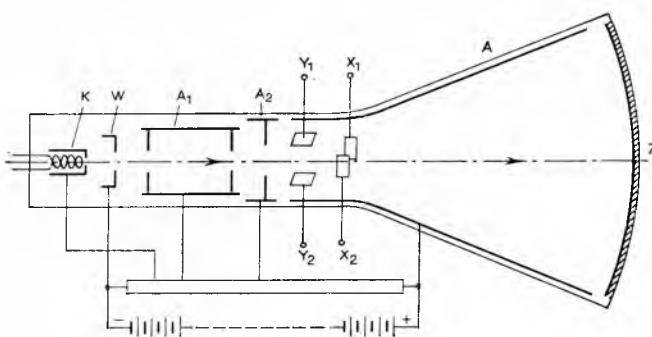


Sl. 39. Blok-sHEMA jednostavnog katodnog osciloskopa

bi se mogla promatrati mjerena pojave kao funkcija vremena, na drugi par pločica, onaj koji otklanja snop elektrona horizontalno, dovodi se napon koji linearno raste i nakon nekog vremena naglo spadne na početnu vrijednost. Zbog oblika njegovog grafičkog prikaza u ovisnosti o vremenu, taj napon se naziva pilastim, a dobiva se iz posebnih sklopova u osciloskopu i služi kao vremenska baza (sl. 39). Da bi se na zastoru dobila mirna slika, mora se mjereni napon sinhronizirati s pilastim naponom pomoću posebnog sklopa. Izravna osjetljivost katodne cijevi iznosi nekoliko desetinki milimetra po voltu. Da bi se mogli mjeriti manji naponi, treba ih prethodno pojačati u širokopojasnim pojačalima za vertikalni i horizontalni otklon.

Katodnim osciloskopom mogu se prikazati i međusobni odnosi dviju električnih veličina, npr. dvaju naponu, fazni pomak ili odnos frekvencija. U tom se slučaju jedna veličina priključi na vertikalni sistem a druga na horizontalni sistem. Kao rezultat dobivaju se odredene figure čije značenje treba poznavati, npr. Lissajousove figure (v. Akustika i ovaj članak, str. 626).

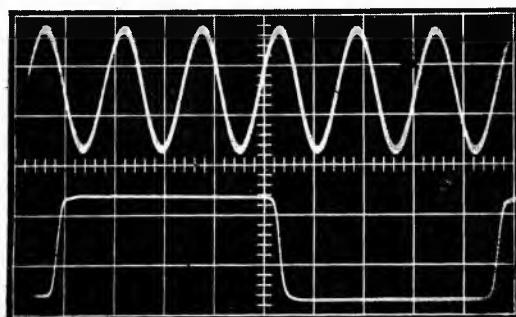
Osim katodne cijevi s jednim snopom izrađuju se cijevi i sa dva snopa kojima se može odvojeno upravljati, što omogućuje istodobno promatranje dviju pojava (sl. 40). Promatranje dviju ili četiri pojava pomoću jedne katodne cijevi omogućuje i upo-



Sl. 38. Katodna cijev. K indirektno grijana katoda, W Wehneltov cilindar, A_1 i A_2 anode, X_1 i X_2 pločice za horizontalni otklon, Y_1 i Y_2 pločice za vertikalni otklon, A anoda za naknadno ubrzanje, Z zastor

daje snop elektrona koji se pod utjecajem elektrode zvane Wehneltov cilindar skupljaju oko osi z cijevi. Promjenom potencijala te elektrode može se djelovati na broj elektrona u snopu i s time na intenzitet svjetle mrlje na zastoru. Anode A_1 i A_2 , koje se nalaze na pozitivnom potencijalu od nekoliko stotina volta, ubrzavaju

treba elektroničke preklopke. Ona vrlo brzo dovodi na pločice za vertikalni otklon čas jednu čas drugu pojavu. Zbog tromosti oka ne opaža se preklapanje. Osciloskopom se mogu promatrati pojave



Sl. 40. Katodna cijev osciloskopa na kojoj se vide istovremeno dvije pojave

do frekvencije od nekoliko desetaka megaherca [tzv. sempling osciloskopima mogu se promatrati pojave frekvencije nekoliko gigaherca (10^9 Hz)] i napona od nekoliko milivolti do nekoliko stotina volti. Svijetleća slika koja se vidi na zastoru može se i snimiti pogodno adaptiranim fotografskim aparatom.

Mjerni mostovi

Pored mjernih instrumenata za direktna očitanja mnogo se upotrebljavaju različiti spojevi kojima se nepoznata veličina određuje uspoređivanjem s poznatom. Da je usporedba izvršena konstatira se pomoću instrumenta-nulindikatora (galvanometra s pomičnim svitkom ili magnetom, vibracionim galvanometrom i sl.). Najpoznatiji takvi mjerni spojevi su mjerni mostovi za istosmernu i izmjeničnu struju. Mjernim mostovima se mijere otpori, induktiviteti, kapacitet i faktor odnosno kut gubitaka. Mjerni mostovi nalaze veliku primjenu i za mjerjenje nelinearnih veličina. Među najznačajnije mjerne mostove za istosmernu struju idu Wheatstoneov i Thomsonov most.

Wheatstoneov most klasična je mjerena metoda opisana još sredinom XIX st. Sastoji se od četiri otpornika R_1 , R_2 , R_3 , R_4 otpora R_1 , R_2 , R_3 i R_4 , koji tvore četiri grane mosta i spojeni

su prema sl. 41. Između tačaka A i B priključen je izvor istosmernog napona a između tačaka C i D pogodna osjetljiva mjerna naprava, tzv. nulindikator. U granama mosta teku struje $I_1 \dots I_4$, a dijagonalom $C-D$ struja I_5 . Određenom kombinacijom i izborom otpora otpornika u pojedinim granama mogu se postići jednak padovi napona na otpornicima R_1 i R_3 ($R_1 I_1 = R_3 I_3$), a isto tako i na otpornicima R_2 i R_4 ($R_2 I_2 = R_4 I_4$). Zbog toga će tačke C i D biti na istom potencijalu, pa kroz nulindikator neće teći struja ($I_5 = 0$). Uz $I_5 = 0$ bit će $I_1 = I_2$ i $I_3 = I_4$ a dijeljenjem naprijed spomenutih jednadžbi dobiva se jednadžba ravnoteže:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad \text{ili} \quad R_1 = R_2 \frac{R_3}{R_4}.$$

Ravnoteža mosta neće se izmjeniti ako se zamijene priključci izvora i nulindikatora.

Wheatstoneov most služi za mjerjenje otpora. Otpornik nepoznata otpora R_x kome treba odrediti otpor uvrištava se u jednu od grana mosta, npr. na mjesto otpornika R_1 . U tom slučaju vrijedi

$$R_x = R_2 \frac{R_3}{R_4}.$$

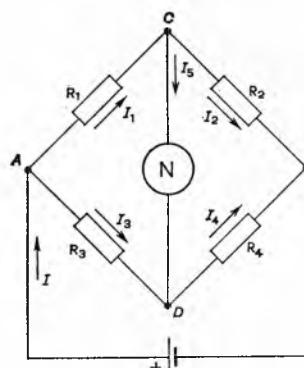
Otpor se može mjeriti na dva načina: tako da se mijenja vrijed-

nost otpora R_2 uz fiksno postavljen omjer R_3/R_4 (mostovi s otporničkim dekadama) ili tako da se uz stalni otpor R_2 mijenja omjer otpora R_3/R_4 sve dok nulindikator ne pokaže da je struja I_5 u dijagonali $C-D$ jednaka nuli (mostovi s kliznom žicom). Nakon toga se nepoznati otpor izračuna iz poznatih vrijednosti otpora R_2 , R_3 i R_4 ili se izravno očita na odgovarajućoj skali. U izvedbi s dekadnim otpornicima nalazi se u drugoj grani najčešće kutija dekadskih otpornika s mogućnošću odabiranja otpora obično od 0,1 do 11111 Ω . Omjer otpora R_3/R_4 je 0,01; 0,1; 1; 10; 100 itd. Precizni mostovi s preciznim dekadskim otpornicima imaju granice pogreške manje od 0,02%. Za pogonska mjerenja mnogo se upotrebljavaju mostovi s kliznom žicom (sl. 42). Tačnost im se kreće u granicama od 0,5 do 2,5%. Kod mostova s kliznom žicom otpor R_2 se dekadski mijenja, a omjer R_3/R_4 podešava se tako da se mijenjaju duljine a i b klizne žice pomicanjem kliznika. Takvim mostovima uobičajene izvedbe mogu se obično mjeriti otpori od 0,05 do 50 000 Ω , a napajaju se baterijom od 4,5 V.

Susreću se i mostovi kojima se mogu mjeriti mnogo veći otpori, i do nekoliko stotina kilooma ili nekoliko megoma.

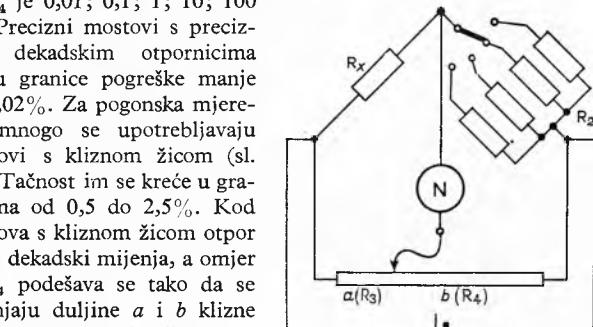
Također se izrađuju procentualni i nepotpuno uravnoteženi mostovi. Procentualni Wheatstoneovi mostovi upotrebljavaju se u masovnoj proizvodnji za kontrolu da li otpornici zadovoljavaju tražene tolerancije, koje su obično zadane u procentima nazivne vrijednosti. Nepotpuno uravnoteženi Wheatstoneovi mostovi upotrebljavaju se za brza mjerjenja. Princip rada tih mostova zasniva se na tome da pri promjeni otpora jedne grane most izlazi iz ravnoteže pa se u dijagonalni nulindikatoru pojavljuje struja ovisna o promjeni otpora te grane. Pri konstantnom naponu izvora i malim promjenama otpora, struja kroz nulindikator je proporcionalna promjeni otpora. Umjesto instrumenta s pomičnim svitkom može se u tom slučaju upotrijebiti i kvocijentni instrument. Time se postiže da je pokazivanje instrumenta neovisno o promjenama napona izvora. Takvi se mostovi primjenjuju u regulacionoj tehnici i za mjerjenje odstupanja otpora, temperature i drugih veličina ove vrste.

Thomsonov most. Prilikom mjerjenja malih otpora Wheatstoneovim mostom, na tačnost mjerjenja utječu otpori kontakata i dovoda. Zato se otpori manji od 1 Ω mjeru Thomsonovim mostom (dvostrukim mostom) čiju shemu prikazuje sl. 43. Precizni otpornici

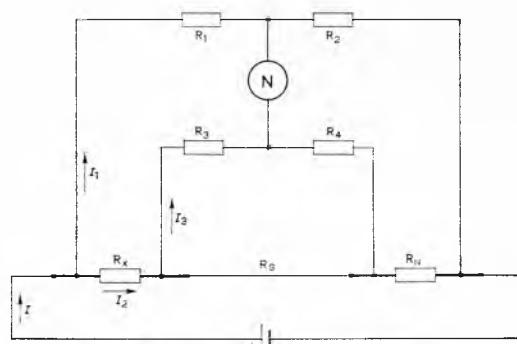


Sl. 41. Osnovni spoj Wheatstoneovog mosta

njem naprijed spomenutih jednadžbi dobiva se jednadžba ravnoteže:



Sl. 42. Wheatstoneov most s kliznom žicom



Sl. 43. Osnovni spoj Thomsonovog mosta

otpora manjeg od 10 Ω koji se primjenjuju u mjerenoj tehnici obično imaju četiri stezaljke. Vanjske stezaljke služe za spajanje otpornika u strujni krug, a na unutarnje stezaljke priključuje se mjeri krug kojim se mjeri pad na naponu. Zbog toga se vanjske stezaljke nazivaju »strujnim«, a unutarnje »naponskim«. Kod spajanja prema sl. 43 prelazni otpori strujnih stezaljki pribrajaju se otporu kruga izvora napajanja, odnosno otporu R_s , a prelazni otpori naponskih

stezaljki dovoljno velikim otporima R_1 , R_3 i R_2 , R_4 . Na taj je način zanemarljiv utjecaj otpora kontakata i priključnih vodova. Kada je pad napon na otporu R_1 jednak sumi padova napona na otporima R_x i R_s , odnosno pad napon na otporu R_2 jednak sumi padova napona na R_4 i R_N , kroz nulindikator neće teći struja, tj. most je u ravnoteži. Iz toga slijedi:

$$R_x = R_N \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_4 R_s}{R_3 + R_4 + R_s} \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right).$$

Uz zanemarljivo mali R_s (to je obično kratak komad debele žice) i uz $R_1/R_2 = R_3/R_4 = n$ dobiva se:

$$R_x = R_N \frac{R_1}{R_2} = R_N n.$$

Najčešće se susreću dvije izvedbe Thomsonova mosta. U jednoj je otpor R_N izведен u obliku klizne žice pa se može kontinuirano mijenjati, a omjer n mijenja se u dekadskim stepenima. Druga izvedba ima dekadski promjenljiv R_N , a otpornici R_1 i R_3 izvedeni su kao klizni otpornici s mehaničkim povezanim kliznicima, ili u laboratorijskoj izvedbi kao dekadski otpornici s dvostrukim preklopkama. Thomsonovim mostom mjerje se otpori od 10^{-6} do 10Ω u granicama pogrešaka od $\pm 0,01\%$.

Mjerni mostovi za izmjeničnu struju. Opća slika Wheatstoneovog mosta neće se izmijeniti ako se umjesto djelatnih otpora stave kompleksni otpori i umjesto istosmjernog izvora izmjenični izvor (sl. 44). Kao nulindikator upotrebljava se u tom slučaju vibracioni galvanometar i telefonska slušalica, indikator s magničnim okom ili s katodnom cijevi. Uvjet ravnoteže je:

$$\underline{Z}_1 \underline{Z}_4 = \underline{Z}_2 \underline{Z}_3,$$

$$\text{Ako je: } \underline{Z}_1 = R_1 + j X_1;$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 + j X_2;$$

$$\underline{Z}_3 = R_3 + j X_3 \text{ i}$$

$$\underline{Z}_4 = R_4 + j X_4,$$

dobiva se:

$$\begin{aligned} R_1 R_4 - X_1 X_4 + j(R_1 X_4 + \\ + R_4 X_1) &= R_2 R_3 - X_2 X_3 + \\ &+ j(R_2 X_3 + R_3 X_2). \end{aligned}$$

Izjednačivši realne i imaginarnе članove:

$$\begin{aligned} R_1 R_4 - X_1 X_4 &= R_2 R_3 - X_2 X_3, \\ R_1 X_4 + R_4 X_1 &= R_2 X_3 + R_3 X_2, \end{aligned}$$

Sl. 44. Osnovni spoj Wheatstoneovog mosta za izmjenične struje

opaža se da uvjet ravnoteže čine dvije jednadžbe koje treba da budu zadovoljene istovremeno. Fizikalni smisao ovih dviju jednadžbi postaje jasniji ako se impedancije izraze u obliku $Z = Z(\varphi)$, gdje φ znači fazni pomak. Tada uvjet ravnoteže prima oblik:

$$Z_1(\varphi_1) Z_4(\varphi_4) = Z_2(\varphi_2) Z_3(\varphi_3),$$

odnosno:

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3 \text{ i } \varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3.$$

Iz izvedenih uvjeta ravnoteže vidi se da je za postizanje ravnoteže potrebno uskladiti impedancije mosta po apsolutnoj vrijednosti i faznom pomaku. Dakle, potrebno je izvršiti podešavanje dviju veličina. Pri praktičnoj izvedbi mostova nastoje se grane u kojima nema elemenata za podešavanje realizirati jednostavnim elementima, otpornicima i kondenzatorima, ili rijede svicima. Uzimajući u obzir samo jednostavne kombinacije elemenata u granama mosta, uz uvjet da se most može uravnotežiti, dobiju se 24 varijante različitih izmjeničnih mostova. Među najvažnije izmjenične mostove idu: Wienov i Scheringov most za mjerjenje kapaciteta i kuta gubitka, Maxwellov i Hayov most za mjerjenje induktiviteta itd. koji su opširno obrađeni u poglavljju Električna mjerjenja električnih veličina ovog članka, str. 621 do 625. Tačnost mjerjenja izmjeničnim mostovima ovisi o tačnosti upotrijebljenih poznatih elemenata. Loša izolacija između pojedinih dijelova mosta, zatim utjecaj magnetskih polja i parazitnih kapaciteta uzrokuju dodatne pogreške. Pogodnim oklapanjima mogu se ti utjecaji smanjiti

ili posve ukloniti. Parazitski kapaciteti koji se pojavljuju između pojedinih elemenata mosta i ostalih okolnih predmeta mogu se oklapanjem pojedinog elementa ili grupe elemenata definirati i uzeti u račun.

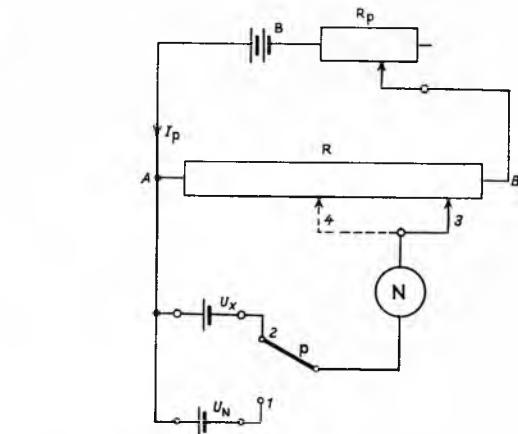
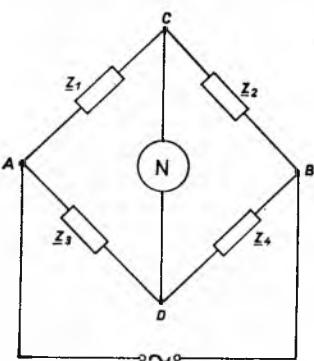
Kompenzatori

Kompenzatori su električne mjerne naprave pomoću kojih se određuje nepoznata elektromotorna sila ili nepoznati pad napon (istosmjerni ili izmjenični) usporedbom s poznatim padom napona. Usporedba se postiže tako da se oba napona spoje u opoziciju i jedan drugim kompenziraju, a poznati napon na prikidan način mijenja sve dok kroz priključeni nulindikator više ne teče struja. U tom momentu nepoznati napon jednak je poznatom, a mjereni je izvor napona neopterećen. Naponi i padovi napona mogu se kompenzatorima mjeriti čak i s tačnošću do 0,01%. Posredno, padom napona na poznatom otporu mogu se metodom kompenzacije mjeriti struje, a usporedbom padova napona koje izaziva ista struja na poznatom i nepoznatom otporu moguće je mjeriti i otpor.

Kompenzatori za istosmjernu struju služe za određivanje nepoznatog istosmjernog napona metodom kompenzacije. Dobivanje i podešavanje poznatog pada napona provodi se pomoću potenciometarskog postupka ili pomoću ampermetarskog postupka prema Lindeck-Rotheu. Prema tačnosti mjerjenja kompenzatori za istosmjernu struju dijele se na tehničke i laboratorijske ili precizne kompenzatore (Feussnerov, Rapsov, kaskadni, Diesselhorstov itd.).

Potenciometarski postupak prikazan je na sl. 45. Potenciometar (klizna žica) $A B$ priključen je preko otpora R_p na bateriju B_0 . Jakost struje I_p koja teče kroz potenciometar $A B$ mora odgovarati predviđenom iznosu i u toku mjerjenja biti stalna, jer pad napona na potenciometru $A B$ služi za uspoređivanje s nepoznatim naponom U_x . Iznos struje I_p određuje se preciznim ampermetrom ili tačnije s pomoću Westonovog etalonskog članka (v. str. 611) i nulindikatora.

Određivanje struje I_p etalonskim člankom provodi se tako da se s preklopkom p u položaju I i kliznikom potenciometra



Sl. 45. Princip istosmjernog potenciometarskog kompenzatora

u položaju 3 otpor R_p mijenja dotele dok kroz uključeni nulindikator prestane teći struja. Tada je napon etalonskog elementa upravo jednak padu napona između tačaka A i 3 potenciometra R :

$$U_N = I_p R_1, \text{ odnosno } I_p = \frac{U_N}{R_1}.$$

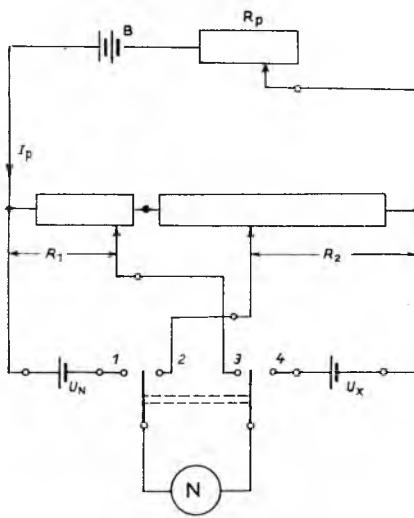
Kad se je odredila struja I_p , prebac se preklopka p u položaj 2 i pomiče kliznik potenciometra dok nulindikator ne pokaze nulu, ne mijenjajući pri tome otpor R_p . Ako sada otpor između tačaka A i 4 potenciometra iznosi R_2 , bit će nepoznati napon:

$$U_x = I_p R_2, \text{ odnosno } U_x = U_N \frac{R_2}{R_1}.$$

Iz posljednjeg se izraza vidi da nije potrebno poznavati struju I_p , ali je bitno da ona tokom mjerjenja bude konstantna. U praksi

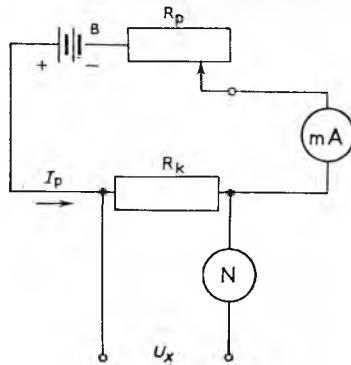
se struja I_p podeši na tačno 0,1 ili 1 mA tako da se uz $U_N = 1,01865$ V otpor R_1 podeši na 1018,65 odn. 1018,65 Ω .

Rješenjem prikazanim na sl. 45 ne može se struja I_p brzo i jednostavno kontrolirati. Stoga se otpornik R_1 za određivanje



Sl. 46. Princip istosmjernog potenciometarskog kompenzatora s posebnim mjernim otpornikom R_1 za mjerjenje i kontrolu pomoćne struje

struje I_p spaja u seriju s potenciometrom za određivanje nepoznatog napona U_x (AB u sl. 45, R_2 u sl. 46), što omogućuje brzu kontrolu struje I_p preklapanjem nulindikatora.



Sl. 47. Princip istosmjernog ampermetskog kompenzatora

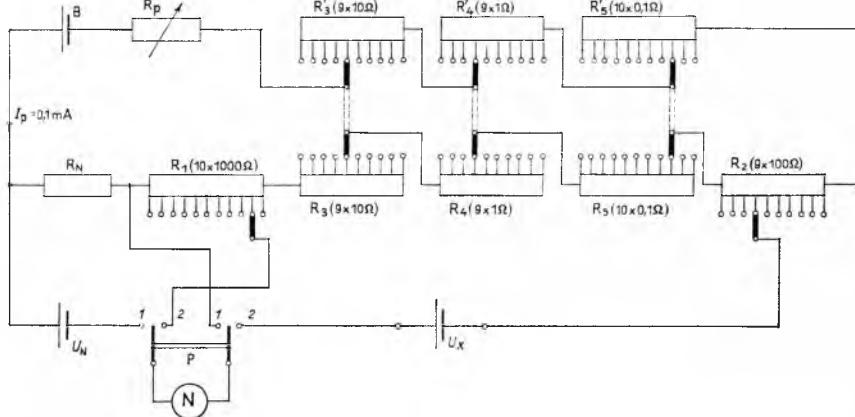
Struja I_p mjeri se miliampermetrom mA. Tačnost mjerjenja je ograničena tačnošću upotrijebljenog instrumenta. Ovaj tip kompenzatora upotrebljava se za pogonska mjerjenja malih napona s tačnošću $\sim \pm 0,5\%$ (npr. za mjerjenje napona termoelementa pri mjerjenju temperature).

Precizni kompenzatori. Vrhunske tačnosti postižu se potenciometarskim postupkom, ali se tada umjesto žičanog potenciometra ili otporne žice s kliznikom upotrebljavaju dekadski otpornici s preklopakama. Broj dekada (4...5) o kojima ovisi tačnost mjerjenja ne može se povećavati time da se jednostavno spajaju u seriju, jer bi se pomicanjem ručki preklopaka mijenjao otpor pomoćnog kruga, odnosno struja I_p . Postoji više tipova kompenzatora kod kojih je posebnim spojevima dekada postignuto da struja I_p bude konstantna.

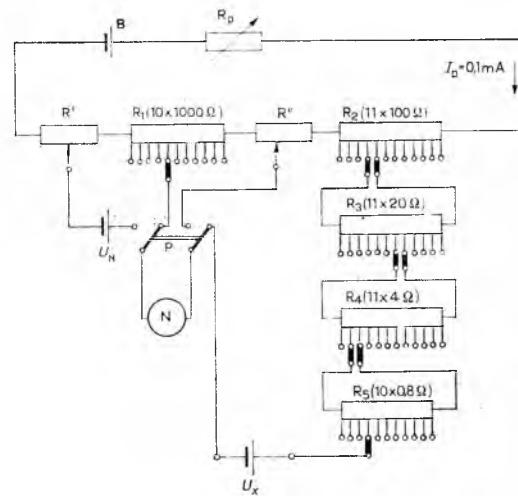
U Feussnerovu kompenzatoru (sl. 48) vrši se kompenzacija mjerjenog napona sa pet dekada (R_1 do R_5). U pomoćnom krugu se održava konstantni otpor i time konstantna struja I_p serijski dodanim dekadama (R'_1 , R'_2 i R'_5) čije su ručke mehanički povezane s ručkama dekada istih vrijednosti otpora koje služe za mjerjenje napona. Pomicanjem ručki otpor kruga se ne mijenja, jer se pri smanjenju otpora u kompenzacionom krugu za isti iznos povećava otpor u pomoćnom krugu dodanih dekada. Postupak mjerjenja je isti kao s običnim kompenzatorima.

Na kaskadnom kompenzatoru (sl. 49) moguće jeочitavati napone na pet brojčanih mesta upotrebom samo pet dekada. Dekade R_1 do R_4 imaju dvostruku preklopku s kliznim kontaktima koji su jedan od drugog izolirani i jedan s drugim mehanički povezani. Pad napona na otpornicima svake slijedeće dekade jedna je desetina pada napona prethodne (npr. 100, 10, 1, 0,1 mV).

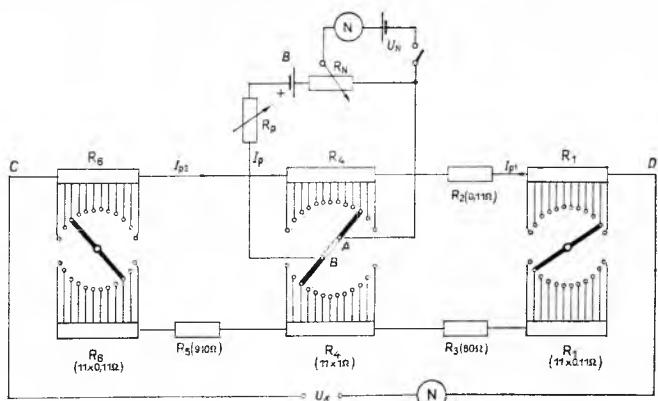
Diesselhorstov kompenzator (sl. 50) služi za mjerjenje malih napona. Posebnim spojem postignuto je da se u kompenzaciji



Sl. 48. Feussnerov kompenzator. B baterija za pomoći napon, U_N napon etalona, U_x nepoznati (mjereni) napon, R_p otpornik za podešavanje pomoćne struje, R_N precizni otpornik za određivanje pomoćne struje, R_1 do R_5 i R'_1 do R'_5 otporne dekade, P preklopka, N nulindikator



Sl. 49. Kaskadni kompenzator. B baterija za pomoći napon, U_N napon etalona, U_x nepoznati (mjereni) napon, R_p otpornik za podešavanje pomoćne struje, R'_1 i R'_2 pomoći kompenzator za određivanje pomoćne struje, R_1 do R_5 otporne dekade kompenzatora, P preklopka, N nulindikator

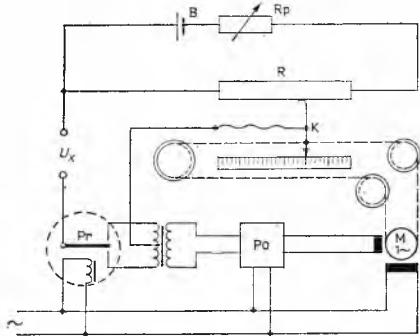


Sl. 50. Diesselhorstov kompenzator s tri dekade. B baterija za pomoći napon, N nulindikator, U_N napon etalona, U_x nepoznati (mjereni) napon, R_N otpornik za određivanje pomoćne struje, R_p otpornik za podešavanje pomoćne struje, R_1 do R_5 otpornici i otporne dekade kompenzatora

nom krugu ne nalaze kontakti preklopki, pa ne postoji utjecaj eventualnih termonaponja. Pomoćna struja I_p grana se u dvije struje I_{p_1} i I_{p_2} čija vrijednost ne ovisi o položaju ručki preklopki. Mjereni napon kompenzira se padom napona između tačaka A i C te A i D, i jednak je razlici tih naponova. Osim opisanog kompenzatora s tri dekade postoje kompenzatori istog tipa s pet dekada.

Kompenzatorima se najčešće mogu mjeriti naponi do 1,1 V. Za mjerenje viših naponova upotrebljava se pogodan djelitelj napona, te se mjerni opseg proširuje do 1100 V. Međutim, upotreboom djelitelja napona mjereni izvor nije više neopterećen kao kad se mjeri bez djelitelja.

Samopodesivi (automatski) kompenzatori mnogo se primjenjuju pri pogonskim mjerjenjima i registriranjima. Robustni su i tačni, a imaju malu potrošnju. Rade po potenciometarskom ili po ampermetarskom postupku. Uravnotežavanje se skoro redovito



Sl. 51. Samopodesivi kompenzator po potenciometarskom postupku. B baterija za pomoći napon, R_p otpornik za podešavanje pomoći struje, R kompenzacijni otpornik, U_x nepoznati (mjereni) napon, K kliznik s pisanom, Pr mehanički pretvarač, Po pojačalo, M motor

vrši upotrebotom elektroničkih sklopova. Pri **potenciometarskom postupku** (sl. 51) usporeduje se istosmjerni mjereni napon U_x s padom napona na otporniku R. Razlika između ta dva istosmjerna napona pretvara se mehaničkim pretvaračem Pr u izmjenični napon i dovodi na ulaz pojačala Po. Pojačani napon dovodi se na servomotor koji pomiče kliznik K potenciometra udesno ili ulijevo. Kad se naponi izjednače, motor se zaustavi. Na kliznik je obično montirano pišalo te se može registrirati promjena mjerene napon.

Pomoćna struja samopodesivog kompenzatora po **ampermetarskom postupku** podešava se s pomoći nulindikatora (sl. 52). Na zrcalu galvanometra G bez direkcionih sile pada zraka svjetlosti (iz izvora S) koja se reflektira na fotootpornik F. Promjenom osvjetljenja fotootpornika mijenja se njegov otpor a time i anodna struja elektronke E. U položaju ravnoteže pad napon na kompenzacijnom otporu bit će: $U_x = I_a R_k$.

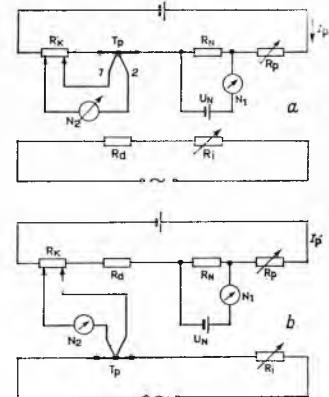
Anodna struja mjeri se miliampermeterom mA čija je skala baždarena u jedinicama mjerene napon. Red veličine naponâ koji se još mogu mjeriti ovim kompenzatorima iznosi nekoliko mikrovolta.

Kompenzatori za izmjeničnu struju. U kompenzatorima za izmjeničnu struju mjereni i kompenzacijni napon treba izjednačiti po veličini, faznom kutu i frekvenciji, a ev. i po valnom obliku. Budući da ne postoji etalonski članak za izmjenični napon, tačnost mjerena izmjeničnim kompenzatorom ovisi o tačnosti instrumenta kojim se mjeri pomoćna struja. Upotrebotom pogodnih pretvarača izmjeničnih veličina u istosmjerne mogu se izmjenične veličine mjeriti gotovo istom tačnošću kao i istosmjerne. Kao pretvarači

upotrebljavaju se termopretvarači, elektrodinamički i elektrostatički sistemi kao i otpornici s negativnim temperaturnim koeficijentom, tzv. NTC-otpornici. U pomoćnom krugu kompenzatora s termopretvaračem (sl. 53 a)

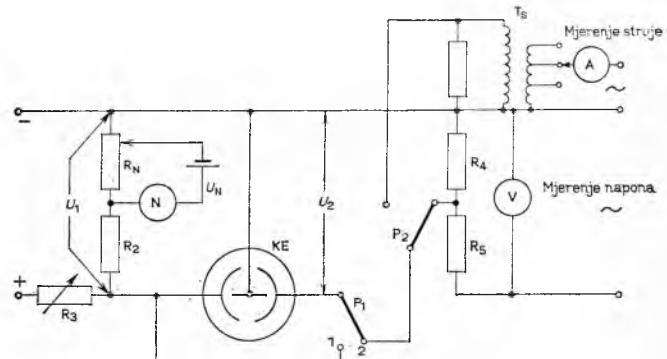
podesi se otpornikom R_p struja I_p na takvu vrijednost da se etalonskim člankom kompenzira pad napona na otporniku R_N . Struja I_p teče kroz ogrjevnu žicu termopretvarača pa se napon na njegovim stezaljkama 1 i 2 kompenzira padom napona na dijelu otpornika R_k . Nakon prebacivanja ogrjevne žice termopretvarača u krug izmjenične struje i otporniku R_d , koji ima otpor jednak otporu ogrjevne žice, u krug istosmjerne struje, neće se promijeniti struja I_p (sl. 53 b). Izmjenična se struja podešava dok nulindikator N_2 ne pokaže nulu. U tom momentu efektivna vrijednost izmjenične struje jednak je I_p . Ovim kompenzatorom mogu se mjeriti izmjenični naponi frekvencije do 10 kHz s tačnošću od $\sim 0,03\%$.

Kompenzator s kvadrantnim elektrometrom (sl. 54) koristi se frekvencijskom neovisnošću kvadrantnog elektrometra (v. str. 597) za vrlo tačnu usporedbu istosmjernih i izmjeničnih naponova. Između pomične elektrode i jedne (lijeve) nepomične elektrode elektrometra priključi se poznati istosmjerni napon U_1 , a između pomične elektrode i druge (desne) nepomične elektrode izmjenični napon U_2 koji treba izmjeriti. Ako je efektivna vrijednost



Sl. 53. Istosmjerno-izmjenični kompenzator s termopretvaračem. T_p termopretvarač, R_N otpornik za određivanje pomoći struje, R_p otpornik za podešavanje pomoći struje, R_k kompenzacijni otpornik, R_d otpornik jednakog otpora kao i ogrjevna žica termopretvarača, R_1 otpornik za podešavanje izmjenične struje, N_1 i N_2 nulindikatori

izmjeničnog napona jednaka iznosu istosmjernog napona, tj. ako je $U_2 = U_1$, otklon pomične elektrode treba da je jednak nuli, što se provjerava prebacivanjem preklopke P_1 u položaj 1. Za neku određenu vrijednost napona U_1 može se otklon pomične elektrode izbaždariti u procentima odstupanja napona U_2 od U_1 , što je vrlo pogodno prilikom baždarenja voltmetara i ampermetera. Iznos napona U_1 određuje se usporedbom pada napona na otporniku R_N s naponom U_N etalonskog elementa, a može se podešavati u uskim granicama otpornikom R_3 . Baždarenje voltmetara provodi se tako da se priključkom napona na voltmeter podesi određen otklon, a pomoću preciznog potenciometra (R_4 , R_5) taj se napon smanji na iznos U_2 . Pri tome se vrijednosti otpora R_4 i R_5 odabiru tako da je $U_2 = U_1$ ako voltmeter ispravno pokazuje. Ako voltmeter grijesi, otklon pomične elektrode pokazuje procentnu pogrešku voltmetra. Ampermetri se mogu baždariti upotrebotom strujnog transformatora T_s , koji je na sekundarnoj strani premošten otporom R_6 čija je vrijednost odabrana tako da je pad napona na njemu jednak U_1 ako ampermeter tačno pokazuje.



Sl. 54. Izmjenični kompenzator s kvadrantnim elektrometrom. R_3 i R_4 otpornici djelitelja istosmjernog napona, R_N otpornik za određivanje istosmjernog napona, U_N nulindikator, N kvadrantni elektrometar, P_1 i P_2 preklopke, R_4 i R_5 otpornici djelitelja izmjeničnog napona, V baždareni voltmeter, A baždareni ampermeter, T_s strujni transformator

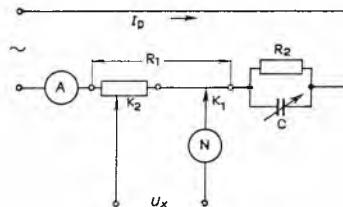
izmjeničnog napona jednak je iznosu istosmjernog napona, tj. ako je $U_2 = U_1$, otklon pomične elektrode treba da je jednak nuli, što se provjerava prebacivanjem preklopke P_1 u položaj 1. Za neku određenu vrijednost napona U_1 može se otklon pomične elektrode izbaždariti u procentima odstupanja napona U_2 od U_1 , što je vrlo pogodno prilikom baždarenja voltmetara i ampermetera. Iznos napona U_1 određuje se usporedbom pada napona na otporniku R_N s naponom U_N etalonskog elementa, a može se podešavati u uskim granicama otpornikom R_3 . Baždarenje voltmetara provodi se tako da se priključkom napona na voltmeter podesi određen otklon, a pomoću preciznog potenciometra (R_4 , R_5) taj se napon smanji na iznos U_2 . Pri tome se vrijednosti otpora R_4 i R_5 odabiru tako da je $U_2 = U_1$ ako voltmeter ispravno pokazuje. Ako voltmeter grijesi, otklon pomične elektrode pokazuje procentnu pogrešku voltmetra. Ampermetri se mogu baždariti upotrebotom strujnog transformatora T_s , koji je na sekundarnoj strani premošten otporom R_6 čija je vrijednost odabrana tako da je pad napona na njemu jednak U_1 ako ampermeter tačno pokazuje.

Kompleksni kompenzatori služe, osim za mjerjenje izmjeničnih napona, i za određivanje faznog pomaka mjerene napona.

U njima se kompenzacioni napon dobiva iz dva napona U_y i U_x koji su jedan prema drugom zaokrenuti za 90° i koji se mogu mijenjati po veličini. Tako npr. u kompenzatoru prikazanom na sl. 55 napon U_y na otporu R između kliznika K_1 i K_2 otpornika R_1 i R_2 u fazi je sa strujom I_p . Napon U_z na sekundaru transformatora međuinduktiviteta M fazno je pomaknut prema naponu U_y za 90° . U ravnoteži je:

$$U_z = I_p \sqrt{R^2 + M^2 \omega^2}; \tan \varphi = \frac{M \omega}{R}.$$

Sl. 55. Kompleksni kompenzator. A ampermetar za mjerjenje pomoćne struje, N nulindikator, M transformator promjenjiva međuinduktiviteta, R_1 potenciometar s kliznim kontaktom K_1 , R_2 klizna žica s kliznikom K_2



Sl. 56. Kompenzator za male fazne pomake. A ampermetar za mjerjenje pomoćne struje, N nulindikator, R_1 i C sklop za određivanje faznog pomaka

Za mjerjenje napona s malim faznim pomakom upotrebljava se kompenzator prikazan na sl. 56, u kojem se fazni pomak podešava kondenzatorom C , a veličina napona kliznicima K_1 i K_2 .

Električna brojila

Električna brojila su mjerni aparati koji se upotrebljavaju za mjerjenje i registriranje električne energije koju proizvoda ili distributer predaje potrošaču. Prema vrsti električne struje brojila se grade za istosmjernu i za izmjeničnu struju. Ovisno o vrsti električne energije koju registriraju, razlikuju se brojila djelatne energije, brojila jalove energije i brojila prividne energije. Sva ta električna brojila opisana su u članku *Brojila, električna* (TE 2, str. 526).

Mjerna pojačala

Zadaća je mjernih pojačala da pojačaju vrlo slabe napone i struje koje treba mjeriti i time omoguće određivanje njihove veličine pomoću mjernih instrumenata. Pojačanje se vrši elektronskim cijevima, tranzistorima ili magnetskim pojačalima, tj. svicima sa željeznom jezgrom predmagnetiziranim istosmjernom strujom. Mjerna pojačala, među ostalim, moraju se odlikovati konstantnim pojačanjem, tj. konstantnim omjerom između izlaznog i ulaznog napona u određenom opsegu frekvencija. Konstantno pojačanje postiže se upotrebom kvalitetnih sastavnih dijelova, jakom negativnom povratnom vezom (v. poglavje Pojačala u članku *Elektronika*) i stabilizacijom izvora napajanja.

Izmjenična mjerna pojačala upotrebljavaju se za pojačanje izmjeničnih napona i struja frekvencije od desetak herca do nekoliko megaherca. Osim pojasnih pojačala koja pojačavaju napone unutar određenog područja frekvencija (npr. nekoliko desetaka kHz), mnogo se upotrebljavaju i selektivna pojačala, koja se odlikuju velikim pojačanjem samo u nekom vrlo uskom frekvencijskom području.

Ulagani otpori izmjeničnih pojačala iznose obično 1 do $10 \text{ M}\Omega$ a pogreške pojačanja preciznih izvedbi na području niskih frekvencija mogu biti manje od $\pm 0,05\%$.

Istosmjerna mjerna pojačala. Pojačanje niskih istosmjernih napona i malih struja izaziva mnogo veće poteskoće nego pojačanje odgovarajućih izmjeničnih napona i struja. Najveće smetnje stvara

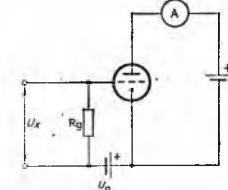
tzv. pomak (drift) nultog položaja. To se manifestira pojmom napona na izlazu pojačala, iako je ulaz pojačala kratko spojen, što uzrokuje kolebanje kazaljke priključenog instrumenta oko nule. Uzroci pojave pomaka nultog položaja (drifta nule) su promjene napona napajanja, promjene parametara ugrađenih elemenata, temperatura itd. Pomak nultog položaja može se smanjiti stabilizacijom napona napajanja, specijalnim spojevima itd.

Poteskoće zbog pomaka nultog položaja mogu se prilikom mjerjenja vrlo malih napona i struja izbjegći *pretvaranjem istosmjernih veličina u izmjenične*. Pretvaranje se provodi pretvaračima (modulatorima ili čoperima), koji mogu biti mehanički, tranzistori, s fotootporima, s dinamičkim kondenzatorom itd. Izmjenični napon dobiven od istosmjernog napona upotrebom ulaznog pretvarača pojačava se onda u izmjeničnom pojačalu i nakon pojačanja ispravlja upotrebom izlaznog pretvarača koji radi sinhrono s ulaznim. Ispravljen i filterima izglađen napon pojačana je verzija ulaznog signala.

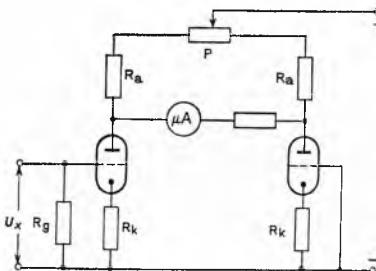
Elektronički voltmetri

Elektronički voltmetri upotrebljavaju se za mjerjenje istosmjernih, izmjeničnih i impulsnih napona. Istoču se osjetljivošću, velikom ulaznom impedancijom, širokim frekvencijskim područjem i velikim dozvoljenim preopterećenjem. Slaba strana im je mala tačnost (granice pogreške od $\pm 1,5\%$ naviše).

Istosmjerni elektronički voltmetri sastoje se od djelitelja napona, eventualno pretvarača, pojačala i indikatora (instrumenta s pomičnim svitkom). Djeliteljem napona u određenom omjeru smanjuje se ulazni napon i dovodi na pojačalo. Ako se na rešetku triode (sl. 57) doveđe nepoznati napon U_x , promijenit će se anodna struja koja se očita na indikatoru A. Zbog nelinearnosti karakteristike cijevi, skala će biti nelinearna. Odabere li se radna tačka na linearном dijelu karakteristike cijevi, teći će kroz instrument struja (struja mirovanja) i kad je $U_x = 0$. Mala promjena napona U_x prouzrokovat će malu promjenu anodne struje, koja bi se teško očitala. Struja mirovanja kompenzira se različitim sklopovima. Jednostavni sklop koji ujedno smanjuje ulazni napon pomaka je balansni sklop (sl. 58) pomoću dvije elektronike (trioide) jednakih karakteristika. Kod $U_x = 0$ pomoću potenciometra P podesi se da kroz indikator ne teče struja (električna nula). Kad se priključi napon U_x , promjeni se struja jedne cijevi pa uslijed različitih padova napona na otpornicima R_a poteče struja kroz indikator. Ulazni otpori



Sl. 57. Elektronički voltmeter



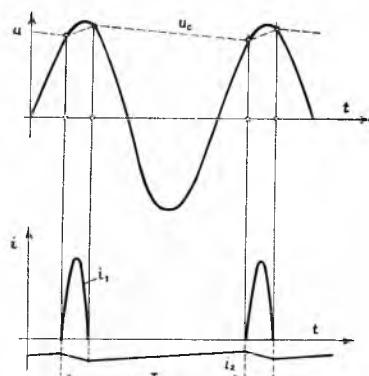
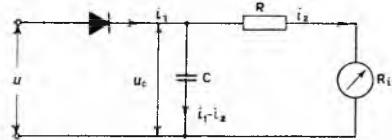
Sl. 58. Elektronički voltmeter — balansni sklop. P potenciometar, μA indikator, U_x mjereni napon

istosmjernih elektroničkih voltmetera iznose od 10^6 pa do $10^{16} \Omega$ uz upotrebu specijalnih elektrometarskih cijevi. Najniži mjerni opsezi su $10 \mu\text{V}$ do $1,5 \text{ V}$ a najviši do 1 kV .

Izmjenični elektronički voltmetri imaju ove sklopove: djelitelj napona, pojačalo, ispravljač i indikator. Ovisno o redoslijedu spajanja spomenutih sklopova dijele se na dva tipa: tip ispravljač-pojačalo-indikator i tip pojačalo-ispravljač-indikator.

Prvi tip naziva se često *diodni ili univerzalni voltmeter* jer na ulazu ima diodu (vakuumsku ili poluvodičku) kojom se ispravlja mjereni napon. Ispravljeni napon se pojačava u istosmjernom pojačalu, koje se može upotrijebiti i za direktno mjerjenje istosmjernih napona. Ispravljanje je obično vršeno, tj. napon na izlazu iz

ispravljača proporcionalan je tjemoj vrijednosti izmjeničnog napona. To se postiže sklopom prikazanim na sl. 59. Kondenzator se preko ispravljača nabije približno na tjemenu vrijednost U_m mjerene napona. Ako je otpor R velik i ako je vremenska konstanta $C R$ mnogostruko veća od trajanja jedne periode mjerene napona, neće se napon kondenzatora bitno promijeniti. Struja kroz instrument bit će približno proporcionalna tjemenu naponu. Često



Sl. 59. Voltmetar za tjemene vrijednosti. Zbog izmjeničnog napona u koji se mjeri teče kratkotrajno za vrijeme pozitivnog dijela perioda kroz ispravljač istosmerni impuls i_1 (slika dolje) koji nabija kondenzator C na napon u_c (slika u sredini). Struja i_1 kojom se kondenzator prazni preko instrumenta otpora R_i (slika gore) proporcionalna je tjemenoj vrijednosti mjerene izmjeničnog napona u

se primjenjuje i mosni spoj s dva ispravljača i dva kondenzatora, kojim se dobiva dvostruka tjemena vrijednost mjerene napona. Diodni voltmetri mnogo se upotrebljavaju za mjerjenje visokofrekventnih izmjeničnih napona. Indikator je baždaren u efektivnim vrijednostima za sinusni valni oblik. Dioda je obično ugrađena u sondu koja se prisloni na mjesto gdje se mjeri napon, što smanjuje utjecaj kapaciteta voda do kutije voltmetra.

Voltmetri tipa pojačalo-ispravljač-indikator imaju širokopojasno pojačalo kojim se pojačava izmjenični napon. Pojačani napon se ispravlja i dovodi na indikator. Indikator mjeri srednju vrijednost mjerene napona, a skala mu se baždari u efektivnim vrijednostima za sinusni napon. Izrađuju se voltmetri kod kojih indikator mjeri efektivnu vrijednost mjerene napona. U tom slučaju ispravljanje se vrši pomoću termopretvarača ili poluvodičkim diodama u posebnom spoju kojim se aproksimira kvadratna karakteristika. Najniži mjereni opseg voltmetara tipa pojačalo-ispravljač može biti ispod 1 mV a najviši do 1000 V. Njima se mogu mjeriti naponi do 10 MHz, a ulazni otpori su obično manji od $10 \text{ M}\Omega$. Pomoću posebnog postupka (sampling) koji se sastoji u tome da se dobije nisko-frekventni ekvivalent visokofrekventnog signala mogu se mjeriti naponi frekvencije reda gigaherca.

Osim elektroničkih voltmetara proizvode se i elektronički ampermetri i omometri.

Digitalni mjerni uređaji

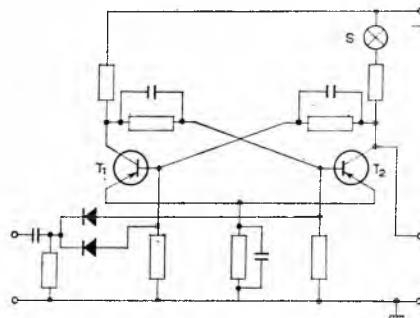
Digitalnim se nazivaju mjerni uređaji pomoću kojih se mjerena veličina automatski pretvara u diskretan oblik, a rezultat mjerjenja se izravno prikazuje u brojčanom obliku, npr. osvijetljenim znamenkama, što je pogodno za očitanje i daljnju obradu. Dosad opisani (analogni) uređaji i instrumenti pokazuju vrijednost mjerene veličine pomoću kazaljke koja zauzima određen položaj u odnosu na skalu. Kazaljka može u pokaznom opsegu zauzeti bilo koji položaj, tj. mjereni rezultat može poprimiti beskonačni broj vrijednosti. Mjerni rezultat dobiven digitalnim mjernim uređajem, naprotiv, može poprimiti samo diskrette vrijednosti, čiji broj ovisi o broju upotrijebljenih dekada. Pri tome je najmanji korak jednak desetom dijelu posljednje dekade. Tačnost analognih uređaja ograničena je subjektivnim pogreškama očitanja, dok je tačnost digitalnih uređaja ovisna o njihovoj izvedbi.

U digitalnoj se tehnici kao najprikladniji sistem brojanja upotrebljava binarni sistem, koji za bazu ima broj 2. U tom se

sistemu svaki broj može prikazati u jednom od postojećih kodova svega dvama znacima: 0 i 1 (v. *Digitalna računala*, str. 324), a mjeri rezultati registrirati, pamtit i prenosi pomoću elemenata koji mogu zauzeti samo dva stanja (isključeno-uključeno, nemagnetizirano-magnetizirano itd.) koja odgovaraju znamenkama 0 i 1. Binarni je sistem vrlo prikladan pri mjerjenju i registriranju mjerih rezultata, ali on nije prikladan za vizuelno prikazivanje brojčane vrijednosti rezultata mjerjenja jer se čovječje mišljenje prilagodilo dekadskom sistemu. Stoga se u svakom takvom instrumentu rezultati pretvaraju u dekadski oblik.

Elektronički brojači su naprave za brojanje električnih impulsa. Oni se sastoje od sklopova za brojanje i sklopova za prikazivanje. Kao elektronički sklopovi za brojanje primjenjuju se danas u brojačima grupe bistabilnih multivibratora (v. *Impulsna tehnika*) i različne vrste brojačkih elektronki. Brojači se izrađuju bilo kao samostalni mjeri uredaji ili se ugradjuju kao sastavni dio u druge elektroničke mjerne naprave, npr. digitalne voltmetre, digitalna mjerila frekvencije itd. Brojanje impulsa vrši se bilo po nekom kodu ili dekadno.

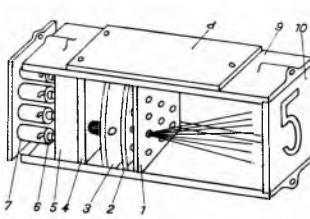
Brojači s multivibratorima sastoje se od niza *okidnih sklopova* (bistabilnih multivibratora) s elektronkama ili tranzistorima. Takav je sklop prikazan na sl. 60. Prije početka brojanja zatvoren je tranzistor T_2 . Prvi ulazni impuls negativnog polariteta koji dolazi na bazu tranzistora T_2 prebacuje sklop u novo stanje, u kojem je tranzistor T_1 zatvoren a tranzistor T_2 otvoren. To stanje može se registrirati paljenjem sijalice S. Drugi negativni impuls dovodi sklop u početno stanje a na izlazu iz okidnog sklopa dobije se negativni impuls, koji može djelovati na slijedeći sklop. Više takvih multivibratora spaja se u seriju tako da jedan okida drugi. Sa m sklopova može se brojiti $2^m - 1$ impuls. Da bi se rezultati koje daje takav brojač u nekom kodu mogli prikazati dekadski, mora se pogodnom napravom izvršiti pretvaranje, tj. dekodiranje.



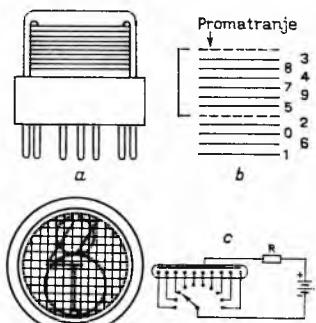
Sl. 60. Okidni sklop

Multivibratori mogu se spojiti i tako da broje samo do 10 i da se nakon 10-tog impulsa vraćaju u osnovni položaj. U tom slučaju valja imati toliko multivibratorskih grupa koliko postoji mjesta na pokazivaču brojača.

Rezultat brojanja očitava se na *pokaznom uredaju*. Prikazivanje brojčane vrijednosti obavlja se tako da se pojedine brojke i drugi simboli osvjetljavaju malim žaruljicama ili projiciraju na zastor (sl. 61). Upotrebljavaju se i elektroluminiscentne čelije sastavljene od 7 ili 9 elemenata koji svijetle kad se priključi napon, prikazujući na taj način brojke. Vrlo često se upotrebljavaju tinjalice



Sl. 61. Projekcijski pokazni uređaj. 1. Dijaframa, 2 blok leća, 3 blok kondenzatorskih leća, 4 toplinski filter, 5 držać, 6 sijalice, 7 podnožna sijalica, 8 radijator, 9 kutija, 10 zastor



Sl. 62. Tinjalični pokazni uređaj. a Pokazivanje, b raspored elektroda, c shema spoja

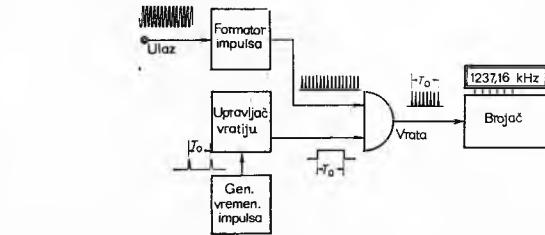
sa zajedničkom anodom i 10 katoda od tanke žice oblikovane u brojke od 0 do 9 (sl. 62). Priklučivanjem napona između anode i odgovarajuće žičane katode koja je savijena u obliku brojke nastane tinjavo izbijanje oko dotične katode.

Brojačke plinske cijevi s hladnom katodom sadrže u svom sistemu brojač i pokazni uređaj. Takve cijevi proizvodi npr. firma Baird Atomic pod fabričkim nazivom Dekatron. One se izrađuju kao jednoimpulsne i dvoimpulsne. Princip rada dvoimpulsne cijevi jednostavniji je pa je u nastavku podrobnije opisan. Oko anode u obliku diska simetrično su postavljene tri

grupe katoda (sl. 63 a): 10 indikatorskih katoda (K) i dvije grupe po 10 pomoćnih katoda (prvih 1PK i drugih 2PK). Sve katode pojedinih grupa osim jedne indikatorske (nulte katode NK) zajedno su spojene i imaju zajednički izvod na podnožju cijevi. Za ograničenje anodne struje na onu vrijednost koju je dovoljna da svijetli samo jedna katoda služi otpornik R_3 (sl. 63 b). Da se izbijanje ne bi pojavljivalo i na pomoćnim katomama, priključen je na njih odgovarajući prednapon. Izbijanje s jedne katode na drugu prenosi se dvama negativnim vremenski pomaknutim pravokutnim impulsima koji se dovode na pomoćne katode. Prvi impuls djeluje na prve pomoćne katode (1PK) i povećava razliku potencijala između njih i anoda. Zbog većeg pada napona na otporniku R_3 smanjuje se potencijal anode, pa se gasi katoda koja je do sada svijetila. Drugi impuls djeluje na druge pomoćne katode (2PK) i tako se ponavlja.

ne katode (2PK) te se izbijanje s prve pomoćne katode prenosi na najbližu drugu. Nakon djelovanja impulsa pomoćne katode su na relativno visokom pozitivnom prednapunu pa se izbijanje prenosi na najbližu indikatorsku katodu. Slijedeći par impulsa prenosi izbijanje s tinjanjem preko pomoćnih katoda na slijedeći indikatorsku katodu itd. Redni broj katode koja svijetli pokazuje broj dvostrukih impulsa. Ako ima 10 indikatorskih katoda, svakom desetom impulsu odgovara jedan izlazni naponski impuls koji se pojavljuje na otporniku R_k nulte katode (NK). Za upravljanje dekatonom i ostalim brojačkim cijevima potrebni su električni skloovi — formatori impulsa, koji impulsima daju određeni oblik, visinu i trajanje, odgovarajući upotrijebljenoj cijevi.

Digitalna mjerila frekvencije odlikuju se uskim granicama pogreški, širokim opsegom mjerjenja i velikom brzinom.

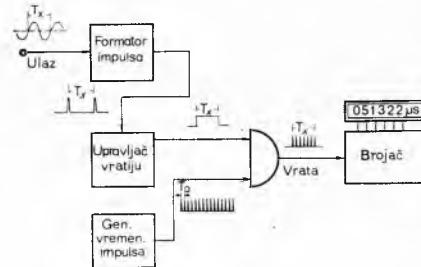


Sl. 63. Brojačka plinska cijev s hladnom katodom. a Konstruktivna shema, b električna shema

Mjerjenje frekvencije provodi se na dva načina: neposrednim brojanjem perioda i mjerjenjem trajanja jedne perioda nepoznate frekvencije.

Prvom načinom, tj. *neposrednim brojenjem perioda*, broji se broj perioda mjerene frekvencije kroz tačno određeno vrijeme (sl. 64). Sklop za oblikovanje impulsâ pretvara ulazni izmjenični

napon u niz istosmjernih impulsâ s vremenom ponavljanja $T_x = 1/f_x$. Impulsi iz generatora vremenskih impulsâ preko upravljača vratiju s određenim vremenskim ponavljanjem T_0 otvaraju i zatvaraju vrata koja predstavljaju električni propusni logički sklop. Broj impulsâ (iz sklopa za oblikovanje impulsâ) koje vrata prospuste u određenom intervalu broji brojač i na osnovu toga utvrđuje i svjetlećim brojkama pokazuje izmjerenu frekvenciju (f_x) izmjeničnog ulaznog napona. Tačnost mjerjenja ovisi o stabilnosti kvarcnog generatora impulsa i utjecaju pogreške od ± 1 impuls. Pogreške uslijed nestabilnosti generatora vrlo su male, ali ± 1 impuls može predstavljati veliku procentnu pogrešku u mjerjenju niskih frekvencija. Stoga je kod niskih frekvencija povoljniji drugi način mjerjenja frekvencije: *mjerjenjem trajanja jedne perioda*; iz te vrijednosti (T_x) izračuna se frekvencija: $f = 1/T_x$

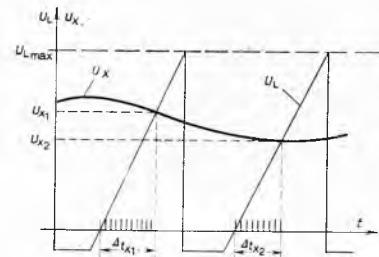


Sl. 65. Principijelna shema digitalnog mjerila frekvencije s mjeranjem trajanja perioda

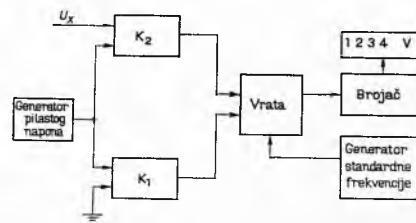
(sl. 65). Sklop za oblikovanje impulsa šalje po jedan kratki impuls svaki put kad izmjenični napon nepoznate frekvencije prolazeći kroz nulu mijenja svoj polaritet od negativnog na pozitivni. Vrijeme ponavljanja tih impulsa je T_x . Oni preko upravljača vratiju ova otvaraju i zatvaraju, a brojač broji impulse vremenskog generatora koji u tom razmaku vremena produ kroz vrata.

Digitalni voltmeter je električni mjerilni uređaj koji služi za mjerjenje istosmjernih napona. Mjerjenje se provodi tako da se istosmjerni napon kao analogna veličina pretvori u digitalnu. Primjenjuju se dva osnovna načina pretvaranja: pretvaranje napona u vrijeme ili frekvenciju i pretvaranje na principu kompenzacije.

Metoda pretvaranja napona u vrijeme temelji se na mjerjenju vremena Δt_x potrebnog da neki linearno rastući napon U_L naraste do iznosa nepoznatog napona U_x (sl. 66). Linearno rastući (pilasti) napon raste od nekog negativnog iznosa (da se izbjegnu pogreške pri pokretanju generatora pilastog napona) određenom brzinom. Kada pilasti napon dosegne potencijal nula, komparator K_1



Sl. 66. Proces uravnotežavanja s linearno rastućim naponom



Sl. 67. Pojednostavljena blok-shema digitalnog voltmetra s linearno rastućim naponom. K_1 i K_2 komparatori

ELEKTRIČNA MJERENJA

(sl. 67) otvara vrata i brojač počinje brojati impulse iz generatora standardne frekvencije. U trenutku kada pilasti napon dosegne vrijednost nepoznatog napona, komparator K_2 zatvara vrata i brojač prestane brojati. Broj impulsa koje je brojač prebrojio proporcionalan je vremenskom intervalu Δt_x , odnosno nepoznatom naponu U_x . Osim linearne rastućeg napona upotrebljava se u nekim vrstama digitalnih voltmetara i stepenasto rastući napon, ali tačnost voltmetara toga tipa manja je od tačnosti voltmetara s linearne rastućim naponom.

Pretvaranje analognog veličine u digitalnu *metodom na principu kompenzacije* svodi se na upoređivanje nepoznatog napona s poznatim. Umjesto rukom vrši se ovdje podešavanje ravnoteže automatski pomoću mehaničkih ili elektroničkih preklopki. Ste-

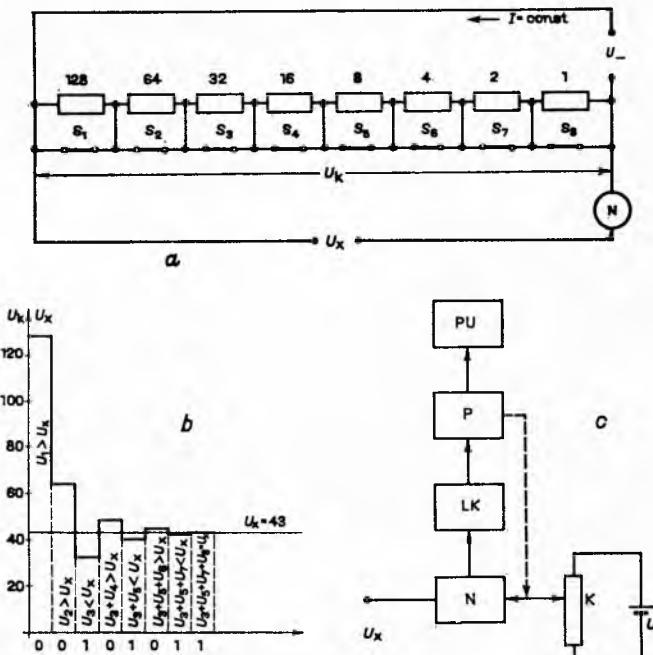
znamenka), dobru stabilnost i veliku brzinu mjerjenja. Digitalnim voltmetrima mogu se obično mjeriti naponi do 1000 V, a njihov mjerni opseg ovisi o broju predviđenih znamenki. Npr. s instrumentom predviđenim za pokazivanje 5 brojaka mogu se mjeriti naponi od npr. 0,0001 do 999,99 V. Ulagana impedancija tih instrumenata je visoka ($\sim 10 \text{ M}\Omega$). Izmjenični naponi mogu se također mjeriti pomoću digitalnih voltmetara ako se pretvore specijalnim konverterima u istosmjerne napone. Vanjski izgled digitalnog voltmatra pokazuje sl. 69.

Laboratorijski izvori napona i struje

Ovisno o vrsti mjerjenja i ispitivanja, za električna mjerjenja potrebni su naponi veličine od nekoliko milivolta do nekoliko megavolta, frekvencije od nekoliko herca do stotina megaheraca. U većini primjena potrebno je da se naponi mogu kontinuirano mijenjati u određenim granicama. Jednom podešeni napon i frekvencija moraju u određenom vremenskom intervalu biti stabilni, a valni oblik izmjeničnog napona i struje što bliži idealnom sinusnom obliku.

Laboratorijski izvori istosmjerne struje koji se upotrebljavaju za napajanje mjernog kruga i pomoćnih uređaja jesu galvanski članci, akumulatori, ispravljači i generatori. Sushi galvanski članci upotrebljavaju se u prenosimim uređajima male snage. Akumulatori se zbog malog unutarnjeg otpora i konstantnog napona upotrebljavaju za precizna mjerjenja. Serijskim, odn. paralelnim spajanjem akumulatorskih članaka mogu se dobiti naponi od stotinjak volti i struje nekoliko stotina ampera. Ispravljači nalaze široku primjenu kao izvori mjernih i pomoćnih napona jer se pogone izravno iz električne mreže. Za ispravljanje izmjeničnih napona upotrebljavaju se vakuumski, poluvodički, živini i mehanički ispravljači. Nakon ispravljanja izmjenična se komponenta filtrira filtrima RC, LC ili poluvodičkim filtrima. Tako dobiveni naponi često se još i stabiliziraju tinjalicama, Zener-diodama itd. Generatori istosmjerne struje upotrebljavaju se kao izvori istosmjerne struje tamo gdje su potrebne velike snage.

Laboratorijski izvori izmjenične struje jesu: električna mreža, elektronički oscilatori i signal-generatori, zujala i generatori izmjenične struje. Javna električna mreža upotrebljava se kao izvor mjernih i pomoćnih izmjeničnih napona bilo izravno bilo preko regulacionih transformatora. Kada promjene napona nisu u dozvoljenim granicama, napon se različnim vrstama stabilizatora stabilizira, ali se pri tome ponekad iskrivljuje valni oblik. Elektronički oscilatori i signal-generatori izrađuju se kao izvori jedne fiksne frekvencije, više fiksne frekvencije ili kontinuirano promjenljive frekvencije. Sastoje se od oscilatora, pojačala napona, djelitelja napona i eventualno pojačala snage. Oscilatori mogu imati oscilatorički krug RC ili LC ili raditi s kristalom kvarca. Valni oblik im je dobar, a stabilnost frekvencije može biti čak 10^{-9} Hz . Moderniji



Sl. 68. Shema digitalnog voltmatra s pretvaranjem na principu kompenzacije (sa stepenastim pretvaračem). a) Shema dijelovanja, b) dijagram podešavanja kod mjerjenja napona $U_x = 43 \text{ V}$, c) blok-sHEMA voltmatra sa stepenastim pretvaračem; K kompenzacioni otpornik, N nulindikator, LK logički krug, P elektronički ili elektromehaničke sklopke, PU pokazni uredaj

penovanje otpornika može biti binarno, binarno-dekadsko ili dekadsko. Na sl. 68 a prikazan je proces uravnovežavanja za 8 binarno stepenovanih otpornika. Na početku su sklopke zatvorene i kompenzacioni napon U_k jednak je nuli. Podešavanje počinje otvaranjem sklopke na najvećem otporniku. Ako nulindikator ustanovi da je $U_k > U_x$, ta se sklopka zatvara, a otvara se slijedeća. To se ponavlja dok se ne iskompenzira mjereni napon. Otvorene ostaju samo sklopke na otpornicima gdje je bio napon $U_k < U_x$. Kako se po tom sistemu mjeri napon i dobija rezultat u binarnom obliku vidi se (za napon od 43 V) na sl. 68 b, a shematski prikaz takva voltmatra pokazuje sl. 68 c.

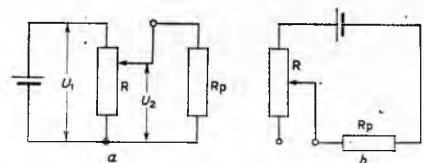
Današnji digitalni voltmetri imaju umjesto elektronki i mehaničkih kontaktata samo poluvodičke sastavne dijelove (transistore, diode itd.) pa su stoga trajniji. Oni se odlikuju jednostavnim rukovanjem, posjeduju veliku tačnost (npr. $0,01\% \pm 1$



Sl. 69. Vanjski izgled digitalnog voltmatra

oscilatori s kvarcom koji rade na principu sinteze imaju vanredno širok opseg, npr. od $0,01 \text{ Hz}$ do 50 MHz i veliku stabilnost frekvencije. Osim napona sinusnog valnog oblika elektronički oscilatori mogu davati napone drugih valnih oblika (npr. pravokutnog ili trokutnog oblika). Zujala su izvori male snage i upotrebljavaju se samo u prenosimim uređajima. Generatori izmjenične struje primjenjuju se za dobivanje snaga od nekoliko stotina VA do više kVA. Specijalnim spojevima mogu se dobiti amplitudno i frekventno stabilni naponi.

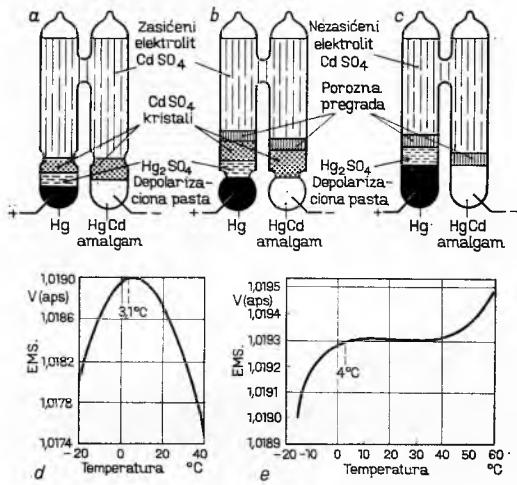
Podešavanje istosmernih i izmjeničnih struja što ih daju izvori provodi se otpornicima, a podešavanje izmjeničnih struja i regulacionim transformatorima. Podešavanje otpornicima izvodi se na dva načina: potenciometarski i predotpornikom.



Sl. 70. Podešavanje struja otpornicima: a) potenciometarski, b) predotpornom; R otpornik za podešavanje, Rp trošilo

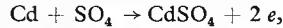
Potenciometarski spoj (sl. 70 a) primjenjuje se kad su posrijedi manje struje, a predotpornik (R na sl. 70 b) kad se radi o velikim strujama i trošilima velikih snaga.

Etaloni (normale) napona su izvori čiji je napon tačno poznat i vremenski nepromjenljiv. Oni se upotrebljavaju u kompenzatorskim spojevima za najtačnija mjerjenja, a ponekad se ugrađuju i u druge instrumente, npr. u neke digitalne voltmetre radi njihova baždarenja. Za razliku od običnih galvanskih elemenata, etalonski elementi ne služe za davanje električne energije, već samo kao standardni izvor napona pri mjerjenju. Da bi njihova elektromotorna sila ostala stalno ista, oni se ne smiju opteretiti većom strujom od $100 \mu\text{A}$. Najpozdaniji je danas *Westonov etalonski (normalni) element* (sl. 71 a...e), koji se izrađuje sa zasićenim i nezasićenim elektrolitom. U hermetski zatvorenoj staklenoj posudi sličnoj slovu H smješteni su katoda, anoda i elektrolit. Katodu sačinjava živa

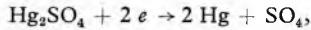


Sl. 71. Etalonski element. a Westonov etalonski element sa zasićenim elektrolitom, b isti element sa poroznom pregradom, c element sa nezasićenim elektrolitom, d ovisnost EMS o temperaturi u zasićenom i e u nezasićenom elementu

(Hg), a radi depolarizacije (v. *Baterije, električne*) nalazi se iznad sloj paste Hg i HgSO_4 . Anoda se sastoji od 10%nog kadmijum-amalgama (HgCd). Kao elektrolit služi vodena otopina CdSO_4 i HgSO_4 . U elementima sa zasićenim elektrolitom nalazi se iznad obje elektrode još i sloj kristala CdSO_4 . Reakcije koje u etalonskom Westonovom elementu daju struju jesu ove: na negativnoj elektrodi (katodi):



na pozitivnoj elektrodi (anodi):



što daje bruto-reakciju koja predstavlja zbroj dviju reakcija na elektrodama:



Da takvi elementi budu otporniji u transportu, u njih se iznad elektroda postavlja porozna pregrada, npr. od nekog keramičkog materijala. Elektromotorna sila etalonskih elemenata s nezasićenim elektrolitom manje je osjetljiva (sl. 71 e) prema promjenama temperature od elektromotorne sile elemenata sa zasićenim elektrolitom (sl. 71 d). Napon takvih elemenata mijenja se godišnje za 0,001%. Njihov unutrašnji otpor iznosi nekoliko stotina omu.

U novije vrijeme se kao etaloni za napon upotrebljavaju i izvori sa Zenerovim diodama. Takav sklop sačinjavaju ispravljač izmjeničnog napona i stabilizacioni sklop sa Zenerovim diodama. Pogodnim izborom stabilizacionog sklopa može se postići stabilnost napona jednaka stabilnosti napona Westonova etalonskog elementa, ali s manjim temperaturnim koeficijentom i manjim utjecajem opterećenja.

Mjerni otpornici, kondenzatori i svici

Prilikom preciznih mjerjenja, npr. mostovima i kompenzatorima, upotrebljavaju se mjerni otpornici, kondenzatori i svici. Od njih se zahtijeva vremenska stabilnost i neovisnost o temperaturi,

vlaži i utjecaju vanjskih magnetskih i električnih polja. Osim toga se zahtijeva da otpornici imaju što veći djelatni otpor a što manji kapacitet i induktivitet, da svici imaju što veći induktivitet a što manji kapacitet i djelatni otpor, a kondenzatori što veći kapacitet i što manji induktivitet i ostale gubitke.

Mjerni otpornici, naročito najprecizniji, izrađuju se od materijala koji imaju velik specifični otpor, neznatan temperaturni koeficijent otpora, vremensku stabilnost i mali termonapon prema bakru. Najpoznatiji materijal koji zadovoljava sve navedene uvjete je manganin (legura Cu, Mn i Ni). Njegov specifični otpor na temperaturi od 20°C iznosi $0,43 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$ ($= 0,43 \cdot 10^{-6} \Omega \text{m}$), a temperaturni koeficijent na sobnoj temperaturi $+0,000\ 01/\text{C}$. Vremenska stabilnost postiže se toplinskom obradom i vremenskim starenjem manganina. Osim manganina upotrebljavaju se za ovu svrhu i neke druge legure pod nazivima izabelin, novokonstantan, izaom itd. Manje precizni otpornici izrađuju se od žice drugih kvalitetnih otporničkih materijala, a za veće otpore i od sloja metala ili ugljena na keramičkom nosaču.

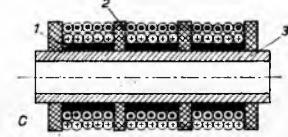
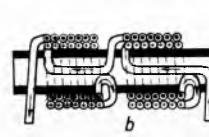
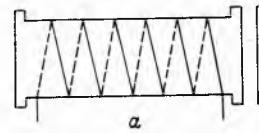
Kod niskih, a pogotovo kod visokih frekvencija dolazi do izražaja induktivitet zavoja, kapacitet među zavojima i kapacitet otpornika prema susjednim metalnim predmetima. U tom slučaju otpornik se može prikazati nadomjesnom shemom prema sl. 72. Reaktivna komponenta impedancije Z spoja na toj slici zavisi uglavnom od tzv. vremenske konstante τ otpornika:

$$\tau = \frac{L}{R} (1 - \omega^2 L C) - R C,$$

cdn. na niskim i tonskim frekvencijama:

$$\tau = \frac{L}{R} - R C.$$

Iz izraza za vremensku konstantu može se zaključiti da se uz $L/R = RC$ kod niskih frekvencija dobije $\tau = 0$, tj. da mjereni otpornik djeluje kao čisti djelatni otpor, mada posjeduje vlastiti induktivitet i kapacitet. Induktivitet koji prevladava pri manjim otporima i kapacitet koji prevladava pri višim otporima smanjuju se različnim načinom namatanja, tako da se mogu postići vremenske konstante reda veličine nekoliko desetaka nanosekunda. Neki od načina namatanja prikazani su na sl. 73.



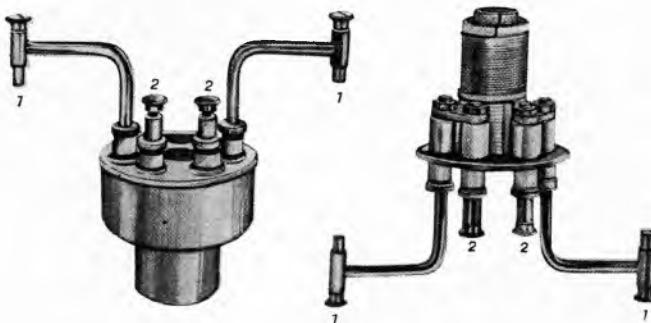
Sl. 73. Neke izvedbe otpornika za izmjenične struje. a Namot na tankoj pločici, b Chaperonov namot, c namot po Wagner-Wertheimeru; 1 metalna cijev, 2 izolacioni prsteni, 3 izolaciona cijev

Etaloni otpora služe za vrlo tačna laboratorijska mjerjenja pomoću mostova i kompenzatora. Izrađuju se u dekadskim stupnjevima od 10^{-5} do $10^6 \Omega$. Namot etalonskog otpornika zaštićen je kutiljom s otvorima za hlađenje (sl. 74). Opterećenje tog otpornika smije iznositi na zraku do 1 W, a u petrolejskoj kupci do 10 W. Krajevi otpornika izvedeni su često od debelih bakrenih šipki posebno oblikovanih, da bi se mogli uroniti u posudu sa živom koja služi kao kontakt. Da bi se kod malih otpora izbjegao utjecaj otpora kontakata, etalonski otpornici od 10Ω naniže imaju posebne »strujne« i »naponske« stezaljke. Granice pogrešaka etalona otpora za laboratorijska mjerjenja iznose manje od $\pm 0,01\%$.

Mjerni kondenzatori moraju među ostalim imati što manje gubitke u dielektriku i neznatni vlastiti induktivitet. Savršenom kondenzatoru se približava zračni kondenzator. Pomoću njega se mogu ostvariti japsolutni etaloni, tj. etaloni čiji je kapacitet određen računskim putem. Kapaciteti zračnih kondenzatora iznose

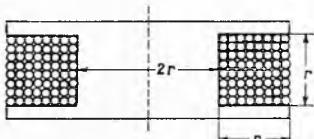
ELEKTRIČNA MJERENJA

100 do 5000 pF, a faktor gubitaka $\tan \delta = 10^{-5}$. Za dobivanje većih kapaciteta upotrebljavaju se kondenzatori s tinjcem. Osim toga kondenzatori koji se primjenjuju u mjerne svrhe mogu biti izrađeni s izolacijom od keramike, polistirena, papira itd. Za mjerjenje s visokim naponom upotrebljavaju se *tlačni kondenzatori* punjeni komprimiranim plinom.



Sl. 74. Etałonski otpornik za male otpore (lijevo zatvoren, desno sa skinutim poklopcom)

Mjerni svici imaju dovoljno tačno poznat vlastiti induktivitet L ili međuinduktivitet M . Vremenska konstanta treba da je što veća, tj. djelatni otpor što manji. Da bi se izbjegle poteškoće koje unosi struja magnetiziranja, mjerni svici izrađuju se bez željeza. *Apsolutni etaloni induktiviteta i međuinduktiviteta* su svici čiji je induktivitet određen računskim putem na temelju dimenzija i broja zavoja. Tačnost određivanja samoinduktiviteta odn. induktiviteta etalona iznosi $\pm 10^{-6}$. Upotrebni etaloni su manjih dimenzija i njihov induktivitet se određuje usporedjivom s apsolutnim etalonima. Izrađuju se kao višešlojni svici (sl. 75) na tijelu od mramora, porculana ili posebno obradene drvene u dekadskim stepenima od 0,0001 H do 1 H.



Sl. 75. Presjek upotrebnog etalona induktiviteta

Mjerni transformatori

Mjerjenje visokih napona i velikih struja s direktno priključenim instrumentima zahtjevalo bi glomazne i dobro izolirane instrumente. Takvi instrumenti bili bi nezgodni za rukovanje i opasni po život osoblja. S tih razloga se upotrebljavaju mjerni transformatori koji odvajaju mjerne i zaštitne krugove električnog postrojenja od visokog napona i transformiraju struje ili napone na vrijednosti koje su prikladne za priključak na mjerne instrumente.

Naponski mjerni transformator priključuje se paralelno trošilu čiji se napon mjeri. On mora transformirati mjereni napon u jednom stalnom i poznatom omjeru gotovo bez faznog pomaka na vrijednosti prikladne za mjerjenje mernim instrumentima. Tim bi zahtjevima udovoljio idealni transformator. Međutim, zbog padova napona na djelatnim otporima i rasipnim reaktancijama, i naponsku ima određenu faznu pogrešku izraženu u minutama transformator pogrešku definiranu jednadžbom:

$$p = \frac{n U_2 - U_1}{U_1} \cdot 100\%,$$

gdje je n nazivni omjer transformacije, a U_1 i U_2 primarni odn. sekundarni napon. Kako pogreške mjernog transformatora rastu s teretom priključenim na sekundarne stezaljke, naponski se mjerni transformator smije opteretiti samo određenim teretom, kako ne bi pogreške prešle dozvoljenu granicu. Standardizirane su ove vrijednosti nominalnog tereta reduciranih na sekundarni nazivni napon: 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 300, 450 i 600 VA. Podaci za tačnost mernih transformatora daju se u odnosu na teret s faktorom snage 0,8. Tereti se na sekundarnoj strani priključuju paralelno. Nazivne standardizirane vrijednosti za primarne napone jesu: 1, 3, 6, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 110, 150, 220 i 400 kV. Sekundarni nazivni naponi su standardizirani i iznose 100 V. Većina propisa predviđa pet klase tačnosti: 0,1, 0,2, 0,5, 1 i 3.

Zahtjevima klase moraju uđovoljiti transformatori kod primarnog napona $0,8 \dots 1,2 U$, i to transformatori klase 0,1 do 1 za terete između 1/4 i 1/1 od nazivnog, a oni klase 3 za 1/2 do 1/1 od nazivnog. Naponski mjeri transformatori izrađuju se kao jedno- ili trifazni transformatori (sl. 76) u različitim spojevima. Primarne stezaljke naponskih transformatora označavaju se sa U i V , a sekundarne sa u i v odn. sa U i X primarno, a u i x sekundarno, ako je transformator predviđen za fazni napon. Stezaljka X spojena je na neutralnu tačku sistema. Izrađuju se suhe i uljne izvedbe, što ovisi o pogonskom naponu. Suhe izvedbe danas su većinom s izolacijom od epoksidnih smola.

Strujni mjeri transformator (sl. 77) priključuje se primarno u seriju s trošilom i treba da transformira mjerenu struju u jednom stalnom omjeru i bez faznog pomaka na vrijednost prikladnu za mjerjenje. Zbog struje magnetiziranja, međutim, postoji određena stručna i fazna pogreška. Stručna pogreška definirana je jednadžbom:

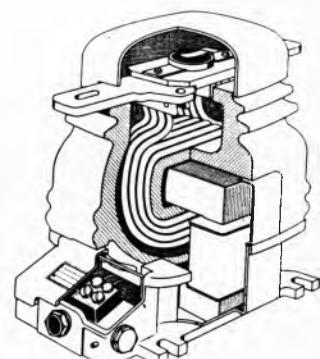
$$p = \frac{n I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100\%,$$

gdje je n nazivni omjer transformacije. Strujni mjeri transformatori razvrstani su prema preporukama IEC u šest klasa tačnosti: 0,1, 0,2, 0,5, 1, 3 i 5. One predstavljaju dozvoljenu granicu procentne stručne pogreške za nazivnu struju i 120% nazivne struje. Transformatori klase 0,1 do 0,5 upotrebljavaju se za laboratorijska mjerjenja, a oni klase 1 za pogonska. Za priključak zaštite upotrebljavaju se transformatori klase 1 do 5. Nazivna impedancija uz faktor tereta 0,8 definirana je izrazom:

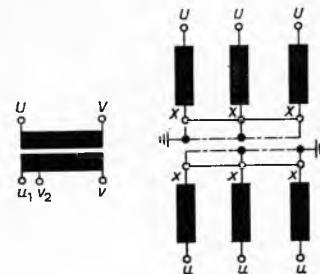
$$P = I_{2n}^2 Z_n,$$

gdje je I_{2n} nazivna sekundarna struja koja može biti 5 ili 1 A, a Z_n nazivna impedancija tereta. Nazivne snage su 5, 10, 15, 30 i 60 VA.

Pri kratkim spojevima u mreži poraste primarna struja strujnog transformatora na mnogostruko veću vrijednost od nazivne. Da bi se zaštitali mjeri instrumenti od oštećenja, nastoji se da sekundarna struja pri kratkom spoju što manje naraste. Porast sekundarne struje može se spriječiti upotrebom transformatora s relativno visokom magnetskom indukcijom u jezgri pri nazivnoj struci. Prema preporukama IEC vladanje strujnog transformatora za mjerjenje u području iznad nazivne struje karakterizirano je *nazivnom sigurnosnom strujom* I_{1s} i faktorom sigurnosti F_s . Strujni transformatori predviđeni za priključak zaštite treba da ispravno rade baš pri kratkim spojevima u mreži. Zato se kod strujnih transformatora za zaštitu definiraju *nazivna prenosna granična struja tačnosti* i *granični faktor tačnosti*.

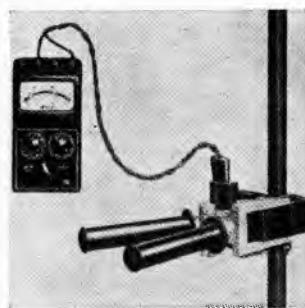


Zbog kratkih spojeva koji su mogući u mrežama, mjeri transformatori moraju izdržati mehanički i termički struju kratkog spoja. Iz tih razloga za svaki strujni transformator se navodi nazivna termička i dinamička struja. Termička struja je definirana kao efektivna vrijednost primarne struje koju transformator izdrži tokom jedne sekunde uz kratkospojeni sekundarni namot. Nazivna dinamička struja je tjemena vrijednost primarne struje koju transformator uz kratkospojeni sekundar izdrži bez oštećenja. Stezaljke



Sl. 76. Označke priključaka naponskog mernog transformatora

strujnih transformatora imaju oznake K i L primarno, a k i l sekundarno. Kad nisu priključeni mjerni instrumenti, sekundarni namot mora biti kratko spojen. Izvedbe strujnih transformatora ovise o nazivnim strujama, pogonskom naponu i namjeni. Niskonaponski mjerni transformatori obično imaju više primarnih strujnih područja i većinom su suhe izvedbe. U praksi se upotrebljavaju i transformatori koji omogućavaju mjerjenje struje bez prekidanja strujnog kruga. To su tzv. strujna kliješta, čija željezna jezgra može obuhvatiti vodič u kojem se mjeri struja (sl. 78).



Sl. 78. Strujna kliješta

TENDENCIJE RAZVOJA MJERNIH INSTRUMENATA I UREĐAJA

Brzi razvoj svih područja elektrotehnike i elektronike, a naročito uvodenje regulacije i automatizacije u sve grane industrije, zahtijeva sve složenije i raznovrsnije električne mjerne instrumente i uređaje kojima se potrebna mjerena vrše pouzdano i automatski. Zahvaljujući novim rješenjima i novim tehnološkim postupcima, uvođenjem poluvodičkih elemenata, elektroničkih sklopova i štampanih krugova, ostvaruje se merna oprema koja sve bolje zadovoljava tim zahtjevima. Složenost tih mernih uređaja iziskuje miniaturizaciju ugradenih elemenata i sklopova. Sve više se upotrebljavaju digitalni mjni uređaji koji otklanjam pogrešku uzrokovana ljudskim faktorom, daju podatke u obliku vrlo pogodnom za obradu računskim strojevima i za sve češće upotrebljavana daljinska mjerjenja. Osim toga njima se postižu u pogonskim mjerjenjima granice pogreške čak manje od 0,05%.

ELEKTRIČNA MJERENJA ELEKTRIČNIH VELIČINA

Pri razvoju elektrotehničkih sastavnih dijelova i uređaja odgovarajućim se električnim mjerjenjima električnih veličina pronađe optimalna rješenja i provjeravaju prethodna teoretska razmatranja; u proizvodnji služe mjerjenja za kontrolu ispravnosti izrađenih sastavnih dijelova, za provjeru tačnosti njihovih električnih veličina i karakteristika kao i za ispitivanje da li proizvedeni uređaji odgovaraju postavljenim zahtjevima; u različitim pogonima npr. tvornicama, elektranama itd., služe električna mjerjenja za kontrolu električnih veličina (npr. napona, frekvencije, snage) i za provjeru ispravnosti elektrotehničkih i elektroničkih uređaja.

Predmet ovog poglavlja su u glavnom samo metode i postupci za mjerjenje električnih veličina. Za instrumente koji su za to potrebni, a u ovom poglavlju su samo spomenuti, naznačena je svagdje gdje je to potrebno stranica na kojoj može čitalac članka naći njihov detaljni opis u prethodnom poglavlju.

Mjerjenje u tehniči istosmjerne struje

Mjerjenje istosmjernih napona i struja. *Istosmjerni naponi* mogu se mjeriti izravno različitim električnim mernim instrumentima i uređajima. Izbor pojedinih instrumenata i uređaja ovisi među ostalim o njihovoj tačnosti, mernom opsegu, vlastitom potrošku i opteretljivosti. Najčešće se za ovu svrhu upotrebljavaju instrumenti s pomičnim svitkom, koji se odlikuju malim potroškom i velikom osjetljivošću, a za vrlo tačna mjerjenja služe istosmjerni kompenzatori (Feussnerov i drugi). Vrlo mali naponi mjeri se galvanometrima neposredno ili nakon pojačanja u istosmjernim pojačalima. Mjerjenje vrlo visokih napona obradeno je na str. 627.

Istosmjerne struje mogu se mjeriti izravno različitim instrumentima. Za izbor instrumenata vrijedi ono što je rečeno za mjerjenje napona. Struje jakosti veće od 10^{-6} A mjeri se instrumentima s kazaljkom, a struje jakosti manje od 10^{-6} A zrcalnim galvanometrima ili galvanometrima sa svjetlosnim znakom (v. str. 591). Vrlo tačna mjerjenja struje reda veličine $10^{-6}\dots10^2$ A provode se istosmjernim kompenzatorima. Budući da kompenzatori mij-

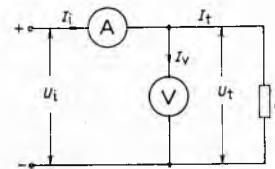
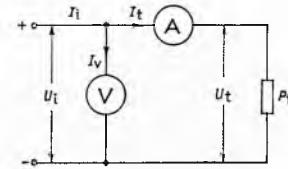
samo napone, nepoznata struja određuje se mjerjenjem pada naponi na poznatom preciznom otporniku (etalonu otpora). Za mjerjenje struja manjih od 10^{-12} A upotrebljavaju se elektrometri, pomoću kojih se mijere padovi napona na otpornicima od nekoliko miliona megaoma. Osim kvadrantnog elektrometra (v. str. 597) u specijalnom spoju upotrebljavaju se i elektronički elektrometri sa specijalnim elektrometarskim cijevima ili pretvaračima s dinamičkim kondenzatorom. Umjesto otpornika na kojima se mijere padovi napona mogu se upotrijebiti kondenzatori poznatog kapaciteta. Mjereći promjene napona na kondenzatoru u određenom vremenskom intervalu uslijed njegova nabijanja strujom koju treba izmjeriti, mogu se uz optimalne uvjete zapaziti i struje od 10^{-19} A.

Mjerjenje snage u krugovima istosmjerne struje. Snaga se može u krugovima s istosmernom strujom mjeriti bilo posredno, mjerjenjem struje i napona ampermetrom i voltmetrom, odnosno kompenzatorom, ili neposredno, vatmetrom.

Mjerjenje snage voltmetrom i ampermetrom. Snaga trošila P_t određena je produktom njegove struje I_t i njegova napona U_t :

$$P_t = U_t I_t.$$

Pri tome se instrumenti za mjerjenje struje i napona mogu priključiti na dva načina (sl. 1 i 2). Ako je potrošak instrumenata zanemarljiv prema snazi trošila, dobivaju se na oba načina praktički jednaki rezultati. U protivnom slučaju treba uzeti u obzir potrošak instrumenata. Ako se snaga trošila mjeri spojem prema sl. 1,

Sl. 1. Mjerjenje snage istosmjerne struje ampermetrom i voltmetrom koji je spojen na trošilo. A ampermetar, V voltmeter, P_t snaga trošila

Sl. 2. Mjerjenje snage istosmjerne struje ampermetrom i voltmetrom koji je spojen na izvor

struja kroz ampermetar I_t predstavlja zbroj struje voltmetra I_V i struje trošila I_t . Kako je $I_V = U_t / R_V$, bit će snaga trošila P_t :

$$P_t = U_t I_t = U_t I_t - U_t I_V = U_t I_t - \frac{U_t^2}{R_V}.$$

Prilikom određivanja snage izvora (P_i) pomoću istog spoja potrebno je uzeti u obzir potrošak ampermetra $I_t^2 R_A$:

$$P_i = U_t I_t + I_t^2 R_A.$$

Snaga trošila P_t mjerena spojem prema sl. 2 određuje se iz jednadžbe:

$$P_t = U_t I_t - I_t^2 R_A,$$

a snaga koju daje izvor, iz jednadžbe:

$$P_i = U_t I_t + \frac{U_t^2}{R_V}.$$

Načelno se odabira onaj način spajanja pri kojem nije potrebna korekcija zbog potrošaka instrumenata. Kad nije moguće izbjegći korekciju, primjenjuje se onaj spoj pri kojem je potrebna korekcija zbog potrošaka voltmetra, jer je njegov otpor redovno poznat. Tačnost mjerjenja snage ovisi o tačnosti upotrijebljenog ampermeta i voltmetra.

Tačna mjerjenja snage mogu se izvršiti mjerjenjem struje i napona kompenzatorima.

Vatmetar (v. str. 596) se pri mjerenu snage priključuje tako da se njegova naponska grana spaja na stezaljke trošila (sl. 3) ili izvora (sl. 4). Da li će se vršiti korekcija potrošaka naponske odnosno strujne grane ovisi o odabranom spoju i o tome da li se mjeri snaga trošila P_t ili samoga izvora P_i . Za spoj prema slici 3 vrijedi:

$$P_t = P_w - U_t^2 \left(\frac{1}{R_V} + \frac{1}{R_w} \right) \text{ i } P_i = P_w + I_t^2 (R_s + R_A).$$

Ako se odabere spoj prema slici 4, dobiva se: