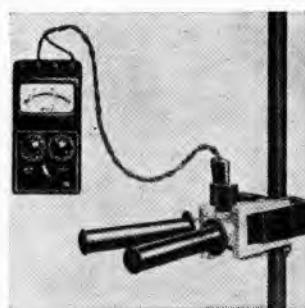


strujnih transformatora imaju oznake K i L primarno, a k i l sekundarno. Kad nisu priključeni mjerni instrumenti, sekundarni namot mora biti kratko spojen. Izvedbe strujnih transformatora ovise o nazivnim strujama, pogonskom naponu i namjeni. Niskonaponski mjerni transformatori obično imaju više primarnih 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 instrumenti koji otklanjam pogrešku uzrokovana ljudskim faktorom, daju podatke u obliku vrlo pogodnom za obradu računskim strojevima i za sve češće upotrebljavanja 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 mjerena 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 mjerena 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 opterljivosti. Najčešće se za ovu svrhu upotrebljavaju instrumenti s pomičnim svitkom, koji se odlikuju malim potroškom i velikom osjetljivošću, a za vrlo tačna mjerena 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 mjerena struje reda veličine $10^{-6}\dots10^2$ A provode se istosmjernim kompenzatorima. Budući da kompenzatori mij-

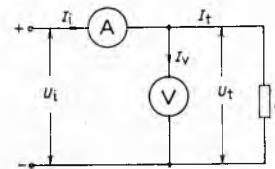
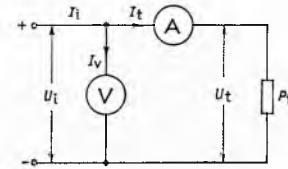
samo napone, nepoznata struja određuje se mjerjenjem pada napona na poznatom preciznom otporniku (etalonu otpora). Za mjerjenje struja manjih od 10^{-12} A upotrebljavaju se elektrometri, pomoću kojih se mjeri padovi napona na otpornicima od nekoliko miliona megaoma. Osim kvadrantnog elektrometra (v. str. 597) u specijalnom spoju upotrebljavaju se i elektronički elektrometri sa specijalnim elektrometarskim cijevima ili pretvaračima s dinamičkim kondenzatorom. Umjesto otpornika na kojima se mjeri 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 mjerena snage ovisi o tačnosti upotrijebljenog ampermeta i voltmetra.

Tačna mjerena 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:

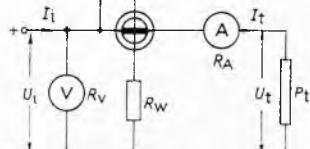
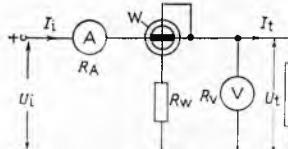
$$P_t = P_w - U_t^2 \left(\frac{1}{R_V} + \frac{1}{R_w} \right) \text{ i } P_i = P_w + I_t^2 (R_s + R_A).$$

Ako se odabere spoj prema slici 4, dobiva se:

$$P_t = P_w - I_i^2(R_s + R_A) \quad i \quad P_i = P_w - U_i^2 \left(\frac{1}{R_v} + \frac{1}{R_w} \right).$$

Sa R_s označen je otpor strujne grane, a sa R_w ukupni otpor naponske grane vatmetra.

Smjer otklona kazaljke vatmetra ovisi o redoslijedu spajanja strujnih i naponskih stezaljki, a isto tako o smjeru toka energije.



Radi jednoznačnog priključka stezaljke se posebno označuju ili se instrumentu prilaže shema priključaka. Dodatnim voltmetrom i ampermetrom mogu se kontrolirati napon i struja u naponskoj i strujnoj grani radi sprečavanja preopterećenja.

Mjerenje otpora. Djetalni otpor može se mjeriti pomoću brojnih instrumenata i prema različnim metodama, npr. mjerenjem struje i napona mernim instrumentima ili kompenzatorima, uspoređivanjem poznatog s nepoznatim otporom, običnim i digitalnim omometrima i različnim mostovima.

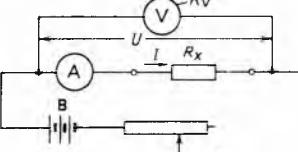
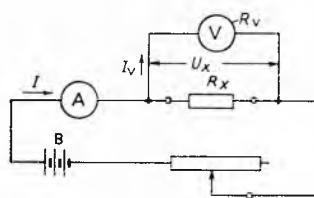
Metodom U i I . Određuje se djetalni otpor mjeranjem napona U i struje I . Na taj način mogu se odrediti otpori svih veličina u pogonskim uvjetima. Za provedbu takvog mjerjenja voltmetar i ampermetar mogu se spojiti na dva načina (sl. 5 i 6). U spoju prema slici 5 ampermetar mjeri zbroj strujā otpornika i voltmetra pa otpor mjereneog otpornika iznosi:

$$R_x = \frac{U_x}{I - I_v} = \frac{U}{I - \frac{U_x}{R_v}}.$$

Spojen prema sl. 6 ampermetar mjeri struju otpornika, a voltmetar pad napona na ampermetru i mjerenoj otporniku. Ako je otpor ampermeta R_A , traženi je otpor:

$$R_x = \frac{U - I R_A}{I} = \frac{U}{I} - R_A.$$

Općenito se upotrebljava onaj spoj pri kojem se može zanemariti potrošak instrumenta. Mali otpori mjeri se spojem prema sl. 5



jer je struja kroz voltmetar zanemarljiva prema struci kroz otpornik. Veliki otpori mjeri se spojem prema sl. 6 jer se redovno može zanemariti mali otpor ampermeta. Ako se potrošak instrumenta ne može zanemariti, najčešće se upotrebljava spoj prikazan na sl. 5 jer je otpor voltmetra po pravilu poznat. Tačnost mjerjenja ovisi o tačnosti upotrijebljenih instrumenata i veličini njihovih otklonova. Zato je poželjno da otkloni kazaljke budu što bliži punom otklonu.

Pri poredbojnoj metodi mjerjenja djetalnog otpora uključuje se otpornik poznatog otpora R_N u seriju (sl. 7) ili paralelno (sl. 8) s otpornikom nepoznatog otpora R_x . Vrijednost nepoznatog otpora dobije se iz vrijednosti poznatog otpora i omjera padova napona, odnosno struja. Pri serijskom spoju naponi se mjeri voltmetrom otpora R_v . Padovi napona na otporniku R_x i R_N iznose:

$$U_x = I \frac{R_x R_v}{R_x + R_v}, \quad U_N = I \frac{R_N R_v}{R_N + R_v}.$$

Iz ta dva mjerena, uz uvjet da su otpori R_x i R_N znatno manji od R_v , dobiva se:

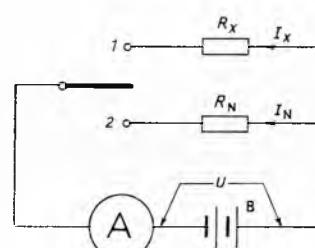
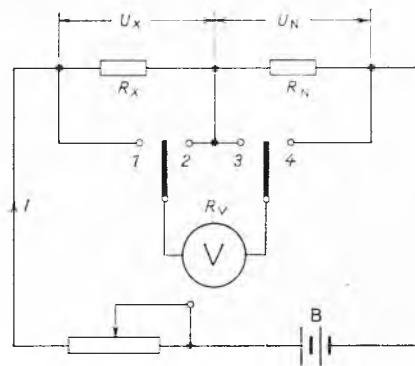
$$R_x \approx R_N \frac{U_x}{U_N}.$$

Serijski spoj upotrebljava se za mjerjenje malih otpora, a za mjerjenje velikih otpora prikladniji je paralelni spoj, pri kojem se uz konstantan napon U izvora mjeri struje I_x i I_N kroz poznati i nepoznati otpor:

$$I_x = \frac{U}{R_x + R_A}, \quad I_N = \frac{U}{R_N + R_A},$$

ili

$$R_x = (R_N + R_A) \frac{I_N}{I_x} - R_A.$$



Ako je zanemarljiv otpor ampermeta R_A prema otporima R_N i R_x , izraz se pojednostavljuje i postaje:

$$R_x \approx R_N \frac{I_N}{I_x}.$$

Kompenzatori služe za vrlo tačno mjerjenje otpora. U biti je to poredbena metoda prema sl. 7, samo se padovi napona na poznatom i nepoznatom otporniku umjesto voltmetrom određuju kompenzatorom (v. str. 604).

Omometri (ommetri) su merni instrumenti koji neposredno pokazuju vrijednost mjerene struje. Specijalne izvedbe služe za mjerjenje izolacionog otpora (megaomometri ili mjerila izolacije). Njima se mogu mjeriti i otpori od više stotina megaoma. U omometrima i megaomometrima primjenjuju se merni sistemi s pomičnim svitkom ili s unakrsnim svicima.

Omometrima s pomičnim svitkom mjeri se otpor tako da se odredi struja koja teče kroz svitak instrumenta i mjereni objekt nepoznata otpora. Naime, prema Ohmovom zakonu otpor je obrnuto razmjeran struji, pa se skala instrumenta koji mjeri struju može baždariti u omima (Ω) ako je napon izvora konstantan.

Omometrima s pomičnim svitkom mjeri se otpori od nekoliko oma do nekoliko stotina kilooma. Za mjerjenje većih otpora (od desetak oma do 10^5 oma) prikladan je spoj prema sl. 9. Na izvor konstantnog napona (U) serijski su priključeni instrumenti veli-

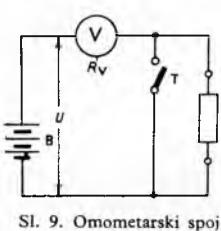
kog unutarnjeg otpora R_v i mjereni otpor R_x , koji se može kratko spojiti pomoću tipke T . Struja I_1 , odn. otklon a_1 , pri zatvorenoj tipki i struja I_2 , odn. otklon a_2 , pri otvorenoj tipki iznose:

$$I_1 = \frac{U}{R_v} = k_1 a_1 \quad \text{i} \quad I_2 = \frac{U}{R_v + R_x} = k_1 a_2.$$

Dijeljenjem se dobije:

$$R_x = R_v \left(\frac{a_1}{a_2} - 1 \right).$$

Kako se veća tačnost mjerjenja postiže većim otklonom a_1 , redovno se za a_1 odabira puni otklon kazaljke instrumenta. Za mjerjenje otpora ovom metodom može se upotrijebiti svaki voltmeter s prikladnim unutarnjim otporom. Međutim, mnogo se upotrebljavaju posebni instrumenti sa skalom izravno baždarenom u omima ili kiloomima i s ugradenim izvorom napona. Skala takvih instrumenata baždarena je za određeni (redovno puni) otklon a_1 , što zahtijeva stalni napon izvora. Kako suhe baterije, koje se najčešće upotrebljavaju kao naponski izvor, ne osiguravaju stalni napon, uvijek isti otklon a_1 postiže se pomoću potencijometra ili magnetskog šanta koji se približava ili udaljuje od polnih nastavaka permanentnog magneta instrumenta. Pomoću potencijometra ili magnetskog šanta može se podešiti odgovarajući otklon a_1 kad je napon baterije za $\sim 25\%$ manji ili veći od nominalnog.



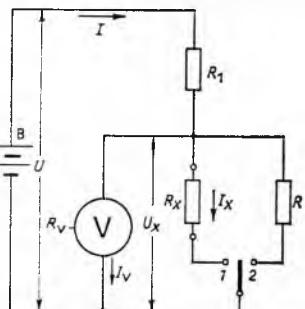
Za mjerjenje manjih otpora (do nekoliko stotina om) prikladniji je spoj prema sl. 10. Zbog velikog otpora R_1 ukupna struja I je praktički neovisna o nepoznatom otporu R_x . Voltmetrom koji je priključen paralelno otporu mjeri se u položaju 1 pad napon U_x na nepoznatom otporu a u položaju 2 pad napon na poznatom otporu. Kad je preklopka u položaju 1, struja I iznosi:

$$I = \frac{U}{R_1 + \frac{R_x R_v}{R_x + R_v}}.$$

Kako je $I = I_x + I_v = \frac{U_x}{R_x} + \frac{U_x}{R_v}$, slijedi:

$$R_x = \frac{U_x R_1}{U - U_x \left(\frac{R_1}{R_v} + 1 \right)}.$$

Puni otklon kazaljke postiže se kad R_x ima najveću vrijednost, a nema otklona kad je $R_x = 0$. Prije svakog mjerjenja preklopka se prebacuje u položaj 2, čime se umjesto otpora R_x priključuje poznati otpor R , pa se kazaljka mora otkloniti do određene oznake.



Sl. 10. Omometarski spoj za mjerjenje manjih otpora

Omometri s unakrsnim svicima u određenim su granicama neovisni o naponu izvora, jer im pokazivanje ovisi o omjeru struja kroz njihove svitke (v. str. 595). Ovisno o veličini mjerene otpora i o omjeru između najvećeg i najmanjeg otpora koji se mogu očitati na skali, upotrebljava se niz različitih spojeva. Pri spoju koji služi za mjerjenje većih otpora (sl. 11a), otpornik poznata otpora spaja se u seriju s jednim svitkom, a nepoznati otpor u seriju s drugim svitkom. Otklon kazaljke je proporcionalan omjeru otpora jedne i druge grane. Spoj na sl. 11b upotrebljava se za mjerjenje manjih otpora. Kroz jedan svitak teče struja U/R_2 , a kroz drugi

struju $\frac{U R_x}{R_1 R_p + R_x (R_p + R_1)}$, pa se za otklon kazaljke dobiva:

$$a = f \left[\frac{R_2 R_x}{R_1 R_p + R_x (R_p + R_1)} \right].$$

Mjerni mostovi upotrebljavaju se za precizno mjerjenje otpora, i to za veće otpore (iznad 1Ω) Wheatstoneov most a za manje otpore (ispod 1Ω) Thomsonov most (v. str. 603).

Mjerjenje otpora metodom gubitka naboja (sl. 12) primjenjuje se kod laboratorijskih mjerjenja vrlo velikih otpora. Kondenzator poznatog kapaciteta C koji je nabijen na napon U_1 izbjija se preko nepoznatog otpora. Mjerjenjem vremena t koje je potrebno da napon tokom izbijanja padne na vrijednost U_2 može se odrediti iznos nepoznatog otpora iz izraza:

$$R_x = \frac{t}{C \ln U_1/U_2}.$$

Pri tome je zanemaren kapacitet elektrostatičkog voltmetra koji se upotrebljava za mjerjenje napona, a za kondenzator je pretpostavljeno da ima savršenu izolaciju.

Kod kondenzatora s nesavršenom izolacijom izvode se dva mjerena: najprije se mjeri vrijeme potrebno da se kondenzator sam izbjije, te se odredi izolacioni otpor kondenzatora R_o , zatim se mjeri vrijeme potrebno da se kondenzator izbjije preko nepoznatog otpora. Tom prilikom dobije se otpor R paralelne kombinacije R_x i R_o jer se kondenzator istodobno izbjajao i preko svoje izolacije. Odavde se može odrediti R_x :

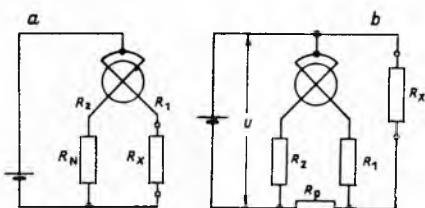
$$R_x = \frac{R R_o}{R_o - R}.$$

Vrlo veliki otpori, kao npr. površinski otpori, specifični otpori izolacionih materijala i sl., mogu se mjeriti i metodom UI ako se kao ampermetar upotrebljava dovoljno strujnoosjetljivi galvanometar.

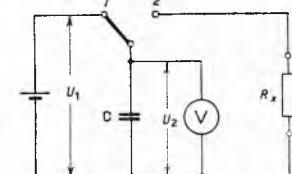
Vrlo tačna i brza mjerena otpora provode se posebno izvedenim digitalnim omometrima ili pomoću digitalnih voltmetera snabdjevenih pretvaračima otpora u istosmjerni napon. Digitalni omometri su obično Wheatstoneovi mostovi koji se dovode u ravnotežu automatski uključivanjem odgovarajućih otpornika u pojedine grane mosta. Tačnost digitalnih mjerila iznosi i do $0,01\%$, a mjereni opseg od nekoliko desetaka milioma do nekoliko desetaka megaoma.

Mjerjenje otpora izolacije provodi se na svim električnim postrojenjima, instalacijama i opremi. Propisi određuju kojim minimalnim naponom treba izvršiti mjerjenje. Tako npr. instalacije s pogonskim naponom ispod 1000 V treba ispitati s pogonskim naponom ili s najmanje 100 V. Iz praktičkih razloga razvijen je niz prenosnih izvedbi mjerila izolacije s vlastitim izvorima napona.

U mjerilu izolacije s induktorom kao izvor služi mali generator istosmjerne struje. Armatura se okreće ručno preko para zupčanika. Napon generatora je proporcionalan brzini vrtnje, pa je kod mjerila izolacije s pomičnim svitkom potrebno održati konstantnu brzinu vrtnje ili dobiveni napon naknadno stabilizirati. Kod suvremenih rješenja upotrebljavaju se u tu svrhu centrifugalni regulatori ili tinjalični stabilizatori. Masa je takvih mjerila 1–3 kg, a naponi izvora iznose između 500 i 2500 V (sl. 13). Udobnija za rukovanje su mjerila izolacije s baterijom i mehaničkim pretvaračem. Istosmerni napon baterije se pomoću mehaničkog pretvarača pretvara u isprekidani koji se transformatorom trans-

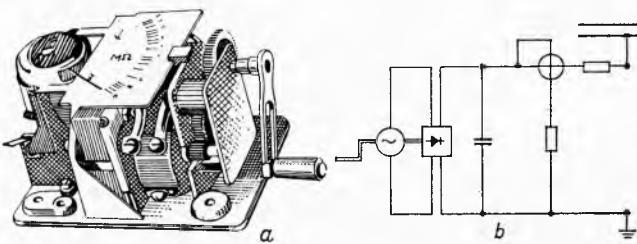


Sl. 11. Spojevi omometara s unakrsnim svicima.
a) Spoj za mjerjenje većih otpora, b) spoj za mjerjenje manjih otpora



Sl. 12. Mjerjenje velikih otpora metodom gubitka naboja

formira na dovoljno visoku vrijednost. Tako dobiveni izmjenični napon ispravlja se pomoću mehaničkog ispravljača i dovodi na instrument s unakrsnim svicima. Mjerila izolacije s tranzistorskim



Sl. 13. Mjerilo izolacije s induktorom. a Unutrašnji izgled, b shema

pretvaračem napajaju se obično iz malih akumulatora. Masa cijelog uredaja je $\sim 0,5$ kg. Osim mjerjenja izolacije izvan pogona često je potrebno kontrolirati otpor izolacije i za vrijeme pogona.

Frischova metoda omogućuje određivanje otpora izolacije električnog voda za vrijeme pogona pod uvjetom da nije dan od vodiča nije uzemljen. Voltmetrom izmjeri se najprije napon U između oba vodiča, a zatim naponi U_1 i U_2 između pojedinih vodiča i zemlje. Iz odnosa napona i poznatog otpora voltmetra R_V računski se dobiva otpor izolacije prvog voda R_1 i drugog voda R_2 prema zemlji:

$$R_1 = R_V \left(\frac{U - U_1 - U_2}{U_2} \right) \quad \text{i} \quad R_2 = R_V \left(\frac{U - U_1 - U_2}{U_1} \right).$$

Cjelokupni otpor postrojenja prema zemlji iznosi:

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

Mjerjenje u tehnički izmjeničnih struja

Mjerjenje izmjeničnih naponova i struja provodi se najčešće instrumentima s pomičnim željezom, elektrodinamičkim instrumentima i instrumentima s pomičnim svitkom kojima je dodat ispravljač odn. termopretvarač. Tačna mjerjenja mogu se izvesti izmjeničnim ili istosmjerno-izmjeničnim kompenzatorima. Izmjenični naponi, a naročito naponi nesinusnih valnih oblika, mogu se mjeriti i katodnim osciloskopom, uspoređivanjem s poznatim naponom ili pomoću ugradenog komparatora. Mjerjenje izmjeničnih naponova i struja digitalnim voltmetrima provodi se upotrebom izmjenično-istosmernih pretvarača.

Mjerjenje snage u krugovima izmjeničnih struja. Dok je u krugovima s istosmernom strujom snaga definirana produktom $P = U I$, u krugovima izmjenične struje mora se uzeti u obzir još i fazni pomak φ između napona i struje. U krugovima izmjeničnih struja razlikuje se: prividna snaga (S ili $P_s = U I$), djelatna, radna ili prava snaga ($P = U I \cos \varphi$), koja dolazi najčešće u obzir za mjerjenje, i jalova ili reaktivna snaga (Q ili $P_q = U I \sin \varphi$) koju također treba mjeriti. Faktor $\cos \varphi$ naziva se faktorom snage. Prividna snaga mjeri se u voltamperima (VA), djelatna snaga u vatima (W), a jalova u reaktivnim voltamperima (VAr). Za mjerjenje djelatne snage izmjenične struje upotrebljavaju se vatmetri (elektrodinamički i indukcioni v. str. 596/7) u različnim spojevima, a ponekad i kombinacije voltmetara ili ampermetera. U višefaznim sistemima valja pri izboru mjernega spoja voditi računa još i o tome da li je opterećenje pojedinih faza simetrično ili ne.

Mjerjenje snage jednofazne izmjenične struje vatmetrom. Dijelatna snaga se na području niskih frekvencija redovno određuje pomoću vatmetara, najčešće elektrodinamičkog tipa i to na isti način kao u krugovima istosmjerne struje. Pored vatmetara se u mjerenoj shemi upotrebljavaju voltmetar i ampermeter (v. sl. 3 i 4) radi kontrole opterećenja sistema vatmetra i radi određivanja faktora snage. Priključeni vatmetar pored snage trošila mjeri i snagu utrošenu u instrumentima. Pri mjerjenju manjih snaga (prema shemi na sl. 4) potrebno je izvršiti korekciju potroška strujne grane vatmetra i ampermetera, a pri mjerjenju prema shemi na sl. 3 korekciju potroška naponske grane vatmetra i voltmetra. Otpori ampermetera i strujne grane vatmetra obično nisu poznati, a osim toga

su ovisni o temperaturi, pa se izbjegavaju spojevi kod kojih je potrebna korekcija zbog njihovog potroška.

Korektura zbog potroška naponske grane nije potrebna kod kompenziranih vatmetara. Oni imaju uz strujni svitak tjesno namotan pomoći namot kroz koji teče struja naponske grane. Struja kroz pomoći namot teče u smjeru suprotnom smjeru struje kroz strujni svitak, pa se time njezin utjecaj poništava i vatmetar ne pokazuje snagu koja se troši u njegovoj naponskoj grani. Za mjerjenje snage trošila s malim faktorom snage nije prikladno upotrebljavati vatmetre koji uz nazivnu struju i napon imaju pun otклон kad je $\cos \varphi = 1$ jer bi njihov otклон bio malen. Za tu svrhu bolji su vatmetri koji imaju puni otклон kad je faktor snage manji, npr. 0,2, ili 0,1 pa čak i 0,05.

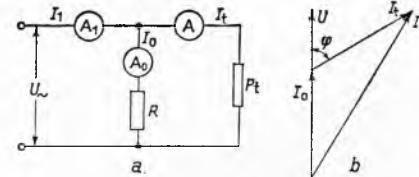
Na tačnost mjerjenja snage trošila s malim faktorom snage utječe i eventualna kutna pogreška naponske grane vatmetra. Do kutne pogreške dolazi zbog induktiviteta naponskog svitka, pa struja I_n kroz naponsku granu nije u fazi s naponom U na naponskoj grani. Ako je između napona U i struje I_n fazni pomak δ (sl. 14), vatmetar će umjesto $P = U I \cos \varphi$, stvarne snage trošila, pokazati $P_1 = U I \cos (\varphi - \delta)$. Procenata vrijednost pogreške iznosi:

$$p = \frac{P_1 - P}{P} \cdot 100\% = \frac{U I \cos (\varphi - \delta) - U I \cos \varphi}{U I \cos \varphi} \cdot 100\%.$$

Nakon sredivanja dobije se:

$$p \approx \delta \tan \varphi \cdot 100\%.$$

Mjerjenje snage pomoću tri ampermetera provodi se prema shemi na sl. 15. Pomoću tri ampermetra mjeri se ukupna struja I_1 , struja I_0 kroz poznati djelatni otpornik otpora R i struja I_t trošila.



Sl. 15. Mjerjenje snage pomoću tri ampermetra.
a Shema spoja, b vektorski dijagram

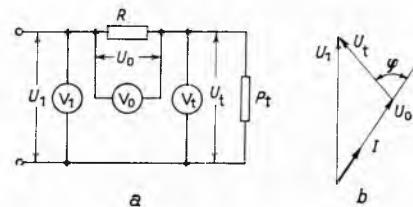
Iz vektorskog dijagrama, na osnovu kosinusovog poučka i zanemarujući otpor ampermetera, slijedi:

$$P = U I \cos \varphi = \frac{I_1^2 - I_0^2 - I_t^2}{2} \cdot R;$$

$$\cos \varphi = \frac{I_1^2 - I_0^2 - I_t^2}{2 I_0 I_t}.$$

S obzirom na tačnost povoljno je da otpor R bude približno jednak prividnom otporu trošila.

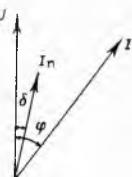
Mjerjenje snage pomoću tri voltmetra (sl. 16). Pomoću voltmetra mjeri se: ukupni napon U_1 , pad napona U_0 na otporniku poznatog



Sl. 16. Mjerjenje snage pomoću tri voltmetra.
a Shema spoja, b vektorski dijagram

otpora R i napon trošila U_t . Iz vektorskog dijagrama i na osnovu kosinusovog poučka slijedi:

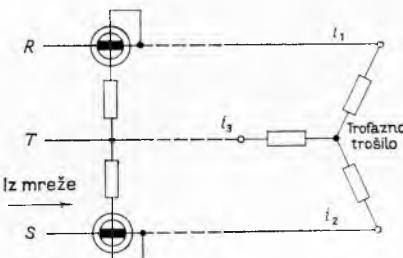
$$P = \frac{U_1^2 - U_0^2 - U_t^2}{2 R}; \cos \varphi = \frac{U_1^2 - U_0^2 - U_t^2}{2 U_0 U_t}.$$



Sl. 14. Vektorski dijagram elektrodinamičkog vatmetra čiji induktivitet naponske grane nije zanemarljiv

Za postizanje što veće tačnosti treba da je otpor R približno jednak prividnom otporu trošila, a otpori voltmetara moraju biti što veći.

Metoda dvaju vatmetara (Aronov spoj) primjenjuje se za mjerjenje snage u trofaznim sistemima bez nulvodiča. Vatmetri se priključuju prema shemi na sl. 17. Momentana vrijednost snage



Sl. 17. Mjerjenje djelatne snage metodom dvaju vatmetara (Aronov spoj)

trofaznog sistema jednaka je zbroju momentanih vrijednosti snage u svakoj fazi:

$$P_{\text{mom}} = u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_3 i_3.$$

Kod trofaznog sistema bez nulvodiča mora biti zbroj momentanih vrijednosti struja jednaka nuli:

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \quad \text{ili} \quad -i_3 = i_1 + i_2.$$

Ako se vrijednost za i_3 uvrsti u izraz za P_{mom} , dobije se:

$$P_{\text{mom}} = i_1(u_1 - u_3) + i_2(u_2 - u_3).$$

Naponske su grane vatmetara priključene na napone $u_1 - u_3$ i $u_2 - u_3$, a kroz strujne grane teku struja i_1 i i_2 ; stoga će zbroj pokazivanja prvog i drugog vatmetra dati srednju vrijednost snage P svih triju faza:

$$P = P_1 + P_2.$$

Iz vektorskog dijagrama trofaznog sistema sa simetričnim opterećenjem u kojem fazne struje zaostaju za pripadnim faznim naponima za kut φ (sl. 18) slijedi:

$$P_1 = I_R U_{RT} \cos(30 - \varphi) \quad \text{i} \quad P_2 = I_S U_{ST} \cos(30 + \varphi).$$

Naponi U_{RT} i U_{ST} linijski su naponi na koje su priključene naponske grane vatmetra W_1 odn. W_2 .

Kad je fazni kut φ veći od 60° , otklon jednog vatmetra bit će negativan, a o karakteru trošila ovisi koji će to biti vatmetar. Kako vatmetri imaju redovito nulu na lijevoj strani skale, treba zamijeniti naponske priključke vatmetra koji pokazuje negativan otklon, da bi se vrijednost otklona mogla očitati. Tako dobiveno očitanje odbija se od očitanja drugog vatmetra. Kod simetrično opterećenih sistema može se odrediti i faktor snage iz otklona jednog i drugog vatmetra:

$$\tan \varphi = \sqrt{3} \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2}.$$

Mjerjenje snage pomoću tri vatmetara primjenjuje se uvek u trofaznim sistemima s nulvodičem, a u sistemima bez nulvodiča se vatmetar priključuje na zvjezdasti spoj (sl. 19). Kroz strujne grane vatmetara teku struja trošila, a naponske grane priključene su na pripadne fazne napone, pa svaki vatmetar mjeri snagu faze u koju je priključen. Ukupna snaga trofaznog sistema je zbroj po-

kazivanja svih triju vatmetara. Ako sistem nema nulvodiča, izlazni krajevi naponskih grana spajaju se zajedno, pa čine umjetno zvjezdasti spoj. Upotrebom specijalne preklopke može se mjerjenje provesti sa svega jednim vatmetrom koji se prebacuje iz jedne faze u drugu.

Koja će se metoda primjeniti u sistemima bez nulvodiča ovisi o faktoru $\cos \varphi$ trošila. Ako je $\cos \varphi$ mali, po pravilu se tačnije mjeri pomoću tri vatmetra.

Mjerjenje jalove snage u jednofaznim sistemima provodi se indukcionim sistemima ili vatmetrima elektrodinamičkog tipa kod kojih je posebnim spojem postignut pomak faze od 90° između struje kroz naponsku granu i napona trošila.

Jalova snaga u trofaznim sistemima mjeri se varmetrima, tj. instrumentima za mjerjenje jalove snage, koji se spajaju na isti način kao i vatmetri pri mjerjenju djelatne snage, ili vatmetrima spojenim tako da je napon na naponskoj grani za 90° fazno pomaknut prema naponu koji bi imala naponska grana pri mjerjenju djelatne snage. To se postiže npr. tako da se naponska grana priključi na onaj linijski napon koji je za 90° fazno pomaknut prema naponu faze u kojoj se nalazi strujna grana instrumenta.

Ako je npr. strujna grana u fazi R, naponska se grana priključuje između faze S i T.

Metodom triju vatmetara mjeri se jalova snaga P_q prema shemi na sl. 20 pri simetričnom i nesimetričnom opterećenju. Budući da su naponske grane priključene na linijske napone i njihove vrijednosti prevelike $\sqrt{3}$ puta, suma se pokazivanja vatmetra mora podijeliti sa $\sqrt{3}$:

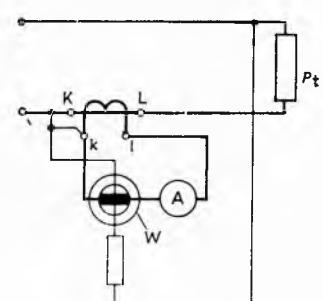
$$P_q = \frac{1}{\sqrt{3}} (P_{q1} + P_{q2} + P_{q3}).$$

U trofaznim sistemima bez nulvodiča i s proizvoljnim opterećenjem jalova snaga može se mjeriti metodom dvaju vatmetara. Naponske se grane priključuju u tom slučaju između umjetnog zvjezdista i faze u kojoj se nalazi strujna grana drugog vatmetra. Jalova snaga iznosi:

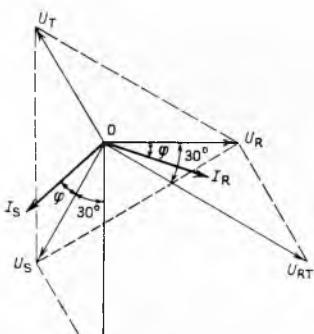
$$P_p = \sqrt{3} (P_{q1} + P_{q2}).$$

Jalova snaga u trofaznim sistemima bez nulvodiča a sa simetričnim opterećenjem može se odrediti na temelju očitanja dvaju vatmetara priključenih na isti način kao pri mjerjenju djelatne snage (sl. 17). Umjesto zbroja uzima se u tom slučaju razlika otklona pomnožena s $\sqrt{3}$, pa je $P_q = \sqrt{3} (P_1 - P_2)$.

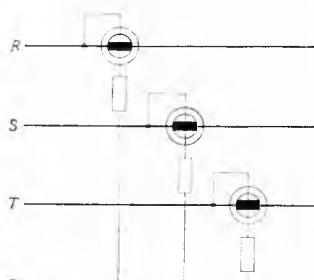
Poliindirektno i indirektno mjerjenje snage. Za mjerjenje većih snaga pri nižim naponima primjenjuje se poliindirektno mjerjenje snage. U tom se slučaju strujna grana vatmetra i ampermetar spajaju preko odgovarajućih strujnih majernih transformatora, a naponska se grana spaja direktno na napon trošila. Na slici 21 prikazano je poliindirektno mjerjenje snage jednofaznog trošila. Radi izjednačavanja potencijala strujnog i naponskog svitka spaja se stezeljka k strujnog transformatora s naponskim svitkom. Na



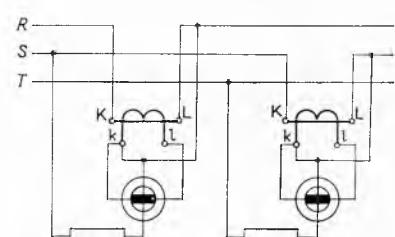
Sl. 20. Mjerjenje jalove snage metodom triju vatmetara



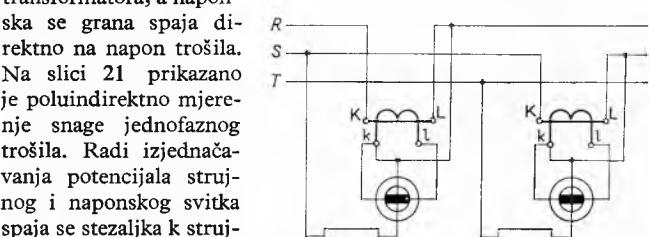
Sl. 18. Vektorski dijagram Aronovog spoja



Sl. 19. Mjerjenje djelatne snage metodom triju vatmetara

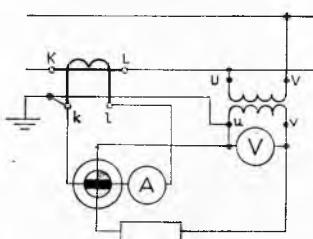


Sl. 21. Poliindirektno mjerjenje djelatne snage jednofaznog trošila



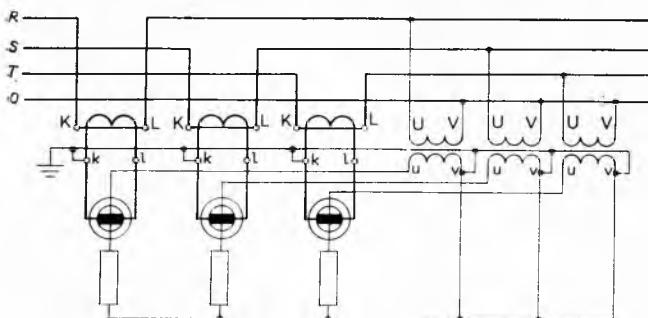
Sl. 22. Poliindirektno mjerjenje djelatne snage trofaznih sistema metodom dvaju vatmetara

sl. 22 prikazano je poluindirektno mjerjenje snage u trofaznim sistemima metodom dvaju vatmetara.



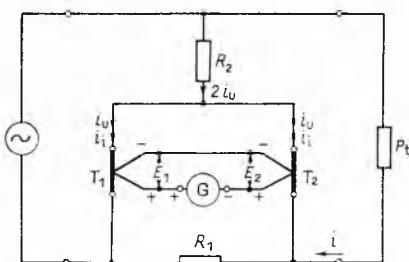
Sl. 23. Indirektno mjerjenje djelatne snage jednofaznog trošila

javio na sekundarnim stezaljkama u slučaju probaja izolacije i zbog kapacitivne veze između primarnog i sekundarnog namota mora se obavezno uzemljiti po jedna od sekundarnih stezaljki strujnih i naponskih mjernih transformatora.



Sl. 24. Indirektno mjerjenje djelatne snage metodom triju vatmetara

Mjerjenje snage na višim frekvencijama. Mjerjenje snage pomoću elektrodinamičkih instrumenata primjenjuje se na području nižih frekvencija, jer kod viših frekvencija nastaju poteškoće zbog induktiviteta naponskog svitka i međuinduktiviteta između svitaka. Granična frekvencija primjene elektrodinamičkih instrumenata je danas oko 10 kHz. Na frekvencijama od desetak kiloherca pa do nekoliko megaherca primjenjuju se različite mjerne metode za mjerjenje snage, ovisno o frekvenciji, veličini mjerene snage i zahtijevanoj tačnosti.



Sl. 25. Termički vatmetar. G osjetljivi instrument, R_1 i R_2 djelatni otpori, T_1 i T_2 termopretvarači

Mjerjenje snage pomoću *termopretvarača* može se provesti sprem prema sl. 25. Elektromotorne sile termopretvarača bit će:

$$E_1 = \frac{k_1}{T} \int_0^T (i_1 + i_u)^2 dt \quad i \quad E_2 = \frac{k_1}{T} \int_0^T (i_1 - i_u)^2 dt.$$

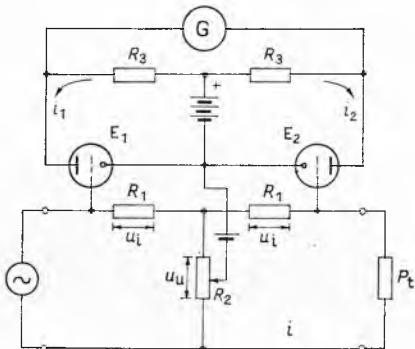
Osjetljivim instrumentom G može se odrediti razlika elektromotornih sila:

$$E_G = k_2 (E_1 - E_2) = \frac{k_2}{T} \int_0^T 4 i_u i_1 dt.$$

Uz pretpostavku da je struja i_u proporcionalna naponu trošila a struja i_1 proporcionalna struci trošila, razlika je elektromotornih sila proporcionalna snazi trošila:

$$E_G = \frac{k_2}{T} \int_0^T 4 i_u i_1 dt = k_3 P_t.$$

Ako je instrument G galvanometar sa svjetlosnim znakom, može se ovim vatmetrom registrirati snaga od 1 μW.



Sl. 26. Principijelna shema elektroničkog vatmetra. G osjetljivi instrument, R_1 , R_2 i R_3 djelatni otpori, E_1 i E_2 elektronske cijevi

Principijelna shema *elektroničkog vatmetra* prikazana je na sl. 26. Na otporima četveropola uključenog između generatora i trošila nastaju padovi naponu u_u i u_i proporcionalni naponu i strui trošila i u fazi s njima. Otpori R_1 su mali, a otpor R_2 je velik, tako da je zanemarljiva snaga koja se u njima troši. Anodne struje trioda jesu:

$$i_{a1} = k(u_u + u_i)^2 \quad i \quad i_{a2} = k(u_u - u_i)^2.$$

Kroz instrument G teći će razlika anodnih struja; njihova srednja vrijednost iznosi:

$$I_g = \frac{4k}{T} \int_0^T u_u u_i dt = k_1 P.$$

Različnim modifikacijama vatmetra ove vrste mogu se mjeriti snage u području od 20 Hz do nekoliko stotina kiloherca s tačnošću od 5...10%.

Mjerjenje snage *katodnim osciloskopom* provodi se u području frekvencija od 10 kHz do 10 MHz. Snaga se određuje iz površine zatvorene krivulje na zastoru katodne cijevi. Zatvorena krivulja dobije se kad se na jedan par pločica priključi napon trošila u_p , a na drugi par napon u_C kondenzatora spojenog u seriju s trošilom. Površina zatvorene krivulje iznosi:

$$A = \int y dx,$$

gdje je y vertikalni, a x horizontalni otklon snopa elektrona. Otklon elektronskog snopa ovisi o faktorima osjetljivosti k_x i k_y osciloskopa. Naponi u_p i u_C dani su izrazima:

$$u_p = U_1 \sin(\omega t + \varphi); \quad u_C = U_2 \cos \omega t.$$

Ako se površina slike koja se očrtava za vrijeme jedne periode izrazi pomoću napona u_p i u_C , dobije se:

$$A = \int_0^T k_y U_1 \sin(\omega t + \varphi) k_x U_2 \omega \sin \omega t,$$

$$A = k_y k_x U_1 U_2 \omega \frac{T}{2} \cos \varphi.$$

Kako je $U_2 = \frac{I}{\omega C}$ i $\frac{U_1 I}{2} \cos \varphi = P$, slijedi da je

$$A = k_y k_x P \frac{1}{fC} \quad \text{ili} \quad P = k A C f.$$

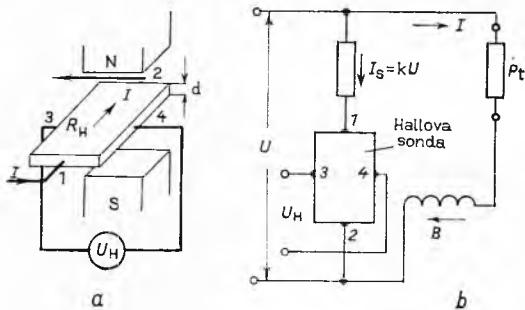
Površina A bit će proporcionalna jalovoj snazi ako se umjesto kondenzatora kapaciteta C spoji otpornik djelatnog otpora R .

Mjerjenje snage *Hallovom sondom* moguće je skoro bez inercije u širokom frekventnom području. Princip rada Hallove sonde prikazuje slika 27 a. Ako kroz sondu, tj. pločicu debljine d napravljenu od pogodnog poluvodiča, koja se nalazi u magnetskom

polju indukcije B , protječe (istosmjerna) struja I u pravcu 1—2, pojavit će se na priključcima 3 i 4 tzv. Hallov napon U_H koji iznosi:

$$U_H = B I \frac{R_H}{d},$$

gdje R_H znači Hallovu konstantu (izraženu u m^3/As) koja zavisi od materijala sonde a koja je za neke poluvodiče, npr. indijum s arsenom, velika. Ako je Halova sonda spojena prema sl. 27 b tako da je struja I_s kroz sondu proporcionalna naponu trošila, a indukcija B proporcionalna struci kroz trošilo, Hallov je napon proporcionalan snazi trošila.



Sl. 27. Vatmetar s Hallovom sondom. a Shematski prikaz, b principijelna shema; U napon izvora, U_H Hallov napon

Mjerjenje snage na vrlo visokim frekvencijama. Dok se mjerjenje snage u krugovima istosmjerne struje i izmjeničnih struja frekvencije do nekoliko megaherca svodi u principu na mjerjenje struje i napona, takav način mjerjenja stvara znatne poteškoće kad su frekvencije više. Zato se na visokim i vrlo visokim frekvencijama, gdje se veličine napona i struje mijenjaju duž dovoda ili se ne mogu jednoznačno definirati, mjeri snaga direktno. Pri tome se upotrebljavaju različite metode, prema iznosu mjerene snage (mogući raspon od nekoliko mikrovata do nekoliko kilovata) i tačnosti koja se želi postići.

Najčešće se iskorištava toplinski efekt visokofrekventne snage. Mediji koji se zagrijavaju mogu biti čvrsta tijela, tekućine ili (rjeđe) plinovi. Porast temperature uslijed zagrijavanja može se mjeriti direktno ili indirektno.

Bolometri (bareteri i termistori) su elementi kojima se otpor znatno mijenja s temperaturom. Bareteri su otpori s pozitivnim

Bareteri i termistori postavljaju se na posebno konstruirane držače, kako bi se mogli staviti u koaksijalni ili šupljivi vod a da se pri tome postigne što potpunije prilagodenje impedancija na širokom opsegu frekvencija. Bareteri i termistori u svojim držačima predstavljaju aktivnu granu bolometarskog mosta. Promjena otpora bolometra, proporcionalna visokofrekventnoj snazi, izaziva poremećaj ravnoteže mosta koji je prije bio uravnotežen. Mjerena snaga može se odrediti iz otklona nulindikatora (neuravnoteženi mostovi) ili iz promjene struje u grani napajanja mosta potrebne da se most opet dovede u ravnotežu (uravnoteženi mostovi).

Na sl. 30 prikazan je jedan uravnoteženi bolometarski most. Otpornikom R podesi se istosmjerne struja na vrijednost I_1 koja je potrebna da se bolometar dovede u radnu tačku (obično 200Ω), gdje mu je otpor jednak R_0 . Otpori ostalih grana tako se odaberu da vrijedi: $R_1 = R_2 = R_3 = R_B = R_0$, pa je most u ravnoteži. Kad se priključi visoka frekvencija, uslijed zagrijavanja bolometra most se izbacuje iz ravnoteže. Podešavanjem istosmjerne struje na vrijednost I_2 most se ponovo dovodi u ravnotežu. Mjerena snaga odreduje se iz jednadžbe:

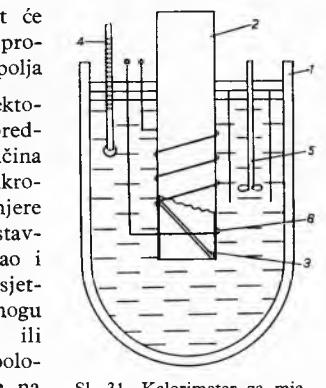
$$P = \frac{I_1^2 R_0}{4} - \frac{I_2^2 R_0}{4} = \frac{(I_1 + I_2)(I_1 - I_2)}{4} R_0.$$

Tačnost mjerjenja može biti nedovoljna kad je $I_1 \approx I_2$, tj. kad je razlika $I_1 - I_2$ mala. Veća se tačnost postiže drugim varijantama bolometarskog mosta.

Postoje također bolometarski mostovi koji se automatski uravnotežavaju.

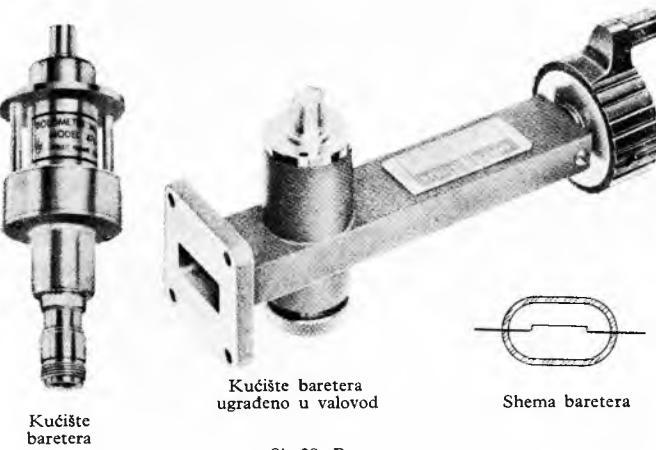
Bolometrima, zbog njihovih fizičkih dimenzija, mogu se mjeriti snage do $\sim 50 \text{ mW}$. Za mjerjenje većih snaga treba primijeniti odgovarajući oslabljivač (attenuator), ali time se smanjuje tačnost mjerjenja.

Snaga se može mjeriti i iskoristavanjem Hallova efekta u poluvodičima. U tu se svrhu Halova sonda stavlja u rezonator na mjesto najjačeg magnetskog polja, i to tako da je smjer polja okomit na površinu sonde. Uzbudna struja se obično dobije pomoću posebne sonde kapacitivno spregnute s valovodom (cijevi za vodenje elektromagnetskih valova) te je proporcionalna električnom polju \vec{E} . Hallov napon bit će dakle proporcionalan vektorskom produktu električnog i magnetskog polja $\vec{E} \times \vec{H} = \vec{S}$, tj. Poyntingovu vektoru, čija apsolutna vrijednost $|S|$ predstavlja gustoću snage (W/m^2). Veličina Hallova napona iznosi nekoliko mikrovolta po vatu. Vrlo male snage mijere se i kristalnim diodama koje se stavljaju u valovod na isti način kao i bolometri. Odlikuju se velikom osjetljivošću: $\sim 1 \mu\text{A}/\mu\text{W}$, ali se ne mogu baždariti istosmjerom strujom ili strujama niske frekvencije kao bolometri, a osim toga su osjetljive na vibracije i preopterećenje.



Sl. 30. Shema bolometarskog mosta. R_1 , R_2 i R_3 djelatni otpori, R_B otpor baretera, P_r visokofrekventna prigušnica, N nulindikator

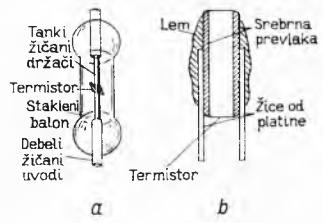
mjerjenju snage kod visokih frekvencija. 1 Termos-posuda, 2 valovod, 3 staklena ploča, 4 termometar, 5 miješalica, 6 grijac



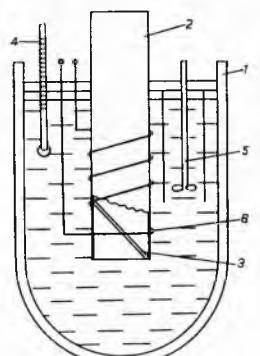
Sl. 28. Bareter

temperaturnim koeficijentom, izrađeni od volframove ili platinske žice debljine nekoliko mikrona i duljine oko 1 cm. Žica baretera učvršćena je na debljim dovodima i zatvorena u mali stakleni balon, obično evakuiran ili ispunjen inertnim plinom (sl. 28). Termistori (otpori s negativnim temperaturnim koeficijentom) načinjeni su od oksida mangana i bak a ili nikla u obliku malog valjka ili kuglice (promjera $\sim 1 \text{ mm}$). Dovodi su od tankih žica pričvršćenih na deblje (sl. 29). Termistoru se otpor zbog zagrijavanja mnogo više mijenja nego bareteru, ali je zato termistor osjetljiv na promjene temperature okoline.

Snage veće od nekoliko desetaka milivata mijere se kalorimetričkim metodama, tj. zagrijavanjem tekućine visokofrekventnom snagom. Na slici 31 prikazana je jedna od najjednostavnijih izvedbi kalorimetra. U termos-posudu s vo-



Sl. 29. Termistor. a Termistor s kućištem, b detalj termistora



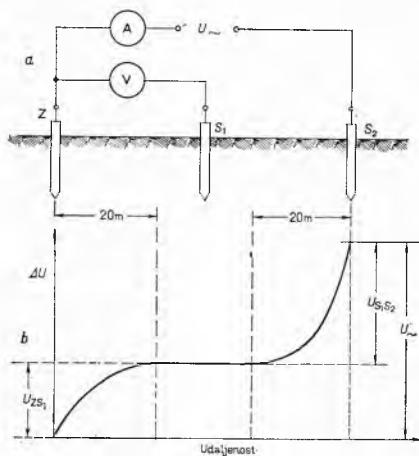
Sl. 31. Kalorimetar za mjerjenje snage kod visokih frekvencija. 1 Termos-posuda, 2 valovod, 3 staklena ploča, 4 termometar, 5 miješalica, 6 grijac

dom uronjen je kraj valovoda zatvoren kosom staklenom stijenkom. Dovedena visokofrekventna snaga P_{vt} tokom vremena T_{vt} promijenit će temperaturu vode za $\Delta\theta_{vt}$. Ista količina vode zagrijavana tokom vremena T_{∞} istosmjerom strujom pomoću ugrađenog grijaća promijenit će temperaturu za $\Delta\theta_{\infty}$. Visokofrekventna snaga može se odrediti iz izraza:

$$P_{vt} = \frac{P_{\infty} T_{\infty} \Delta\theta_{vt}}{\Delta\theta_{\infty} T_{vt}}.$$

Mjerenje otpora u krugovima izmjeničnih struja. Mjerenje otpora uzemljenja vrši se izmjeničnom strujom kako bi se izbjegle pojave elektrolize i polarizacije. Frekvencija izmjenične struje kojom se obavljaju takva mjerenja ne smije ležati u blizini 50 Hz, da se izbjegnu utjecaji lutajućih struja u zemlji, koje su obično te frekvencije. Prilikom mjeranja ne zahtijeva se velika tačnost jer se otpor uzemljenja znatno mijenja s promjenama klimatskih prilika.

Mjerenje otpora uzemljenja metodom UI (sl. 32 a) izvodi se tako da se priključi izvor izmjenične struje između uzemljivača Z i sonde S_2 , a zatim mjeri jakost struje i pad napona koji ta struja uzrokuje između uzemljivača Z i sonde S_1 . Sonda S_1 mora biti udaljena najmanje 20 m od pločastih i šipkastih uzemljivača, a ni razmak između sonde S_1 i S_2 ne smije biti manji jer je tek na toj udaljenosti potencijal konstantan (sl. 32 b). Otpor voltmetra



Sl. 32. Mjerenje otpora uzemljenja. a) Shema mjerjenja metodom UI , b) pad napona između uzemljivača i sondi

kojim se mjeri pad napona mora biti bar 10 puta veći od otpora uzemljenja sonde S_1 , kako bi se izbjegle pogreške uzrokovanе padom napona na sondi S_1 uslijed struje voltmetra. Otpor uzemljenja (R_Z) ispitivanog uzemljivača Z dobiva se pri primjeni ove metode iz izraza: $R_Z = U_{ZS_1}/I_{ZS_1}$. Osim metode UI , koja se rijetko upotrebljava, postoji čitav niz drugih, od kojih će biti spomenuti dvije: Nippoldova i Behrendova.

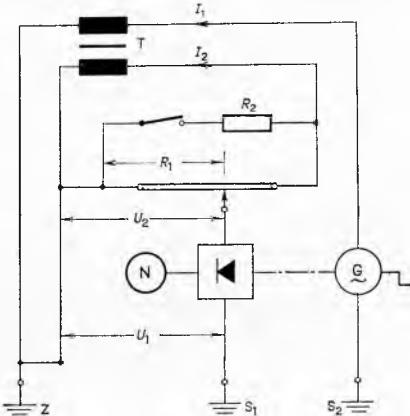
Nippoldova metoda sastoji se u tome da se Wheatstoneovim mostom mjeri redom otpor R_{ZS_1} između mjereneog uzemljivača Z i sonde S_1 , otpor R_{ZS_2} između uzemljivača Z i sonde S_2 i otpor $R_{S_1S_2}$ između sondi S_1 i S_2 (sl. 33). Iz izmjerenih vrijednosti može se odrediti otpor uzemljenja:

$$R_Z = \frac{R_{ZS_1} + R_{ZS_2} - R_{S_1S_2}}{2}.$$

Sl. 33. Nippoldova metoda mjerjenja otpora uzemljenja

Behrendova kompenzatorska metoda omogućava određivanje otpora mjereneog uzemljenja iz svega jednog mjerjenja. Izmjenična struja I_1 iz ručnog generatora (sl. 34), tranzistorskog oscilatora ili uređaja s mehaničkim pretvaračem teče kroz primarni strujni transformatora T, kroz ispitivani uzemljivač Z, zemlju i sondu S_2 . Kroz sekundarni namot strujnog transformatora T teće struja

I_2 koja je u stalnom omjeru prema struci I_1 . Nulindikator N priključen preko ispravljača ne pokazuje otklon kad je napon U_1



Sl. 34. Behrendova metoda mjerjenja otpora uzemljenja

između uzemljivača Z i sonde S_1 jednak padu napona U_2 na dijelu klizne žice otpora R_1 :

$$I_1 R_Z = I_2 R_1.$$

Kako je $I_2/I_1 = k$, slijedi:

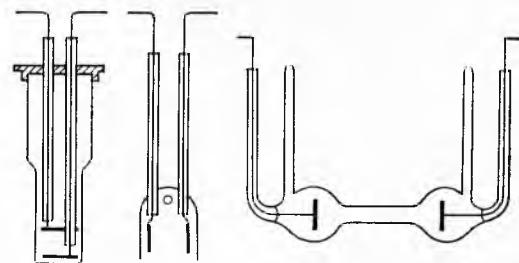
$$R_Z = k R_1.$$

Promjena mernog područja postiže se uključivanjem otpornika otpora R_2 . Lutajuće struje frekvencije 50 Hz ne utječu na rezultat mjerena jer kad se upotrebljava ručni generator može se frekvencija mijenjati mijenjajući brzinu vrtnjne. U uređajima s mehaničkim ispravljačem ispravlja se samo struja frekvencije vlastitog generatora, odn. u uređajima s tranzistorskim oscilatorom mjereni napon se filtrira i propušta samo frekvenciju oscilatora.

Određivanje vodljivosti tekućina (elektrolita) vrši se mjerjenjem otpora između dvije elektrode koje su uronjene u tekućinu i to redovno izmjeničnom strujom frekvencije 50...1000 Hz, kako ne bi došlo do polarizacije. Elektrode moraju biti kemijski otporne (npr. od platine), a udaljenost medu njima mora biti konstantna. Površina i razmak elektroda elektrolitske mjerne celijske (sl. 35) odabira se u ovisnosti o vodljivosti ispitivane tekućine. Ako je α specifična vodljivost tekućine, q srednji presjek stupca tekućine kroz koji prolazi struja, a l njegova duljina, otpor će celijske (prema definiciji specifične vodljivosti) biti jednak:

$$R = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{l}{q} = \frac{A}{\alpha},$$

gdje je $A = l/q$ za određenu mernu celijsku konstantnu veličinu, koja se može odrediti jedanput za uvijek mjereci otpor R te celijsku napunjenu tekućinom poznate vodljivosti α . Kad je konstanta



Sl. 35. Elektrolitske celijske

A mjerne celijske poznata, nepoznata se specifična vodljivost ispitane tekućine može odrediti mjereci joj otpor u toj mernoj celiji: $\alpha = A/R$.

Kao tekućina s poznatom specifičnom vodljivošću može služiti na primjer molarna otopina kalijum-klorida [otopina koja sadrži u litri 1 M (mol) = 74,6 g KCl]. Ta otopina ima specifičnu vodljivost 9,821 S/m na 18 °C i 10,209 S/m na 20 °C. Upotrebljavaju se i otopine sa M/10, M/50, i M/100 u litri.

Za mjerjenje otpora čelije upotrebljava se obično Wheatstoneov most napajan izmjeničnom strujom.

Mjerenje induktiviteta. Induktivitet se može mjeriti na više načina, npr. pomoću metode U/I , pomoću različnih mostova izmjenične struje, titrajućih krugova sastavljenih od nepoznatog induktiviteta i dodatnog kondenzatora poznatog kapaciteta, itd.

Mjerenje induktiviteta metodom UI . Impedancija Z svitka djelatnog otpora R i induktiviteta L iznosi:

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

gdje ω znači kružnu frekvenciju. Mjerjenjem izmjeničnog napona i struje može se odrediti impedancija Z ($Z = U/I$), a djelatni otpor R može se utvrditi nekom od metoda za mjerjenje otpora istosmjerom strujom. U tom slučaju iznosi:

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{\omega} \sqrt{Z^2 - R^2} = \\ &= \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R^2}. \end{aligned}$$

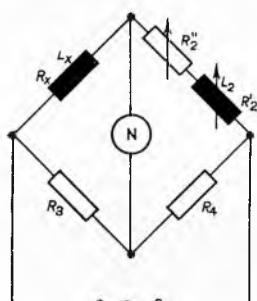
Ako svici imaju željeznu jezgru, treba mjesto omskog otpora rastaviti nadomjesni otpor za ukupne gubitke (omske i u željezu).

On se utvrđuje mjerjenjem snage vatmetrom i iznosi $R_g = \frac{P}{I^2}$ (sl. 36). Induktivitet se u tom slučaju odreduje iz izraza:

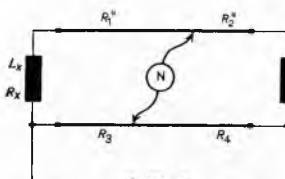
$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{U^2}{I^2} - R_g^2} = \frac{1}{\omega I^2} \sqrt{U^2 I^2 - P^2}.$$

Mosne metode mjerena induktiviteta svode se na usporedbu nepoznatog induktiviteta i pripadnog djelatnog otpora s poznatim induktivitetom i djelatnim otporima, odn. kapacitetima i djelatnim otporima. Ravnoteža mosta redovno se podešava s dva elementa mosta (v. str. 603), a kao izvori obično se upotrebljavaju elektronički generatori frekvencije 800...1000 Hz.

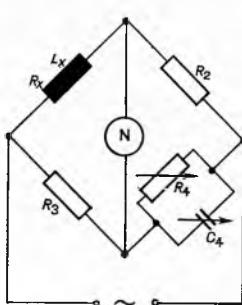
Most s promjenljivim induktivitetom (sl. 37). Ravnoteža mosta postiže se istovremenim podešavanjem dviju veličina poznatog promjenljivog



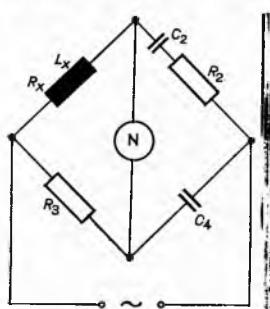
Sl. 37. Most s promjenljivim induktivitetom



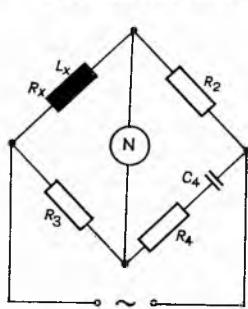
Sl. 38. Most sa dvije klizne žice



Sl. 39. Maxwellov most



Sl. 40. Owenov most



Sl. 41. Hayov most

induktiviteta L_2 otpora R_2'' . Uvjeti ravnoteže jesu:

$$R_x = R_2 R_3 / R_4 \quad \text{i} \quad L_x = L_2 R_3 / R_4,$$

gdje je $R_2 = R_2' + R_2''$.

Most sa dvije klizne žice (sl. 38) pogodan je za mjerjenje induktiviteta s faktorom dobrote znatno većim od jedan, tj. $\frac{\omega L_x}{R_x} \gg 1$.

Ravnoteža se uspostavlja pomicanjem kliznika na jednoj i drugoj kliznoj žici:

$$R_x = (R_2'' + R_2) \frac{R_3}{R_4} - R_1' \quad \text{i} \quad L_x = L_2 \frac{R_3}{R_4}.$$

Maxwellov most (sl. 39) pogodan je za mjerjenje induktiviteta s velikim faktorom dobrote. Iz uvjeta ravnoteže dobiva se:

$$R_x = R_2 \frac{R_3}{R_4}, \quad L_x = C_s R_2 R_3.$$

Ravnoteža mosta najlakše se postiže ako se za promjenljive elemente odaberu C_4 i R_4 . Međutim, kako je izrada djelatnih otpornika jednostavnija, za promjenljive elemente odabiraju se R_4 i R_2 ili R_3 .

Owenov most (sl. 40) upotrebljava se naročito za mjerjenje induktiviteta svitaka s malim faktorom dobrote. Nepoznati induktivitet L_x dobije se na taj način da se most dovede u ravnotežu pomoću poznatih djelatnih otpora i kapaciteta. Djelatni otpor svitka R_x i induktivitet svitka L_x izračunavaju se iz jednadžbi:

$$R_x = R_3 \frac{C_4}{C_2} \quad \text{i} \quad L_x = R_2 R_3 C_4.$$

Ravnoteža mosta se obično podešava djelatnim otporima u drugoj i trećoj grani.

Hayov most (sl. 41), za razliku od Maxwellovog mosta, ima u četvrtoj grani serijsku kombinaciju kapaciteta i otpora. Iz uvjeta ravnoteže dobije se:

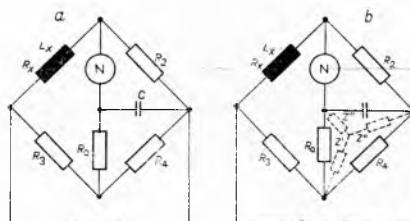
$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_4} - \frac{1}{1 + Q^2}, \quad L_x = \frac{R_2 R_3 C_4}{1 + \frac{1}{Q^2}},$$

gdje je $Q = \frac{\omega L_x}{R_x} = \frac{1}{\omega R_4 C_4}$ faktor dobrote svitka.

Iz izraza za R_x i L_x vidi se da treba poznavati frekvenciju izvora. Prilikom mjerjenja induktiviteta s velikim faktorom Q tačno poznavanje frekvencije nije potrebno ($1/Q^2 \ll 1$).

Iz praktičkih razloga podešava se ravnoteža otpornicima R_4 i R_3 ili R_2 .

Andersenov most (sl. 42 a) odstupa od uobičajenih oblika Wheatstoneovog mosta sa četiri grane. Pretvorbom trokuta otpora



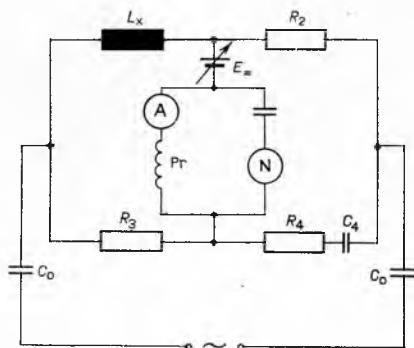
Sl. 42. Andersenov most

u zvijezdu (sl. 42 b) dobije se uobičajeni oblik Wheatstoneovog mosta. Uvjet ravnoteže glasi:

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_4}, \quad L_x = C R_2 \left[R_0 \left(1 + \frac{R_3}{R_4} \right) + R_3 \right].$$

Mjerenje diferencijalnog induktiviteta svitaka kroz koje protjeće istovremeno istosmjerna i izmjenična struja provodi se na više načina, a najčešće mosnim metodama, npr. Hayovim mostom (sl. 43). Podešavanje ravnoteže mosta ne utječe na veličinu istosmjerne struje ako pri tome otpor R_3 ostaje konstantan. Promjenom napona izvora u dijagonalni može se podešavati struja predmagnetiziranja, koja se mjeri ampermeterom A. Kondenzatori

kapaciteta C_0 sprečavaju prolaz istosmjerne struje u izvor izmjeničnog napona, a prigušnica P_r u seriji s ampermeterom smanjuje izmjeničnu komponentu struje kroz njega.



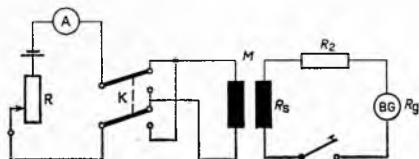
Sl. 43. Mjerenje diferencijalnog induktiviteta Hayovim mostom

Mjerenje međuinduktiviteta. Metodama za mjerenje induktiviteta može se pomoći dva mjerena odrediti i međuinduktivitet (M) koji se javlja između dva namota, npr. međuinduktivitet između primarnog i sekundarnog namota transformatora. Za prvo mjereno spaja se namot s induktivitetom L_1 u seriju s drugim namotom koji ima induktivitet L_2 , i to tako da se njihovi magnetski tokovi medusobno potpomažu, i izmjeri se zajednički induktivitet (L') takva sklopa. U tom slučaju iznosi: $L' = L_1 + L_2 + 2M$. Pri drugom mjerenu namoti se spajaju u seriju ali u obratnom smislu, tako da se njihovi magnetski tokovi medusobno slabe. Izmjereni ukupni induktivitet (L'') iznosi u tom slučaju: $L'' = L_1 + L_2 - 2M$. Iz rezultata ovih mjerena, koja se mogu provesti nekim mernim mostom za izmjeničnu struju ili nekom drugom metodom za mjerenu induktivitetu, može se izračunati međuinduktivitet pomoći izraza:

$$M = \frac{L' - L''}{4},$$

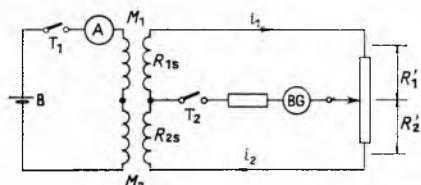
koji je izведен iz naprijed pomenutih dviju jednadžbi za L' i L'' .

Mjerenje međuinduktiviteta balističkom metodom prikazuje sl. 44. Jedan od namota međuinduktiviteta priključi se preko komutatora K na istosmjerni izvor napona. Struja koja teče kroz namot očita se na ampermetu A. Na drugi namot priključi se preko otpora R_2 balistički galvanometar. Otpor R_2 odabere se tako



Sl. 44. Mjerenje induktiviteta balističkom metodom. A ampermeter, K komutator, R otpornik za podešavanje struje, M međuinduktivitet, BG balistički galvanometar

da ukupni otpor vanjskog kruga ($R_2 +$ otpor namota) bude jednak graničnom otporu R_a balističkog galvanometra radi postizanja aperiodskog gibanja (str. 599). Promijeni li se pomoći komutatora K smjer struje I u primarnom namotu, poteći će



Sl. 45. Mjerenje međuinduktiviteta u mosnom spoju balističkim galvanometrom. B baterija, T₁ i T₂ tipke, A ampermeter, M₁ i M₂ međuinduktiviteti, R_{1s} i R_{2s} otpori sekundarnih namota međuinduktiviteta, BG balistički galvanometar

kroz galvanometar otpora R_g naboju $Q = \frac{2 M I}{R_a + R_g}$. Otklon galvanometra a bit će proporcionalan naboju, pa uz poznatu balističku konstantu C_B galvanometra mjereni međuinduktivitet iznosi:

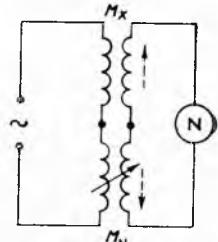
$$M = \frac{C_B (R_g + R_a) a}{2 I}.$$

Upotreboom *mosnog spoja* (sl. 45) mogu se postići tačniji rezultati. Promjenom struje u serijskom spoju primarnih namota nepoznatog međuinduktiviteta M_1 i poznatog (etalona) međuinduktiviteta M_2 , inducirati će se u sekundarnim namotima naponi koji će protjerati određenu količinu elektriciteta kroz otpore R'_1 i R'_2 i galvanometar. Kod određenog omjera otpora R'_1 i R'_2 može se postići da promjena primarne struje ne izazove otklon galvanometra. U tom slučaju vrijedi:

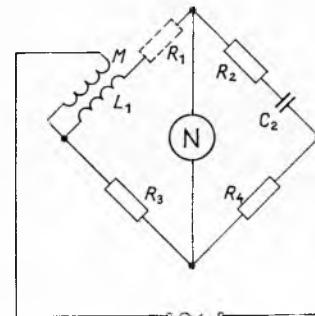
$$M_1 = M_2 R_1 / R_2,$$

gdje je $R_1 = R_{1s} + R'_1$ i $R_2 = R_{2s} + R'_2$.

Metoda oponicije (sl. 46) omogućuje mjerenu međuinduktiviteta primjenom poznatog promjenljivog međuinduktiviteta M_N . Kroz serijski spoj primarnih namota poznatog i nepoznatog međuinduktiviteta teče izmjenična struja. Sekundarni namoti spojeni su također u seriju, ali tako da se inducirani naponi suprotstavljaju jedan drugom. Nulindikator priključen na slobodne krajeve sekundara pokazat će nulu kad su naponi inducirani u oba sekundarna namota jednakni. Tada je: $M_x = M_N$.



Carrey-Fosterov most (sl. 47) sastoji se od međuinduktiviteta M sa sekundarnim samoinduktivitetom L_1 i djelatnim otporom R_1 , te otpornika otpora R_2 , R_3 , R_4 i kapaciteta C_2 . Ravnoteža



Sl. 47. Carey-Fosterov most za mjerenu međuinduktiviteta

mesta postiže se kad je $U_1 = U_3$ i $U_2 = U_4$:

$$I_1 (R_1 + j \omega L_1) - I_2 j \omega M = I_3 R_3$$

$$I_1 \left(R_2 - j \frac{1}{\omega C_2} \right) = I_3 R_4.$$

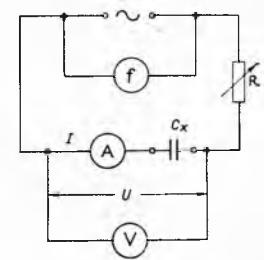
Sredivanjem i dijeljenjem prve jednadžbe s drugom dobije se uz $R_3 \approx 0$:

$$M = C_2 R_1 R_4, \quad \text{i} \quad L_1 = M \left(1 + \frac{R_2}{R_4} \right).$$

Mjerenje kapaciteta. Mjerenje kapaciteta metodom UI provodi se spojem prema sl. 48. Uz napon sinusnog oblika i uz pretpostavku da kondenzator ima neznatne gubitke, približno vrijedi:

$$C_x = \frac{I}{\omega U},$$

gdje znači: C_x nepoznati kapacitet, I struju kroz kondenzator, U napon i ω kružnu frekvenciju.



Sl. 48. Određivanje kapaciteta mjeranjem napona i struje

Mjerjenje kapaciteta balističkim galvanometrom uspoređivanjem kondenzatora nepoznatog kapaciteta C_x i kondenzatora poznatog kapaciteta C_N (sl. 49). Koristeći preklopke P_1 i P_2 najprije se oba kondenzatora nabiju iz baterije. Zatim se prazni preko balističkog galvanometra kondenzator nepoznatog kapaciteta C_x koji treba izmjeriti i etalonski kondenzator poznatog kapaciteta C_N . Ako se pri izbijanju mjereneog kondenzatora dobio otklon a_x , a pri izbijanju etalonskog kondenzatora otklon a_N , vrijednost mjereneog kapaciteta iznosi:

$$C_x = C_N \frac{a_x}{a_N}.$$

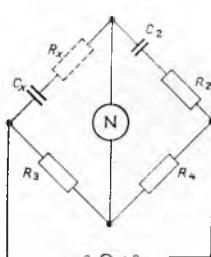
Sl. 49. Mjerjenje kapaciteta uspoređivanjem

Wienov (Sautyjev) most (sl. 50) omogućuje kao i ostali mostovi određivanje nepoznatog kapaciteta (C_x) i faktora gubitaka ($\tan \delta$). Predoči li se nesavršeni kondenzator serijskom kombinacijom kapaciteta C_x i otpora R_x , vrijedi, kad se uspostavi ravnoteža, jednadžba:

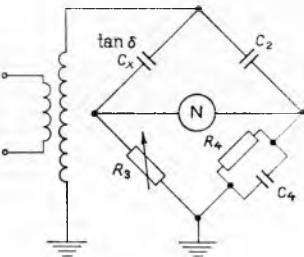
$$\left(R_x + \frac{1}{j\omega C_x} \right) R_4 = \left(R_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \right) R_3,$$

iz koje se dobije:

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_4}; \quad C_x = C_2 \frac{R_4}{R_3}; \quad \tan \delta = \omega R_2 C_2.$$



Sl. 50. Wienov most



Sl. 51. Scheringov most

Sheringov most (sl. 51) prvenstveno se upotrebljava za mjerjenje faktora gubitaka izolacionih materijala i električne opreme (kabela, strojeva, aparata itd.) kod viših napona, što omogućava uvid u kvalitet izolacije u njezinu ovisnost o naponu. U drugoj grani mosta nalazi se etalonski kondenzator C_2 zanemarljivog malog faktora gubitaka. Napon se na most priključuje tako da se elementi koji se reguliraju (R_3 i C_4) i nulindikator nalaze na neznatom naponu prema zemlji. Iz uvjeta ravnoteže:

$$\left(R_x + \frac{1}{j\omega C_x} \right) - \frac{R_4}{1 + j\omega R_4 C_4} = \frac{R_3}{j\omega C_2}$$

dobije se:

$$R_x = R_3 \frac{C_4}{C_2}; \quad C_x = C_2 \frac{R_4}{R_3}; \quad \tan \delta = \omega R_4 C_4.$$

Osim navedene osnovne sheme postoji više modifikacija Scheringova mosta za mjerjenje kondenzatora s malim, odnosno velikim kapacitetom.

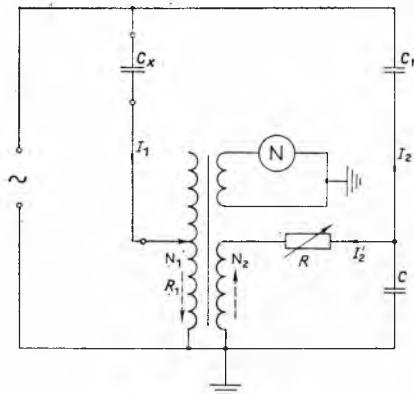
Glynnov most (sl. 52) izvedba je u kojoj donji dio mosta čini posebni strujni transformator s odvojcima. Kroz prvi namot N_1 sa mnogo odvojaka teče struja kondenzatora nepoznatog kapaciteta C_x . Drugi namot N_2 ima samo nekoliko odvojaka i kroz njega teće struja etalonskog kondenzatora, a na treći namot priključen je nulindikator. Prvi i drugi namot suprotno su montani, pa ako se podešavanjem broja zavoja prvog namota i promjenljivim otporom R postigne jednakost amperzavoja $N_1 I_1 = N_2 I_2$, neće se inducirati napon u trećem namotu i nulindikator će biti bez otklona. Iz uvjeta ravnoteže se dobije:

$$C_x = C_N \frac{N_2}{N_1} \quad \text{i} \quad \tan \delta = \omega R (C_N + C) - \omega R_1 C_N \frac{N_2}{N_1}.$$

Redovno je $C_N \ll C$ i $R_1 \ll R$ pa tangens kuta gubitaka (faktor gubitaka) iznosi:

$$\tan \delta = \omega R C.$$

Glynnov most se odlikuje jednostavnom izvedbom i malim utjecajem rasipnih kapaciteta čvorista.



Sl. 52. Glynnov most

Mjerjenje kapaciteta balističkim galvanometrom i mehaničkim prekidačem omogućava uz odgovarajuću izvedbu pojedinih elemenata tačnost od $\pm 0,01\%$. Tako velika tačnost postiže se određivanjem kapaciteta na osnovu poznatih djelatnih otpora i frekvencije. Kondenzator nepoznatog kapaciteta C_x nabija se na određeni istosmjerni napon kad je prekidač u položaju 1 (sl. 53 a). Kad je prekidač u položaju 2, kondenzator se izbjija. Kroz galvanometar teće određena količina elektriciteta u jednom ili drugom smjeru, ovisno o položaju prekidača. Označe li se te količine elektriciteta sa Q_1 odn. Q_2 , galvanometar se neće otkloniti kad je $Q_1 = Q_2$. Odaberu li se otpori R_2 i R_3 daleko veći od otpora R_1 i R_g , struja I kroz most, kad je prekidač u položaju 2, iznosit će $I \approx U/R_2$, a struja kroz galvanometar iznosit će $I_g \approx IR_1/R_3 = U R_1/R_2 R_3$. Kad je prekidač u položaju 1, kondenzator se nabija preko galvanometra (jer je $R_3 \gg R_1$ i R_g) praktički na napon baterije U , pa je $Q_1 = C_x U$.

U toku jednog ciklusa proći će kroz galvanometar u jednom smjeru naboј označen površinama S_1' i S_1'' na sl. 53 b, a u drugom smjeru naboј koji odgovara površini S_2 . Galvanometar se neće otkloniti ako je $S_1' + S_1'' = S_2$. Doda li se jednoj i drugoj strani jednadžbe površina S_2 , bit će

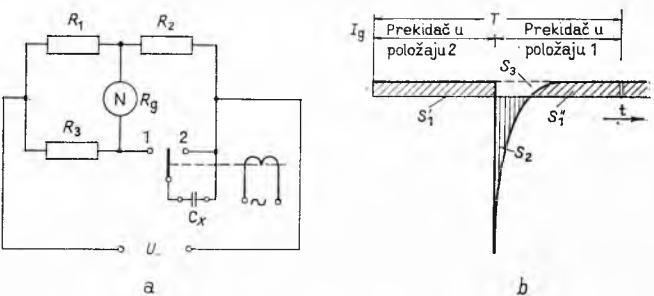
$$S_1' + S_1'' + S_3 = I_g T \quad \text{i} \quad S_2 + S_3 = U C_x, \quad \text{pa slijedi:}$$

$$I_g = \frac{U R_1}{R_2 R_3} = U C_x f,$$

i odavde:

$$C_x = \frac{R_1}{f R_2 R_3}.$$

Sa T je označeno trajanje jedne periode a sa f frekvencija izvora kojim se napaja svitak prekidača.



Sl. 53. Mjerjenje kapaciteta balističkim galvanometrom i mehaničkim prekidačem. a Shema spoja, b ovisnost struje galvanometra o vremenu

Tačnijim izvodom, bez zanemarenja otpora, dobije se:

$$C_x = R_1 F/f R_2 R_3,$$

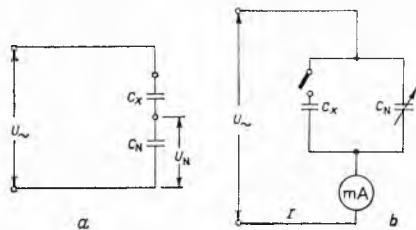
gdje je: $F = 1 - a b - a R_b / R_3 - b R_g / R_2$;

$$a = \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_b}; \quad b = \frac{R_1}{R_1 + R_3 + R_g}.$$

Mjerenje vrlo malih kapaciteta (5 pF i manje) može se medu ostalim provesti na dva načina navedena u nastavku. Prvi je način da se na serijski spoj C_x i C_N (sl. 54 a) priključi visoki izmjenični napon U i elektroničkim voltmetrom izmjeri pad na naponu U_N na C_N . Nepoznati kapacitet iznosi onda:

$$C_x = \frac{U_N}{U - U_N} C_N.$$

Po drugom načinu, primjenom metode zamjene (sl. 54 b) visoki napon frekvencije f priključen je na paralelni spoj C_x i C_N . Mi-

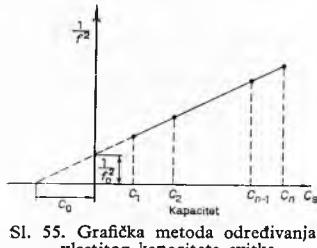


Sl. 54. Mjerenje vrlo malih kapaciteta: a mjerenjem pada napona na serijski dodanom kondenzatoru poznatog kapaciteta, b metoda zamjene

li ampermertom s termopretvaračem izmjeri se struja I , pa se zatim C_x isključi. Povećanjem kapaciteta poznatog promjenljivog kondenzatora podesi se struja na prijašnju vrijednost I . Nepoznati je kapacitet onda jednak promjeni kapaciteta ΔC_N :

$$C_x = \Delta C_N.$$

Mjerenje vlastitog kapaciteta svitaka izvodi se tako da se paralelno svitku induktiviteta L spoji promjenljivi kondenzator poznatog kapaciteta C_1 . Ovaj titrani krug priključi se na visokofrekventni generator. Na nekoliko različitih frekvencija titrani se krug pomoću promjenljivog kondenzatora podesi na rezonanciju i za svaku se frekvenciju očita na kondenzatoru pripadna vrijednost kapaciteta (C_1, C_2 itd.). Na osnovu izraza za rezonanciju paralelnog titravnog kruga:



Sl. 55. Grafička metoda određivanja vlastitog kapaciteta svitka

$$\text{dobiva se } 1/f^2 = F(C_1) \text{ i pomoću toga nacrti se graf prikazan na sl. 55. Odsječak na osi ordinata jednak je recipročnoj vrijednosti kvadrata vlastite rezonantne frekvencije svitka, a odsječak na osi apscisa jednak je vlastitom kapacitetu } (C_0) \text{ svitka.}$$

Da je graf $1/f^2 = F(C_1)$ pravac može se jednostavno dokazati ako se zna da rezonancija nastupa kad je:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad \text{ili} \quad 2 \pi f L = \frac{1}{2 \pi f (C + C_0)}.$$

Srednjem dobije se:

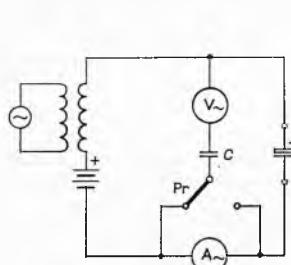
$$1/f^2 = 4 \pi^2 L C + 4 \pi^2 L C_0 = k(C + C_0),$$

što predstavlja jednadžbu pravca.

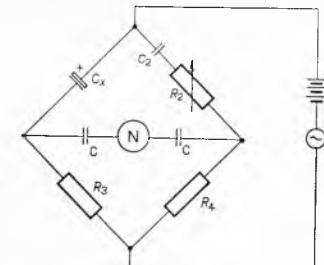
Mjerenje kapaciteta elektrolitskih kondenzatora. Na elektrolitske kondenzatore mora se pri mjerenu kapaciteta, zbog njihove konstrukcije, pored izmjeničnog napona priključiti i istosmjerni. Mjerenje kapaciteta elektrolitskih kondenzatora *metodom UI* izvodi se prema shemi na slici 56. Voltmetrom i ampermertrom za izmjeničnu struju mjeri se napon i struja ispitivanog kondenzatora. Iz dobivenih podataka određuje se kapacitet pomoću jednadžbe:

$$C_x = \frac{I}{\omega U}.$$

Prolaz istosmrne struje kroz voltmeter sprečava kondenzator velikog kapaciteta C čija je reaktancija zanemarljiva prema otporu voltmetra. Preklopkom Pr može se voltmeter prebacivati ispred ili iza ampermetera i tako konstatirati da li postoje eventualne sistematske pogreške uslijed potroška ampermetera.



Sl. 56. Određivanje kapaciteta elektrolitskih kondenzatora mjerom struje i napona



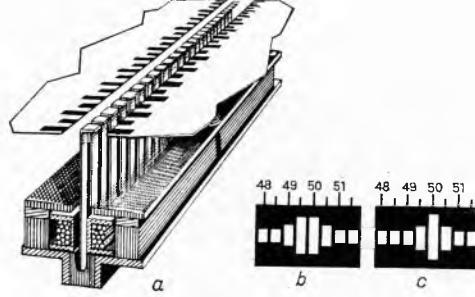
Sl. 57. Mjerenje kapaciteta elektrolitskih kondenzatora Wienovim mostom

Tačniji rezultati dobivaju se *mosnim metodama*. Najčešće se u tu svrhu upotrebljava Wienov most, koji se u ovom slučaju napaja istosmernim i izmjeničnim naponom (sl. 57). Nulindikator se zaštićuje od istosmrne struje kondenzatorima C . Uvjeti ravnoteže jednaki su onima koji vrijede za normalni Wienov most. Veći kapaciteti mjeri se izvedbom Wienovog mosta koja u drugoj grani umjesto serijske kombinacije ima paralelnu kombinaciju kapaciteta C_2 i otpora R_2 .

Mjerenje frekvencije. Metoda kojom će se mjeriti neka frekvencija ovisi o visini mjerene frekvencije, zahtijevanoj tačnosti itd.

Mjerilo frekvencije s jezičima mnogo se upotrebljava na području niskih frekvencija. Njegov mjeri sistem sastoji se od niza na jednom kraju učvršćenih čeličnih traka izrađenih u obliku jezičaka koji titraju pod utjecajem elektromagnetskog priključenog na mjereni izvor (sl. 58 a). Drugi kraj jezičaka ima zastavice duge 3 do 5 mm olijene bijelom bojom da bi se bolje uočile. Svaki jezičac rezonira na drugoj frekvenciji, koja se obično razlikuje od frekvencije susjednog jezička za 0,5 Hz. Kad se instrument priključi na izvor, pojačano titraju jezičci čija je frekvencija rezonancije jednak ili vrlo blizu dvostrukoj frekvenciji izvora. Titranje daje utisak produljenja bijele zastavice (sl. 58 b i c). Pomoću ovih instrumenata mogu se mjeriti frekvencije od 10 do 1500 Hz s tačnošću 0,2...1%.

U instrumentima s predmagnetiziranjem



Sl. 58. Mjerilo frekvencije s jezičima. a) Izgled mjerila, b) jezički pokazuju 49,75 Hz i c) 50 Hz

(permanentnim magnetom ili istosmernom strujom napajanim elektromagnetom) vlastita frekvencija jezička koji titra izravno odgovara mjerenoj frekvenciji.

Mjerilo frekvencije s kazaljkom omogućava direktno očitanje i registriranje mjerene frekvencije. Mjerno područje im je obično usko, npr. 49 do 51 Hz, ili 49,9 do 50,1 Hz i sl. Zasnivaju se na različitim principima djelovanja, a koriste se kvocijentnim mjerilima elektrodinamičkog i indupcionog tipa, instrumentima s unakrsnim svicima i instrumentima s pomicnim svitkom. Pojednostavljena schema mjerila frekvencije s unakrsnim svicima prikazana je na sl. 59 a. Jedan svitak S_1 mernog sistema priključen je preko ispravljača i kondenzatora C na izvor mjerene nepoznate

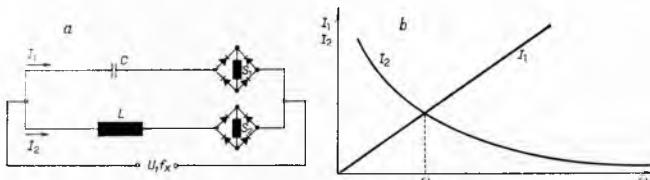
frekvencije f_x . Drugi svitak S_2 istog sistema priključen je na izvor mjerene frekvencije preko ispravljača i prigušnice induktiviteta L .

Struje kroz jedan i drugi svitak iznose: $I_1 = U \omega C$; $I_2 = \frac{1}{\omega L}$.

Frekventna ovisnost struja prikazana je na sl. 59 b. Kako otklon instrumenta s unakrsnim svicima ovisi o omjeru struja kroz svitke, bit će:

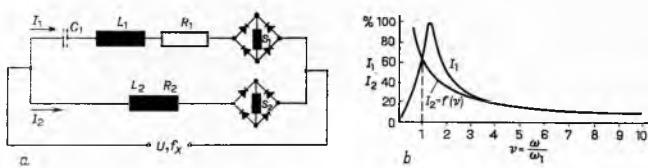
$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f(CL\omega^2) = kf(\omega^2).$$

Otklon α je prema tome proporcionalan kvadratu frekvencije.



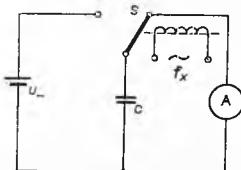
Sl. 59. Mjerilo frekvencije s unakrsnim svicima. a) Pojednostavljena shema mjerila frekvencije, b) ovisnost struja I_1 i I_2 o frekvenciji

Ako mjereni izvor ne daje sinusni napon, zbog utjecaja viših harmonika omjeri struja bit će drugačiji, a s njima i otkloni. Utjecaj viših harmonika smanjuje se spojem prema sl. 60. Rezonantna frekvencija grane u kojoj je serijska kombinacija kapaciteta, induktiviteta i otpora bira se tako da su pri višim frekvencijama impedancije obaju krugova praktički jednake. Mjerno područje bira se oko ω_1 , gdje struja u jednoj grani raste a u drugoj pada.

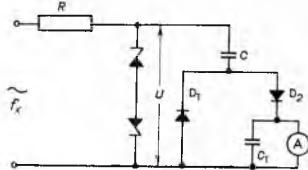


Sl. 60. Mjerilo frekvencije s unakrsnim svicima (poboljšana izvedba). a) Shema spoja, b) ovisnost struja I_1 i I_2 o frekvenciji

Mjerilo frekvencije s mehaničkim prekidačem (sl. 61). Djelovanjem izmjenične struje čija se frekvencija f_x mjeri pokreće se prekidač S , koji naizmjence priključuje kondenzator C na istosmerni napon U_- i na instrument s pomičnim svitkom. Srednja vrijednost struje kroz instrument bit će proporcionalna frekvenciji: $I_{sr} = -C U f$. Takvi se instrumenti baždare izravno u hercima (Hz).



Sl. 61. Mjerilo frekvencije s mehaničkim prekidačem



Sl. 62. Mjerilo frekvencije sa Zenerovim diodama

Umjesto prekidača se u novije vrijeme upotrebljavaju spojevi s poluvodičkim ispravljačima (sl. 62). Pomoću Zenerovih dioda dobije se napon konstantne amplitude U . Kondenzator kapaciteta C tokom jedne poluperiode nabija se preko diode D_1 , a tokom druge poluperiode izbija se preko diode D_2 i instrumenta s pomičnim svitkom. Srednja vrijednost struje kroz instrument iznosi $I_{sr} = 2C U f$. Mjerni opseg ovakvih instrumenata počinje sa $f = 0$. Obično se izrađuju sa više mjernih opsega. Upotreboom spojeva s dvjema frekventno ovisnim granama mogu se dobiti mjerila frekvencije za usko područje frekvencija, npr. 49 do 51 Hz. Tačnost takvih mjerila frekvencije može biti bolja od 0,2%.

Mostovi za mjerjenje frekvencije upotrebljavaju se za laboratorijska mjerjenja tonskih i nižih radio-frekvencija. **Robinsonov most** (sl. 63) je najčešće upotrebljavani most za mjerjenje frekvencije.

Uvjet je ravnoteže:

$$R_4 \left(R_1 + \frac{1}{j \omega C_1} \right) = \frac{R_2 R_3}{1 + j \omega C_2 R_2}.$$

Nakon sređivanja se dobije:

$$\omega^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \quad \text{i} \quad R_1 R_4 + R_1 R_2 \frac{C_2}{C_1} = R_2 R_3.$$

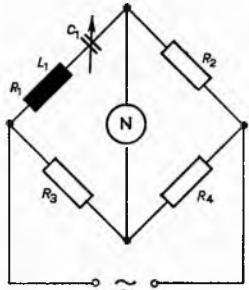
Odbere li se $R_1 = R_2 = R$ i $C_1 = C_2 = C$, slijedi:

$$\omega = 2\pi f_x = \frac{1}{RC} \quad \text{i} \quad 2R_4 = R_3$$

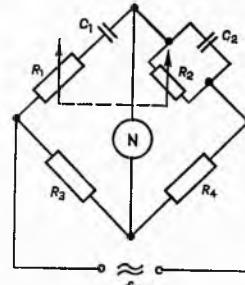
$$\text{a iz toga: } f_x = \frac{1}{2\pi RC}.$$

Rezonantni most (sl. 64) također se upotrebljava za laboratorijska mjerena frekvencije. Uvjet ravnoteže glasi:

$$\left(R_1 + j \omega L_1 - \frac{j}{\omega C_1} \right) R_4 = R_2 R_3.$$



Sl. 63. Robinsonov most



Sl. 64. Rezonantni most

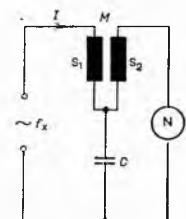
U momentu rezonancije vrijedi: $\omega L_1 = \frac{1}{\omega C_1}$, pa se dobije:

$$R_1 R_4 = R_2 R_3, \text{ odnosno } \omega^2 = \frac{1}{L_1 C_1} \quad \text{i iz toga:}$$

$$f_x = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}.$$

Osim za mjerjenje frekvencije, ovaj se most može upotrijebiti za mjerjenje kapaciteta ili induktiviteta ako je frekvencija poznata. **Campbellov most** (sl. 65) može služiti za mjerjenje frekvencije, a kad je frekvencija poznata, za mjerjenje kapaciteta ili međuinduktiviteta. Ravnoteža se postiže mijenjanjem promjenljivog međuinduktiviteta M tako da napon inducirani u namotu S_2 bude jednak po veličini a suprotan po fazi padu napona na kondenzatoru kapaciteta C . Nepoznata frekvencija odredi se iz izraza:

$$f_x = \frac{1}{2\pi\sqrt{CM}}.$$



Sl. 65. Campbellov most

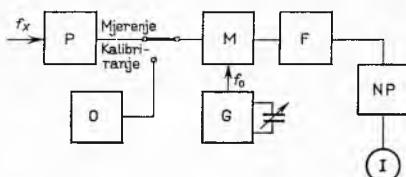
Krugovi u rezonanciji (valomjeri) upotrebljavaju se za brzo i jednostavno mjerjenje frekvencija do stotine megaherca, kad se ne zahtijeva velika tačnost. **Apsorpcioni valomjeri**, kojim se najčešće mjeri frekvencije od najnižih radio-frekvencija pa do ~ 100 MHz, sastoji se od zavojnice, promjenljivog kondenzatora i indikatora rezonancije (instrumenta s termopretvaračem ili kristalnom diodom). Prilikom mjerjenja valomjer se slabo spregne s izvorom čija se frekvencija mjeri i dotele ugada dok indikator ne pokaže maksimalni otklon kazaljke. Budući da se promjenljivim zračnim kondenzatorom može pokriti samo uže frekvencijsko područje, mjerni opsezi se mijenjaju ukapčanjem odgovarajuće zavojnice.

Osim valomjera s kontinuiranim elementima (zavojnicama i kondenzatorima), upotrebljavaju se za mjerjenje frekvencija do 1000 MHz valomjeri s kontinuirano raspoređenim parametrima (*Lecherov vod*). Prilikom mjerjenja još viših frekvencija upotrebljavaju se šuplji rezonatori. **Grid-dip-mtar** je mjerni uredaj po-

ELEKTRIČNA MJERENJA

moću kojeg se može odrediti rezonantna frekvencija titrajnog kruga nekog uređaja koji nije u pogonu. Sastoje se od LC-oscilatora koji u krugu rešetke elektronke ima indikator-mikroampermeter. Mjerjenje se provodi tako da se zavojnica grid-dip-metra primakne zavojnici ispitivanog titrajnog kruga i podešavanjem kapaciteta mijenja frekvenciju oscilatora dok indikator ne pokaže minimum struje rešetke. Frekvencija očitana na skali oscilatora jednaka je rezonantnoj frekvenciji titrajnog kruga. Grid-dip-metar se pored toga može upotrijebiti kao prijemnik ako se umjesto instrumenta priključi slušalica, kao amplitudno modulirani izvor poznate frekvencije, itd.

Mjerjenje frekvencije heterodinskim mjerilom. Heterodinsko mjerilo sastoje se od generatora G (oscilatora) poznate i promjenljive frekvencije, sklopa za miješanje M, filtera F, pojačala NP i indikatora I (sl. 66). Naponi nepoznate frekvencije f_x i poznate frekvencije f_0 dovode se u sklop za miješanje. Na izlazu iz sklopa za miješanje filter odvaja napon čija je frekvencija jednaka razlici nepoznate i poznate frekvencije. Podešavanjem promjenljive frekvencije može se postići da je $f_x - f_0 = 0$, što se registriira indikatorom (slušalicom, magičnim okom, osciloskopom i sl.).

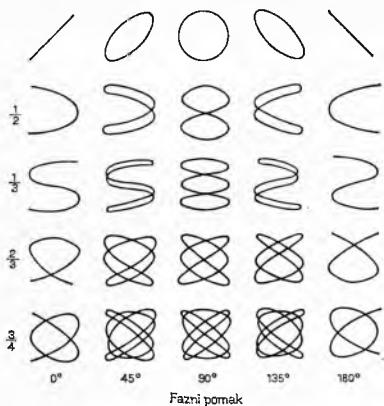


Sl. 66. Blok-sHEMA heterodinskog mjerila frekvencije. P pojačalo, O kvarcni oscilator, M stupanj za miješanje, G generator poznate frekvencije (heterodin), F filter, NP niskofrekventno pojačalo, I indikator

Generator promjenljive frekvencije f_0 konstruiran je tako da mu frekvencija što manje ovisi o temperaturi, naponu napajanja, te starenju elektronki i drugih sastavnih dijelova. Bržljivom izvedbom može se postići u kraćim vremenskim razmacima relativna promjena frekvencije manja od 10^{-5} .

Radi povećanja tačnosti provjerava se skala generatora i vrši kalibriranje frekvencije f_0 pomoću ugradenog kvarcnog oscilatora O, tako da se postiže pogreška kalibracije skale manja od 0,01%.

Mjerjenje frekvencije katodnim osciloskopom. Katodni osciloskop (v. str. 602) često se upotrebljava kao indikator prilikom mjerjenja frekvencije metodom uspoređivanja nepoznate frekvencije s poznatom. Kako postoji više načina da se katodni osciloskop primjeni kao indikator prilikom uspoređivanja, ovdje će biti spomenute samo relativno jednostavne metode.



Sl. 67. Lissajousove figure za nekoliko omjera frekvencija kod raznih faznih pomaka

Ako se sinusni naponi poznate i nepoznate frekvencije čiji je odnos racionalan dovedu na parove otklonskih pločica osciloskopa, na zastoru se dobiju mirujuće krivulje koje se nazivaju *Lissajousove figure*. Njihov oblik ovisi o odnosu frekvencija i faznom pomaku priključenih naponu. Na sl. 67 prikazane su neke

Lissajousove figure za razne odnose frekvencija i razne fazne pomake. Odnos frekvencija napona priključenog na pločice za vertikalni otklon (f_y) i frekvencije napona priključenog na pločice za horizontalni otklon (f_x) određuje se iz omjera dodirnih tačaka tangenti povučenih na figure u smjeru osi x i y (sl. 67), a pri faznim pomacima gdje nastupa preklapanje krivulje (npr. $0^\circ, 180^\circ$) iz omjera broja sjecišta sa sekantama povučenim paralelno sa osima x i y .

$$\frac{f_y}{f_x} = \frac{\text{broj dodirnih tačaka tangente u smjeru } x}{\text{broj dodirnih tačaka tangente u smjeru } y}.$$

Ovom metodom mogu se odrediti omjeri frekvencija do 10. Metodom svjetlog i tamnog upravljanja na kružnoj bazi mogu se uspoređivati frekvencije struje ili napona dvaju izvora ako odnos njihovih frekvencija nije veći od 30. Izvor napona niže frekvencije priključi se preko odgovarajućeg sklopa RC na pločice za horizontalni i vertikalni otklon snopa elektrona. Time se postiže između napona na horizontalnim i vertikalnim otklonskim pločicama fazni pomak od 90° , zbog čega se na zastoru katodne cijevi pojavljuje kružnica, tzv. kružna baza. Dovoljno visoki napon iz drugog izvora, koji ima višu frekvenciju, priključi se na Wehneltov cilindar (str. 602). Intenzitet snopa elektrona i jakost svjetla na kružnoj bazi mijenjat će se zbog toga u ritmu frekvencije drugog izvora. Usljed toga se na zastoru cijevi dobiva niz kružno poredanih crtica ili tačkica. Omjer više frekvencije prema nižoj jednak je broju svjetlih tačaka ili crtica.

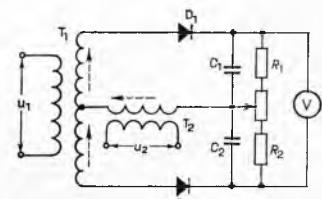
Digitalna mjerila frekvencije mjeri frekvenciju vrlo tačno i na jednostavan način brojanjem broja perioda u jedinici vremena (v. str. 609).

Mjerjenje faznog pomaka. Po pravilu se pod faznim pomakom razumijeva fazni pomak između dvije izmjenične veličine iste frekvencije. Za mjerjenje faznog pomaka između dva napona, dvije struje ili napona i struje postoje mnoge metode. Ovdje će biti spomenute samo one koje se najčešće upotrebljavaju.

Iz faktora snage koji se mjeri pomoću voltmetra, ampermetra i vatmetra ili mjerilima faktora snage određuje se fazni pomak u mrežama koje rade na industrijskoj frekvenciji.

Vektorimetar, tj. instrument s mehaničkim ispravljačem (v. str. 594), omogućuje određivanje faznog pomaka dvaju napona ili dviju struja industrijskih frekvencija na brz i jednostavan način. Fazni pomak očitava se na skali zaokretača faze ili na zaočretnoj glavi s tačnošću boljom od $\pm 1^\circ$.

Mjerilo faze s balansnim faznim detektorom (sl. 68) djeluje na principu superpozicije dvaju napona jednakih amplituda čiji se fazni pomak mjeri. Naponi u_1 i u_2 između kojih postoji fazni pomak φ dovode se na nelinearni element (vakuumsku ili poluvodičku diodu) preko transformatora T_1 i T_2 . Ako je U_m vrijednost napona (jednaka za oba napona), onda trenutni napon na diodi D_1 iznosi:



$$u_1 + u_2 = U_m [\sin \omega t + \sin (\omega t + \varphi)] =$$

$$= 2 U_m \left[\cos \left(\frac{\varphi}{2} \right) \sin \left(\omega t + \frac{\varphi}{2} \right) \right],$$

a na diodi D_2 :

$$u_1 - u_2 = 2 U_m \left[\sin \left(-\frac{\varphi}{2} \right) \cos \left(\omega t + \frac{\varphi}{2} \right) \right].$$

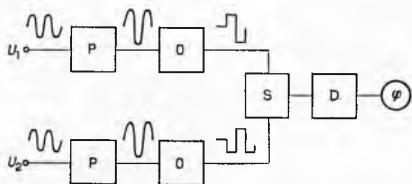
Uz odabrane vremenske konstante $C_1 R_1 = C_2 R_2 \gg T$, gdje je T perioda mjerjenih naponu, priključeni voltmeter mjerit će razliku naponâ na kondenzatorima C_1 i C_2 :

$$U_v = 2 U_m \left[\left(\cos \frac{\varphi}{2} \right) - \left(\sin \frac{\varphi}{2} \right) \right].$$

Uz konstantni napon obaju izvora otklon instrumenta proporcionalan je faznom pomaku. Pogreška u pokazivanju nastat će kad ulazni naponi nisu jednake amplitude i frekvencije.

Mjerila faze s formiranjem pravokutnih impulsa sastoje se od dva jednakata pojačala P i ograničivača O, sklopa za sumiranje ili

koincidentnog sklopa S, ispravljača D i mjernog instrumenta φ (sl. 69). Naponi između kojih se mjeri fazni pomak pojačavaju se u pojačalima, a zatim se u višestepenim ograničivačima odiseju vrhovi sinusoida, tako da na izlazu iz njih oba napona imaju pravokutni valni oblik konstantne amplitude. Oba napona do-



Sl. 69. Blok-sHEMA mjerila faze sa sklopom za sumiranje ili s koincidentnim sklopom. P pojačalo, O ograničivač, S sklop za sumiranje ili koincidentni sklop, D ispravljač, φ mjerni instrument

vode se na sklop S, čiji se izlazni napon ispravlja i dovodi na instrument. Ako je S sklop za sumiranje, napon je na njegovom izlazu jednak sumi ulaznih napona, a ako je S koincidentni sklop, na izlazu iz njega postoji napon samo tokom vremena kada su oba napona istog predznaka. U ova slučaja otklon instrumenta proporcionalan je faznom pomaku φ .

Pomoću osciloskopa može se mjeriti fazni pomak neposrednim istodobnim promatranjem oscilograma napona čiji se fazni pomak određuje, ili Lissajousovim krivuljama.

Istodobno se mogu promatrati dvije pojave ako se upotrijebi osciloskop sa dva mlaza, ili primjenom elektroničke preklopke (v. str. 603). U ova slučaja dobije se oscilogram kao na sl. 70. Poželjno je da su amplitude

Sl. 70. Oscilogram kod mjeranja faznog pomaka osciloskopom sa dva elektronska mlaza

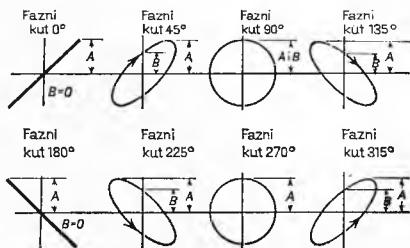
obaju posmatranih napona jednake. Fazni pomak se određuje mjeranjem duljina $O_1 O_2$ i $O_1 O'_1$:

$$\varphi = \frac{O_1 O_2}{O_1 O'_1} \cdot 360 \text{ (u stupnjevima).}$$

Dovođenjem dvaju fazno pomaknutih sinusnih napona iste frekvencije na horizontalne, odnosno vertikalne, otklonske pločice dobiva se na zastoru osciloskopa jednostavna Lissajousova krivulja (pravac, kružnica ili elipsa, sl. 71). Fazni pomak se određuje mjeranjem duljina A i B:

$$\sin \varphi = \pm \frac{B}{A}.$$

Iz slike se vidi da se iste krivulje dobiju za kuteve $\varphi \approx 360^\circ - \varphi$.



Sl. 71. Lissajousove krivulje dobivene priključkom dva sinusna napona iste frekvencije s različitim faznim pomakom

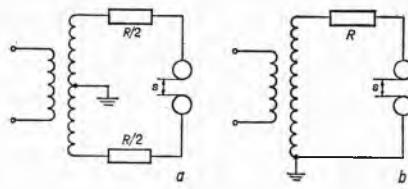
Jednoznačno se fazni pomak može odrediti ako se zna smjer kruženja elektronskog mlaza koji opisuje krivulju.

Visokonaponska mjerena

Visokonaponska mjerena tehnika obuhvaća osim problematike mjerena visokih napona i izvore potrebne za visokonaponska istraživanja.

Mjerena visokih napona provodi se: kuglastim iskrištim, mernim instrumentima s kazaljkom, elektrostatičkim instrumentima, rotirajućim voltmetrima i posebnim metodama.

Mjerena visokih napona kuglastim iskrištim zasniva se na činjenici da do probora kroz zrak između kugli dolazi kad je vrijednost priključenog napona jednaka ili veća od određene vrijednosti U_p . Konstrukcija i primjena kuglastih iskrišta definirani su propisima (npr. JUS N. A5.510). Dvije kuge koje sačinjavaju kuglasto iskrište mogu se spojiti na dva načina: simetrično ili nesimetrično prema zemlji. Kad je spoj simetričan (sl. 72 a) do probora kroz zrak između kugli dolazi kod nekog napona U_p bez obzira na njegov polaritet. Kod nesimetričnog spoja, pak (sl. 72 b), polaritet utječe na visinu probognog napona. Preskočni napon ovisi o razmaku kugli s i o njihovom promjeru D , a u manjoj mjeri o barometarskom pritisku i temperaturi zraka. Pri malim omjerima s/D ovisnost između preskočnog napona U_p i razmaka s gotovo je linearna, a pri većim omjerima s/D probogni napon raste sporije s razmakom s i ujedno utjecaj okolnih predmeta postaje sve veći. U standardima navodi se tačnost mjerena



Sl. 72. Sheme spoja kuglastog iskrišta. a) Simetrični spoj, b) nesimetrični spoj

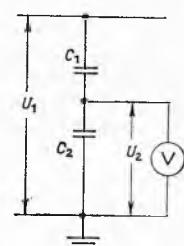
od $\pm 3\%$ za omjere $s/D \geq 0,5$; za veće se omjere tačnost ne navodi. Zbog toga se promjeri kugli moraju birati ovisno o veličini mjerene napone. Standardizirano je 12 promjera u području od 2 do 200 cm. Vrijednost probognog napona U_p za pojedini promjer kugli određuje se iz tablica koje su dobivene teoretskim i eksperimentalnim putem. Vrijednosti u tablicama navedene su za temperaturu zraka $20^\circ C$ i za atmosferski pritisak od 760 mm Hg, tj. pri relativnoj gustoći zraka d jednakoj jedinici.

Za drugu temperaturu i pritisak vrijednosti iz tablica treba množiti s relativnom gustoćom d zraka u tim novim okolnostima: Međutim, proporcionalnost između U_p i d vrijedi samo u području $0,95 < d < 1,05$; izvan tog područja vrijednosti za U_p dobivaju se pomoću faktora k koji se navodi u tablicama. Struje koje teku za vrijeme preskoka mogu među ostalim oštetići glatku površinu kugli i izazvati neugodne visokofrekventne oscilacije; zbog toga se ispred kugli dodaje zaštitni otpornik čiji otpor R ovisi o mjereni naponima. Osim kuglastih iskrišta upotrebljavaju se, ali rjeđe, iskrišta sa šiljcima i štapna iskrišta.

Instrumentima s kazaljkom može se također mjeriti visoki napon ako se on prethodno u odgovarajućem omjeru snizi. To se postiže npr. omskim, kapacitivnim i kapacitivno-omskim djeliteljima napona, nadalje serijskim otpornicima, mernim transformatorima i drugim uređajima.

Omski djelitelji napona izrađuju se od otporne žice malog temperaturnog koeficijenta i upotrebljavaju se za mjerena visokih istosmjernih, izmjeničnih i udarnih napona. Prilikom mjerena izmjeničnih i udarnih napona treba da parazitni induktivitet, vlastiti kapacitet i kapacitet prema zemlji budu što manji. Utjecaj kapaciteta prema zemlji smanjuje se zaštitnim prstenima i zaslonima različnih vrsta. Kako utjecaj parazitnih kapaciteta prema zemlji raste s otporom djelitelja, izbjegava se upotreba djelitelja s vrlo visokim otporom.

Kapacitivni djelitelji napona upotrebljavaju se pri mjerenu izmjeničnih i udarnih napona. Sastoje se od visokonaponskog kondenzatora kapaciteta C_1 i kondenzatora daleko većeg kapaciteta C_2 (sl. 73). Pomoću voltmetra zanemarljiva potroška može se izmjeriti efektivna vrijednost pada napona U_2 na kondenzatoru kapaciteta C_2 . Iz ovog napona i poznatih kapaciteta C_1 i C_2 može se izra-



Sl. 73. Mjerena napona kapacitivnim djeliteljem

čunati visoki napon U_1 iz jednadžbe:

$$U_1 = U_2 \left(1 + \frac{C_2}{C_1} \right).$$

Osim efektivne vrijednosti napona mogu se kapacitivnim dje-
liteljima uz dodatak ispravljača i kon-
denzatora C mjeriti *tjemene vrijednosti*.
Kondenzator C (sl. 74) nabija se preko
ispravljača na tjemenu vrijednost napona
koji vlada na kondenzatoru C_2 . Priklu-
čeni voltmetar malog potroška V mjeri
u tom slučaju tjemenu vrijednost napona.
Tjemena vrijednost visokog napona U_m može se odrediti i pomoću spoja
prikazanog na sl. 75, mjerjenjem srednje
vrijednosti ispravljene struje kondensa-
tora kapaciteta C . Ako je i momentana
vrijednost struje, t_1 trenutak početka jed-
ne poluperiode, a T trajanje jedne perio-
de, bit će srednja vrijednost struje kroz instrument s pomičnim
svitkom (A):

$$I_{sr} = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T/2} i dt.$$

Uz zanemarenje potroška instrumenata momentana vrijednost
mjerene napona iznosi $u = q/C$, zbog naboja q na kapacitetu C .

Deriviranjem napona u po t dobiva se: $\frac{du}{dt} = \frac{i}{C}$, pa uvrštenjem

jednadžbe $i = C \frac{du}{dt}$ u izraz za I_{sr} slijedi:

$$I_{sr} = \frac{C}{T} \int_{t_1}^{t_1+T/2} du = \frac{C}{T} (u_{t_1+T/2} - u_{t_1})$$

a odavde se dobije tjemena vrijednost napona
(sl. 75):

$$U_m = \frac{I_{sr}}{2fC},$$

gdje je frekvencija $f = 1/T$.

Upotrebom naponskih mjernih transformatora
mogu se pomoću instrumenata s kazaljkom
mjeriti naponi industrijskih frekvencija do ne-
koliko stotina kilovolta (v. str. 612).

Elektrostatičkim instrumentima specijalne kon-
strukcije mijere se naponi i do 500 kV. Efektivnu
vrijednost napona ti instrumenti mijere s greš-
kom i manjom od 1%. *Rotirajući voltmetri* su zapravo elektrosta-
tički generatori s cilindričkim rotorom. Principijelna shema jed-
nog visokonaponskog rotirajućeg voltmetra prikazana je na
sl. 76. Rotor je sastavljen od dva međusobno izolirana
metalna polucilindra A_1 i A_2 , spojena na dvodijelni kolektor
 K , na koji je preko četkica pri-
ključen osjetljivi ampermeter A s pomičnim svitkom. Rotor se
pomoću prikladnog motora vrti između dvije pločaste elektrode
 B_1 i B_2 na koje je priključen
mjerni istosmjerni napon U_- . Prilikom vrtnje motora, zbog
djelovanja električnog polja ko-
je postoji između obje pločaste
elektrode, nabijaju se električ-
nom influencijom (v. *Električ-
itet, statički*) polucilindri A_1 i A_2 , a naboji suprotog polariteta
se izbjiju preko instrumenta A . Srednja vrijednost pulsirajuće
struje iznosi:

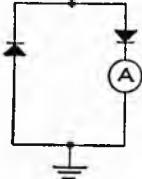
$$I_{sr} = 2C U n, \text{ a napon } U = \frac{I_{sr}}{2Cn},$$

gdje je C kapacitet između jedne elektrode i rotora, a n brzina
vrtnje u okretajima na sekundu. Ako je rotor tjeran dvočlanim
sinhronim motorom, mogu se pomoći rotirajućeg voltmetra mje-
riti i izmjenični naponi.

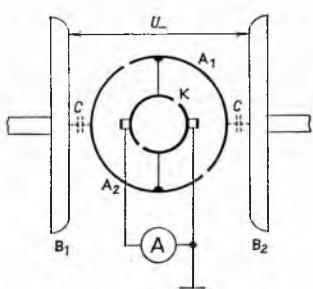
Postoji još čitav niz drugih metoda za mjerjenje visokih napona.
Tako se npr. naponi do 1000 kV mogu odrediti *mjerjenjem sile
privlačenja* između nabijenih kuglastih iskrišta. Pri tome je jedna
kugla uzemljena, a druga visi na cilindričnoj opruzi. Istezanje
opruge promatra se pomoći ogledala i svjetlosne zrake.

Izvori visokih napona. Visokonaponski izvori industrijskih
frekvencija (npr. 50, 60 Hz) služe za ispitivanja izolacije električnih
strojeva, aparata i druge opreme stranim naponom. Nazivna snaga
takvih izvora ovisi o karakteristikama mjerne opreme, a kreće
se u području od nekoliko stotina voltampera do više stotina kilo-
voltampera. Najčešće služe kao izvor ispitnih transformatora čija
konstrukcija ovisi o visini napona koji treba da daju. Općenito
se od njih zahtijeva velika struja kratkog spoja, kako bi bilo uoč-
ljivo mjesto probaja, i sinusni valni oblik napona.

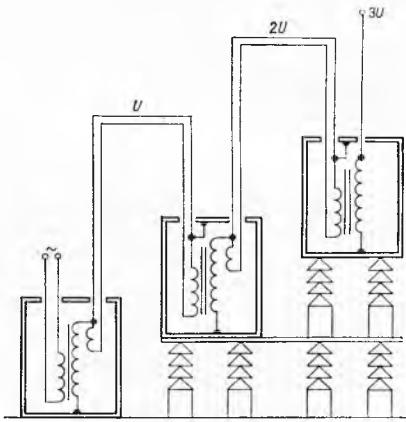
Kaskadno spojeni ispitni transformatori služe za ispitivanje
opreme nazivnog napona 220 kV i više. Na sl. 77 je prikazana
principijelna shema kaskade od tri transformatora. Primarni prviog
transformatora napaja se iz izvora napona koji se može regulirati.
Jedna stezaljka sekundarnog namota tog transformatora je uzem-
ljena, a na drugoj stezaljci dobiva se napon U prema zemlji.



Sl. 75. Sklop za određivanje tjemene vrijednosti visokog napona mjerjenjem srednje vrijednosti struje



Sl. 76. Rotirajući voltmetar. A_1 , A_2 polucilindri, K kolektor, A amper-
metar, B_1 i B_2 ploče elektroda

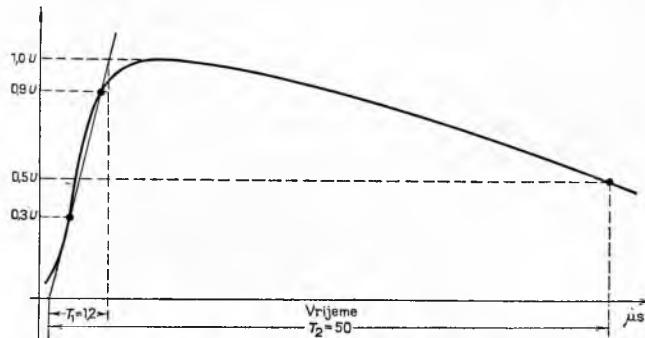


Sl. 77. Kaskadni ispitni transformator

Tercijarni namot tog transformatora predviđen je za dobivanje
napona od nekoliko kilovolta i povezan je s visokonaponskom
stezaljkom sekundarnog namota; on služi za napajanje drugog
transformatora. Izolatori na kojima je smješteno kućište drugog
transformatora dimenzionirani su tako da mogu izdržati prema
zemlji napon U . Jedna je stezaljka sekundarnog namota opet na
potencijalu kućišta, a na drugoj stezaljci dobiva se napon $2U$.
Treći se transformator napaja pomoći tercijarnog namota dru-
gog transformatora, a nalazi se na postolju izoliranom za $2U$
prema zemlji. Na gornjoj stezaljci sekundarnog namota tog trans-
formatora dobije se napon $3U$. Na taj je način moguće dobiti
vrlo visoke izmjenične ispitne napone.

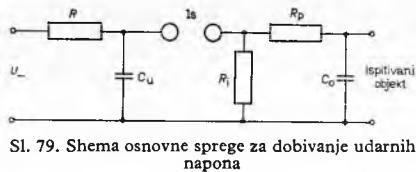
Izvori udarnih napona. Transformatori, sklopke i ostala elek-
trična oprema izloženi su u pogonu kratkotraјnim prenaponima
do kojih dolazi kod atmosferskih pražnjenja i kod poremećaja
u mreži. Ti prenaponi u obliku vala strmog čela i položitog hrpta
izazivaju naprezanje izolacije opreme. Zbog toga se oprema ispi-
tuje na izdržljivost prema takvim vrstama prenapona. U tu svrhu
upotrebljavaju se *generatori udarnog napona* koji proizvode visoke
napone određene tjemene vrijednosti i određenog trajanja. Pro-
pisima je definiran oblik krivulje udarnog napona, trajanje čela
vala T_1 i polutnjemo trajanje hrpta vala T_2 (sl. 78). Ovaj oblik
napona dobije se sklopom prema sl. 79. Kondenzator kapaciteta
 C_u nabije se iz izvora istosmjernog napona U_- preko otpornika
otpornika R . Kad napon na kondenzatoru dovoljno poraste, preskoči
iskra na iskrištu I_s pa se kondenzator kapaciteta C_u počinje iz-
bijati kroz otpornik otpora R_1 , mnogo manjeg od R . Istovremeno
počinje nabijanje kondenzatora kapaciteta C_0 preko ot-

pornika otpora R_p . Kapacitet C_0 manji je od kapaciteta C_u , te će napon na kondenzatoru kapaciteta C_0 brzo porasti na približnu vrijednost naponu na kondenzatoru kapaciteta C_u . Tada se oba kondenzatora izbijaju preko otpornika otpora R_i . Napon



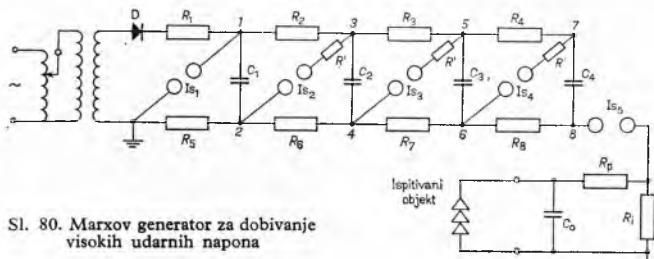
Sl. 78. Standardni oblik udarnog napona

na ispitivanom objektu koji je priključen na kondenzator kapaciteta C_0 porast će naglo na neku određenu vrijednost, a zatim polaganje opadati. Kada se kondenzatori s kapacitetima C_u i C_0 potpuno isprazne, počinje novi ciklus. Standardizirane su vrijednosti $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ i $T_2 = 50 \mu\text{s}$ (sl. 78), što se kratko označava sa: 1,2/50. Istosmjerni napon za nabijanje kondenzatora kapaciteta C_u dobiva se pomoću visokonaponskog transformatora i ispravljača. Ispravljači su obično specijalne visokovakuumuske diode s vrućom katodom, tzv. kenotroni, a u novije vrijeme upotrebljavaju se i poluvodički ispravljači.



Sl. 79. Shema osnovne sprege za dobivanje udarnih naponova

Za dobivanje visokih udarnih naponova ne upotrebljava se shema prema sl. 79 nego *generator po Marxu* (sl. 80). Istosmjernom strujom iz ispravljača D nabija se preko visokoomskih otpornika R_1, R_2, \dots, R_n niz kondenzatora C_1, C_2, \dots, C_n spojenih paralelno. Kada se kondenzatori nabiju na dovoljno visoki napon (nabijanje traje od nekoliko desetina sekunda do nekoliko minuta), preskočit će iskra na prvom iskrištu (Is_1), koje ima manji razmak između kugli nego ostala. Usljed toga nastat će preskoci i na drugim iskrištima, te će se preko tih iskrišta kondenzatori spojiti serijski. Na taj se



Sl. 80. Marxov generator za dobivanje visokih udarnih naponova

način dobiva na posljednjem iskrištu napon koji je jednak zbroju naponova pojedinih kondenzatora. Kondenzatori se zatim izbijaju preko otpornika R_p i R_i na ranije opisani način (v. sl. 79). Savremenim izvedbama udarnih generatora postižu se udarni naponi iznosa nekoliko megavolta, a energija pri jednom udaru dostiže i do 300 kW.

Izvori istosmjernih naponova služe za ispitivanje električne opreme stranim naponima u slučaju kad iz bilo kojeg razloga nije moguće ispitivanje izmjeničnim naponom. Budući da istosmjerni napon izaziva manje naprezanje izolacije, propisi zahtijevaju istosmjerne napone koji su znatno viši od odgovarajućih izmjeničnih.

Istosmjerni izvori napona obično se sastoje od visokonaponskog transformatora s ispravljačem. Ispravljanje se vrši kenotronima ili poluvodičkim ispravljačima. Različitim načinima spajanja ispravljača i kondenzatora mogu se dobiti naponi višestruko veći od tjemene vrijednosti izmjeničnog napona koji se ispravlja.

Magnetska mjerena

Magnetska mjerena obuhvačaju mjerjenje različnih magnetskih veličina i ispitivanje svojstava magnetskih materijala. Najčešće se mjeri: magnetski tok Φ , jakost magnetskog polja H , magnetska indukcija B , magnetski napon V , magnetski otpor ili reluktancija R_m i permeabilitet (permeabilnost) μ . Radi ispitivanja magnetskih materijala mjeri se u prvom redu magnetska indukcija u ovisnosti o jakosti magnetskog polja [$B = f(H)$] i utvrđuju remanencija B_r , koercitivna sila H_k i gubici zbog histereze i vrtložnih struja. Mjerjenje svih tih veličina provodi se brojnim metodama koje se zasnivaju na različitim principima.

Mjerjenje magnetskih veličina. Magnetski tok i indukcija mjeri se pomoću induciranih naponi. Vremenskom promjenom magnetskog toka Φ u svitku sa N zavoja ili petlji žice inducira se napon:

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt}.$$

U mjerne se svrhe najčešće upotrebljavaju kratkotrajni naponski udari zbog nagle promjene magnetskog tcka kroz svitak ili izmjenični naponi nastali periodskom promjenom magnetskog toka.

Mjerjenje magnetskog toka balističkim galvanometrom svodi se na mjerjenje količine elektriciteta Q koja je zbog nagle promjene magnetskog toka prostrujala kroz mjerne svitak priključen na galvanometar (sl. 81). Ako je ukupni vanjski otpor, koji se sastoji od predotpore R_p i otpora svitka R_s , upravo jednak iznosu R_a vanjskog graničnog otpora galvanometra ($R_a = R_p + R_s$), onda je maksimalni otklon a_m galvanometra proporcionalan količini elektriciteta Q :

$$Q = C_B a_m,$$

gdje je sa C_B označena balistička konstanta galvanometra (v. str. 600).

Da je Q proporcionalan razlici između magnetskog toka Φ_0 i konačnog magnetskog toka Φ_1 , može se dokazati ako se zna da će inducirani napon e u svitku sa N zavoja protjerati struju:

$$i = \frac{e}{R_g + R_a} = -\frac{N}{R} \frac{d\Phi}{dt},$$

gdje je $R = R_g + R_a$ i gdje R_g znači otpor galvanometra. U vremenskom intervalu dt prostrujat će količina elektriciteta $dQ = i dt$, a ukupna količina elektriciteta prostrujalog kroz galvanometar kad se tok promjeni od iznosa Φ_0 u vrijeme $t = 0$ do Φ_1 u vrijeme $t = t_1$ iznosi:

$$Q = \int_0^{t_1} i dt = - \int_0^{t_1} \frac{N}{R} \frac{d\Phi}{dt} dt = N \frac{\Phi_0 - \Phi_1}{R},$$

odnosno:

$$N(\Phi_0 - \Phi_1) = Q R = R C_B a_m = K_B a_m.$$

Konstanta K_B naziva se balističkom konstantom galvanometra za mjerjenje napenskih udara. Ovom metodom može se mjeriti i magnetska indukcija B ako se upotrijebi svitak dovoljno male površine S , tako da je polje unutar svitka homogeno (sl. 81). Naglim uklanjanjem svitka iz mjerjenog polja ili prekidanjem uzbudne struje dobije se otklon galvanometra a_m iz kojeg se onda izračunava magnetska indukcija prema jednadžbi: $B = \frac{K_B}{NS} a_m$.

Fluksmetrom (v. str. 600) mogu se izvesti ista mjerena s većom tačnošću, jer njegov pomični dio ostaje u početnom odn. krajnjem položaju dovoljno dugo da se otkloni mogu lako i dovoljno tačno očitati.

Mjerenje tjemene vrijednosti izmjeničnih tokova pomoću induciranih napona zasniva se na pojavu da izmjenični magnetski tok u mernom svitku koji ga obuhvaća inducira izmjenični napon. Kada se magnetski tok mijenja po zakonu sinusa ($\Phi = \Phi_m \sin \omega t$) dobije se po zakonu elektromagnetske indukcije u svitku sa N zavoja inducirani napon:

$$e = -\omega N \Phi_m \cos \omega t = -2\pi f N \Phi_m \cos \omega t,$$

gdje f označava frekvenciju. Efektivna vrijednost tog napona iznosi:

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N \Phi_m = 4,44 f N \Phi_m,$$

pa se prema tome tjemena vrijednost sinusnog magnetskog toka Φ_m može odrediti iz efektivne vrijednosti inducirano napon:

$$\Phi_m = \frac{E}{4,44 f N}.$$

Ako tok nije sinusan, može se njegova tjemena vrijednost odrediti mjerjenjem srednje vrijednosti inducirano napon u slučaju da tok ima u jednoj poluperiodi samo jednu ekstremnu

vrijednost $\left(\frac{d\Phi}{dt} = 0\right)$:

$$E_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^T |e| dt = f N \int_{\Phi_s}^{\Phi_T} |d\Phi|.$$

Ako tok na početku i na kraju perioda ima iznos Φ_0 , a njegova tjemena vrijednost iznosi Φ_m , za srednju se vrijednost napona dobiva:

$$E_{sr} = f N \int_{\Phi_0}^{\Phi_m} d\Phi - f N \int_{\Phi_m}^{-\Phi_m} d\Phi + f N \int_{-\Phi_m}^{\Phi_0} d\Phi = 4f N \Phi_m.$$

Posebno se integriraju intervali u kojima tok raste i u kojima on pada zato što za $d\Phi > 0$ vrijedi $\int |d\Phi| = \int d\Phi$, a za $d\Phi < 0$ je $\int |d\Phi| = -\int d\Phi$.

Iz toga slijedi da se tjemena vrijednost takva toka može mjeriti pomoću voltmatra čiji je otklon proporcionalan srednjoj vrijednosti napona (v. str. 593).

Momentane vrijednosti toka Φ_t odn. indukcije B_t mogu se odrediti instrumentom s mehaničkim ispravljačem i pomičnim svitkom. Mehanički ispravljač vrši poluvalno ispravljanje, a trenutak zatvaranja kontakta može se po volji podešiti. Ako se kontakt zatvorio u trenutku t , kroz instrument će u toku jedne periode teći struja u intervalu od t do $t + T/2$. Instrument s pomičnim svitkom pokazat će »elektrolitičku srednju vrijednost« napona E_{sr} , u tom intervalu:

$$E_{sr} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T/2} e dt = f N (\Phi_t - \Phi_{t+T/2}).$$

Kako je često pozitivna poluperioda jednak negativnoj, to je $\Phi_t = -\Phi_{t+T/2}$, pa se dobije:

$$E_{sr} = 2f N \Phi_t.$$

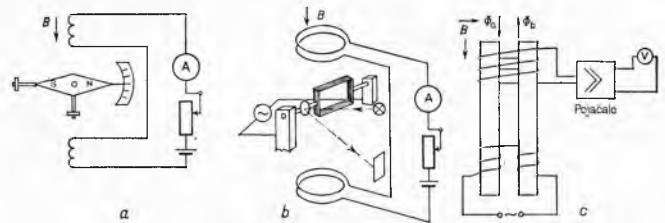
Mjerenje magnetskog polja u zraku. Mjerenje stalnih ili sporo promjenljivih magnetskih polja koja u zraku okružuju razne tehničke naprave i našu Zemlju provodi se magnetometrima. Oni rade na različnim principima, npr. na mehaničkom djelovanju magnetskog polja na stalni magnet; na mehaničkom djelovanju magnetskog polja na vodič kroz koji protječe struja, na elektromagnet ili nuklearne magnete; na pojavnama uslovijenim nelinearnom karakteristikom feromagnetskih materijala itd.

Magnetometri mogu se dakle prema svojoj konstrukciji podijeliti na mehaničke, električke i elektroničke magnetometre, među koje ubrajamo i tzv. nuklearne magnetometre. U mehaničke magnetometre idu npr. magnetska vaga, Gaussov magnetometar, iglični i torzioni magnetometar (v. Magnetizam).

Principijelna shema *magnetometra s permanentnim magnetom* prikazana je na sl. 82 a. Magnetsko polje indukcije B koje želimo mjeriti zaokreće permanentni magnet (magnetsku iglu) iz smjera N—S. Jakost polja može se direktno očitati na skali. Takva vrsta magnetometra može biti snabdjevana i svicima kroz koje protječe

struja; ona se mjeri ampermetrom A. Smjer i veličina struje kroz svitak i njegov položaj odabiru se tako da se indukcija koja se pojavljuje zbog struje u svitku i vanjsko polje koje treba mjeriti međusobno potisu. Kako je u tom slučaju indukcija rezultirajućeg polja jednaka nuli, i otklon magnetske igle spadne na nulu. Veličina mjereno polja određuje se u tom slučaju iz konstanti svitka i struje. Osjetljivost nekih izvedbi ovakvih magnetometara reda je veličine 10^{-7} T (tesla).

U *magnetometru s pomičnim svitkom* (sl. 82 b) predstavlja svitak kroz koji protjeće izmjenična struja elektromagnet koji u ritmu frekvencije izmjenične struje mijenja svoj polaritet. Zbog međusobnog djelovanja tog magneta i vanjskog polja pomični svitak magnetometra titra. On prestaje titrati tek kada se mjereno vanjsko polje kompenzira poljem pomoćnih svitaka. Veličina mjereno polja određuje se i ovdje iz jakosti struje i konstante svitka.



Sl. 82. Principijelne sheme magnetometara. a) Magnetometar s permanentnim magnetom, b) magnetometar s pomičnim svitkom, c) magnetometar sa zasićenom jezgrom

Magnetometri sa zasićenom jezgrom odlikuju se velikom osjetljivošću (10^{-9} do 10^{-10} T), malim dimenzijama i odsustvom pomoćnih dijelova. Mjerna sonda sastoji se od jedne jezgre ili grupe jezgri od magnetski mekog materijala i na njima postavljenih svitaka. Na sl. 82 c prikazana je konstrukcija sa dvije jezgre. Izmjeničnom sinusnom strujom proizvode se jednak ali suprotni izmjenični tokovi Φ_a i Φ_b . Usljed toga se u svitku koji obuhvaća obje jezgre ne inducira nikakav napon. Vanjsko (mjereno) polje narušava simetriju i u svitku se inducira naponi čija je veličina proporcionalna mjerenoj polju.

Novije mjerne metode. U novije se vrijeme za mjerjenje magnetskih polja sve više upotrebljavaju i *Hallove sonde* (male i tanke pločice od poluvodiča). Kroz sondu (v. sl. 27 a) teče upravljačka istosmjerna struja I , koja se mjeri na pogodan način. Kada se sonda postavi u magnetsko polje tako da su silnice okomite na površinu sonde, pojavljuje se u poprečnom smjeru Hallov napon U_H proporcionalan indukciji B , upravljačkoj strui I i konstanti sonde. Indukcija B iznosi dakle: $B = \frac{U_H d}{R_H I}$ (v. str. 619). Hallovim sondama mogu se mjeriti indukcije od 0,005 do 2 T (tesla) s pogreškom od $\pm 1,5\%$.

Magnetsko polje može se mjeriti i *otporskim sondama*, tj. pločicama od materijala čiji se specifični otpor mijenja pod utjecajem magnetskog polja. Najnovije izvedbe sondi od legure indijuma i antimona s dodatkom nikal-antimona odlikuju se vrlo malim dimenzijama (npr. 2×1 , $5 \times 0,5$ mm) i višestrukom promjenom otpora zbog djelovanja magnetskog polja. Relativna promjena otpora iznosi 6...12 npr. pri porastu indukcije od 0 na 1 T.

Mjerenje statičkog magnetskog polja *metodom nuklearne magnetske rezonancije* (NMR). Ova metoda zasniva se na pojavu da magnetski dipoli jezgri određene supstancije stavljeni u mjereno statičko magnetsko polje indukcije B_0 izvode precesiono gibanje oko smjera polja kutnom brzinom ω_0 . Kutna brzina precesije određena je jednadžbom Larmora:

$$\omega_0 = \gamma B_0.$$

Iznos konstante γ , tzv. giromagnetske konstante, za jezgre koje posjeduju nuklearni magnetizam poznat je s pogreškom manjom od $1 \cdot 10^{-5}$, a za slučaj rezonancije protona, s pogreškom manjom od $5 \cdot 10^{-6}$. Ako okomito na smjer magnetskog polja B_0 djeluju visokofrekventno polje indukcije B_1 (mnogo manje od B_0) kružne frekvencije $\omega \approx \omega_0$, doći će do apsorpcije energije iz tog polja ili do emisije energije. Ta pojava naziva se nuklearnom magnetskom rezonancijom. Tačnim mjerjenjem frekvencije, npr. digi-

talnim mjerilom frekvencije, može se upotrebom jednadžbe Larmora vrlo tačno odrediti iznos magnetskog polja indukcije B_0 . Definicija tačke kojoj pripada izmjereni iznos polja određena je dimenzijama mjerne sonde. Kao sonda služi staklena ili plastična posudica volumena od 0,1 do 1 cm³ napunjena odgovarajućom supstancijom (npr. vodenom otopinom nekih paramagnetskih soli za slučaj protonске rezonancije). Oko posudice je namotana zavojnica koja služi najprije za stvaranje visokofrekventnog polja a zatim za detekciju rezonancije.

Metodom NMR mogu se mjeriti statična magnetska polja indukcije od desetak mikrotesla pa do najviših iznosa koji se danas mogu postići. Zbog toga se ova vrsta magnetometara u stabilnoj ili prenosivoj izvedbi koristi u mnogim granama nauke.

Primjena magnetometara u nauci i tehnici je mnogostrana. Oni se upotrebljavaju npr. za mjerjenje magnetskog polja Zemlje i praćenje promjena tog polja. Mjerjenja s magnetometrima igraju važnu ulogu i pri geološkim istraživanjima. Oni se upotrebljavaju i u vojne svrhe, npr. radi otkrivanja zaronjenih podmornica iz aviona ili helikoptera. Na svemirskim letjelicama oni služe za mjerjenje magnetskog polja planeta i interplanetarnog prostora.

Ispitivanje svojstava magnetskih materijala. Određivanje magnetskih svojstava feromagnetskih materijala uglavnom se svodi na mjerjenje odnosa između magnetske indukcije B i jakosti magnetskog polja H u ispitivanom uzorku. Magnetska indukcija B se najčešće mjeri metodom induciranih napona, a jakost magnetskog polja H određuje se: a) na osnovu poznate raspodjele magnetskog napona u magnetskom krugu ispitivanog uzorku; b) mjerjenjem magnetskog pada na ponu u ispitivanom uzorku; c) mjerjenjem jakosti magnetskog polja H uz površinu uzorka.

Mjerjenje jakosti magnetskog polja. U jednostavnim slučajevima gdje je teoretski poznata raspodjela magnetskog napona u magnetskom krugu, npr. kod prstenastih uzoraka, jakost magnetskog polja određuje se iz struje I ukupnog broja zavoja N jednostrano namotanih oko uzorka i srednje duljine silnica u uzorku l_{sr} :

$$|H| = \frac{NI}{l_{sr}},$$

a izražava se u amperima po jedinici dužine (A/m). Kako je pripremanje prstenastih uzoraka od magnetskih limova dugotrajno, oni se upotrebljavaju samo za precizna mjerjenja. Kod manje tačnih mjerena zatvoreni magnetski krug ostvaruje se pomoću traka lima postavljenih u četverokut ili premoštavanjem uzorka jarmom odlične magnetske vodljivosti.

Određivanje jakosti magnetskog polja H *mjerjenjem pada magnetskog napona*, uz pretpostavku homogenog polja unutar uzorka, provodi se tako da se prikladnim postupkom izmjeri magnetski pad napona između dvije tačke (A i B) na površini uzorka (sl. 83). Za mjerjenje magnetskih napona služi duguljast gibriv svitak namotan na neferomagnetskom materijalu. Takav svitak namotan je obično na savitljivoj traci od kože ili plastike dužine l i svagdje jednakog presjeka S . Svitak koji se sastoji od ukupno N podjednako po cijeloj dulžini raspoređenih zavoja namotan je dvostrukoj i to tako da namatanje počinje od sredine trake prema jednom kraju pa natrag do drugog kraja i ponovo do sredine. Svitak se pomoću isprepletenih dovodnih žica priključuje na balistički galvanometar ili fluksmetar. Tok obuhvaćen duljinom dl mjerila magnetskog napona iznosi:

$$d\Phi_0 = \mu_0 N_1 S H_l dl,$$

gdje je S srednja površina zavoja svitka, N_1 broj zavoja po jedinici duljine, a H_l komponenta vektora \vec{H} tangencijalna na element dl svitka.

Ukupni tok kroz sve zavoje mjerila magnetskih napona iznosi:

$$\Phi_0 = \mu_0 N_1 S \int H_l dl.$$

Integral $\int H_l dl$ predstavlja magnetski napon između tačaka A i B mjerenoj magnetskog polja. Naglim uklanjanjem mjeri-

la iz mjerenoj polja nastat će naponski udar koji će izazvati balistički otklon a_1 proporcionalan ukupnoj promjeni toka $\Phi_0 = -K_B a_1$. Magnetski napon, jednak razlici iznosa skalarnih potencijala V_A i V_B tačaka A i B iznosi:

$$V_A - V_B = \frac{K_B a_1}{\mu_0 S N_1}.$$

Određivanje jakosti magnetskog polja H *mjerjenjem indukcije B_0 na površini uzorka* moguće je jer se tangencijalna komponenta magnetskog polja H ne mijenja prelazom s uzorka na zrak. Mjerjenje će biti to tačnije što je B_0 određen bliže uzorku. Kako nije uvijek moguće mjeriti indukciju u blizini uzorka, potrebno je izmjeriti B_0 na različitim udaljenostima od uzorka, pa se H određuje grafičkom ekstrapolacijom (sl. 84).

Za mjerjenje indukcije na površini uzorka upotrebljavaju se rotirajući svici, Hallova sonda, ili koncentrični svici sa dva sloja. Slojevi imaju isti broj zavoja, samo su suprotno motani i spojeni u seriju. Napon inducirani u takvom svitku proporcionalan je toku koji akcijalno prolazi između dva njegova sloja.

Ispitivanje svojstava magnetskih materijala istosmjernom strujom svodi se na određivanje permeabilite i snimanje krivulje magnetiziranja, histereze i krivulje razmagnetiziranja. Od velikog broja metoda koje se upotrebljavaju bit će spomenute samo neke.

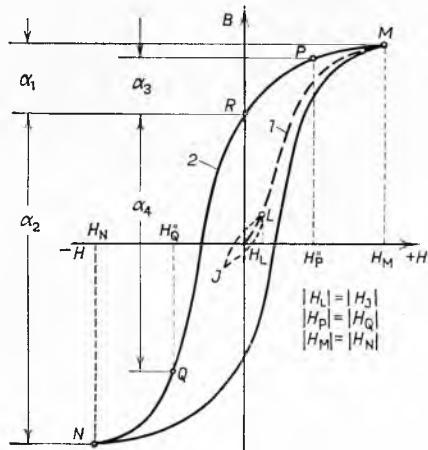
Snimanje statičke komutacione krivulje istosmjernom strujom pomoću balističkog galvanometra. Komutaciona krivulja spaja vrhove petlji histereze pri različitim veličinama maksimalne jakosti magnetskog polja a praktički se poklapa s krivuljom prvog magnetiziranja. Određivanje te krivulje može se provesti pomoću spoja na sl. 85. Oko uzorka magnetskog materijala prstenasta oblike tijesno je namotan namot sa N_2 zavoja na koji je priključen balistički galvanometar G . Otpor tog namota R_s zajedno s otporom R_p predotpornika treba da bude jednak vanjskom graničnom otporu galvanometra ($R_a = R_s + R_p$) da bi se dobilo aperiodično gibanje. Preko toga svitka namotan je uzbudni namot s ukupno N_1 zavoja. Nakon razmagnetiziranja uzorka, otporna R_o i R_1 podesi se uzbudna struja I_1 na neku malu vrijednost. Kod zatvorene tipke T komutatorom K komutira se uzbudna struja i očita balistički otklon galvanometra. Iz dobivenih podataka može se odrediti tačka L komutacione krivulje (sl. 86). Jakost magnetskog polja H_L koje unutar namota odgovara tački J , odnosno L , zavisi od broja zavoja N_1 uzbudnog namota, jakosti uzbudne struje I_1 i od srednje duljine silnica l_{sr} , dakle:

$$H_L = \frac{I_1 N_1}{l_{sr}},$$

a njegov smjer o položaju komutatora. Prilikom komutacije, tj. promjene smjera polja, indukcija će se promijeniti od B_L na B_J , dakle za $2 B_L$. Prema tome će indukcija koja odgovara tački L , tj. B_L , biti jednaka polovici izmjerene vrijednosti i ovisiti o otklonu galvanometra a_L , presjeka željezne jezgre S , broja sekundarnih zavoja N_2 i o konstanti galvanometra K_B , te će iznositi:

$$B_L = \frac{K_B}{2 S N_2} a_L = K_B' a_L.$$

Ponovnim komutiranjem uzbudne struje uz otvorenu tipku T vraća se stanje jezgre u tačku L. Zatim se podesi uzbudna struja na slijedeći veću vrijednost. Ponovnim komutiranjem struje uz zatvorenu tipku T dobiva se balistički otklon pomoću kojeg se može odrediti nova tačka na komutacionoj krivulji. Tim postupkom može se snimiti dovoljan broj tačaka sve do tačke M.



Sl. 86. Komutaciona krivulja (1) i petlja histereze (2)

Snimanje petlje histereze provodi se spojem na sl. 85 tako da se kroz uzbudni namot podesi uzbudna struja na vrijednost koja odgovara krajnjoj tački M petlje histereze. Uz ukopčanu tipku T, komutatorom K prekine se uzbudna struja i ujedno očita balistički otklon α_1 . Otklon će biti proporcionalan razlici indukcijā tačaka M i R (sl. 86). Ukopčanjem suprotne struje pomoću komutatora dobije se otklon α_2 , razmjeran razlici indukcijā tačaka R i N. Iz otklona α_1 i α_2 mogu se odrediti maksimalna indukcija B_m i remanentna indukcija B_r u tački R:

$$B_m = \frac{K_B}{2 S N_2} (\alpha_1 + \alpha_2) = K_B' (\alpha_1 + \alpha_2), \quad B_r = K_B' (\alpha_2 - \alpha_1).$$

Komutiranjem uz otvorenu tipku T postiže se polje i indukcija koja odgovara tački M pa se mogu odrediti ostale tačke. Tačke P i Q odrede se tako da se smanji uzbudna struja na vrijednost koja odgovara jakosti polja H_p . Uz ukopčanu tipku T, komutatorom K se struja prekine i očita otklon α_3 balističkog galvanometra. Zatim se komutatorom ukopča struja u suprotnom smjeru i očita otklon α_4 . Indukcije u tačkama P i Q dobiju se iz izraza:

$$B_p = B_r + 2 K_B' \alpha_3; \quad B_q = B_r \pm 2 K_B' \alpha_4.$$

Ostale tačke snimaju se na sličan način. Pri tome je vrlo važno da se petlja histereze obilazi uvijek u istom smjeru, što znači da uzbudnu struju treba (zatvaranjem preklopke Pr) povećati na vrijednost koja odgovara tački N, zatim promjenom smjera struje pomoću komutatora doći u tačku M i odatle nastaviti snimanje ostalih tačaka. Odgovarajuće jakosti magnetskog polja H određuju se iz izmjerene uzbudne struje prema jednadžbi:

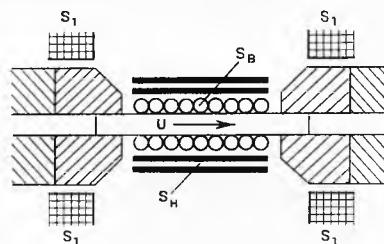
$$H = \frac{I N_1}{l_{sr}}.$$

Snimanje komutacione krivulje i petlje histereze svežnjeva uskih traka dinamo- ili trafo-lima vrši se Epsteinovim aparatom (v. sl. 91), koji je opremljen komutatorom i napajan je istosmjernom strujom. Balistički galvanometar se priključuje na za to predviđeni namot N_g , tijesno namotan oko svežnjeva traka (tercijarni namot). Da bi se izbjegao zračni raspored, limovi se slažu preklopno.

Za mjerjenja na štapastim uzorcima upotrebljavaju se jarmovi (sl. 87) velikog presjeka od odličnog magnetskog

materijala, tako da im se magnetski otpori mogu zanemariti. Onda se jakost magnetskog polja u uzorku 3 dužine l_u može odrediti iz izraza $H = I N_1 / l_u$. Struja I , koja se mjeri ampermetrom, teče kroz svitak 1 sa N_1 zavoja. Mali svitak 2, koji je tjesno priključen uz uzorak, priključuje se na balistički galvanometar radi određivanja indukcije B . Kod mjerjenja ovom metodom dolazi do pogreške zbog magnetskog otpora što ga stvara zračni zazor između jarma i uzorka, a kad uzorak ima velik permeabilitet, magnetski se otpor jarma ne smije više zanemariti.

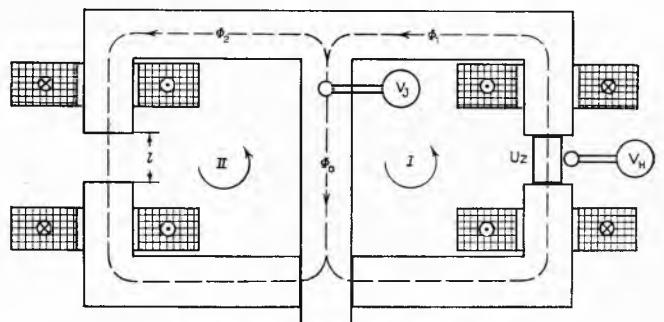
Mjerena s poljima većim od 10^4 V/m provode se posebnim metodama. Na sl. 88 je prikazana jedna metoda za kratke štapaste uzorce. Uzorak valjkastog oblika umetnut je između polova elektromagneta velikog presjeka i magnetizira se pomoću svitka S_1 . Indukcija B mjeri se svitkom S_B , a polje H svitkom S_H , koji je namotan u dva sloja s jednakim brojem zavoja spojenih u suprotnom smislu. Pri komutiranju ili prekidanju uzbudne struje koja



Sl. 88. Uredaj za mjerjenje jakosti polja H i indukcije B na kratkim štapastim uzorcima. S_1 svici za magnetiziranje, S_B svitak za mjerjenje indukcije, S_H svitak za mjerjenje jakosti polja, U uzorak

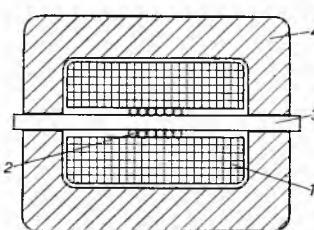
teče kroz svitak S_1 balistički galvanometar priključen na svitak S_B odn. S_H otklanja se proporcionalno indukciji, odn. jakosti magnetskog polja.

Stäblein-Steinitzov uredaj obično se upotrebljava za snimanje krivulje razmagnetiziranja permanentnih magneta u proizvodnji, jer su balistički postupci dugotrajni. Sastoje se od dvodijeljnog jarma načinjenog od materijala visokog permeabiliteata (sl. 89) sa dva podesiva zračna raspora širine l . Ispitivani uzorak ulaze se u raspore desnog stupa jarma, a isto takav raspored lijevog stupa ostaje prazan. Jednaki uzbudni svici kroz koje protjeće ista struja magnetiziranja omotani su oko lijevog i desnog stupa. Smjerovi



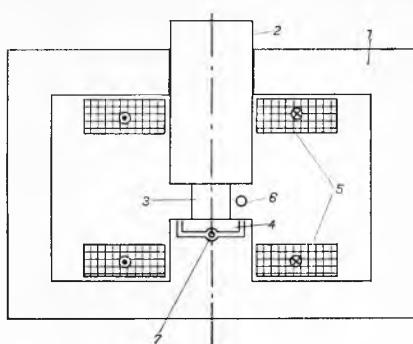
Sl. 89. Stäblein-Steinitzov jaram

struja u svicima tako su odabrani da kroz srednji stup nema magnetskog toka kad uzorak nije uložen. Kad se uloži uzorak Uz , pojavit će se u srednjem stupu tok proporcionalan magnetskoj polarizaciji $J = B - \mu_0 H$ uzorka. U rotirajućem svitku koji je smješten u rasporu srednjeg stupa inducirat će se izmjenični napon proporcionalan toku u stupu. Jakost polja H mjeri se rotirajućim svitkom neposredno uz površinu uzorka. Instrumenti koji mijere napone jednog i drugog svitka mogu se baždarići tako da direktno pokazuju vrijednost J i H uzorka. Usavršeniji uredaj ovog tipa prikazan je na sl. 90. Da bi u izvedbi na sl. 89 tok kroz srednji stup bio proporcionalan magnetskoj polarizaciji J uzorka, mora se tok kroz zrak desnog jarma kompenzirati posebnim uzbudnim namotom na lijevom stupu. U izvedbi na sl. 90



Sl. 87. Jaram za mjerjenje na malim uzorcima. 1 Uzbudni svitak, 2 svitak na koji se priključuje balistički galvanometar, 3 ispitivani uzorak, 4 jaram

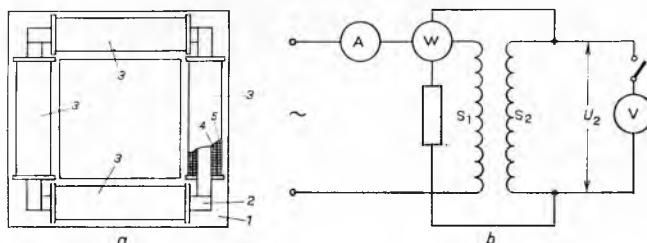
tok kroz zrak se kompenzira električki specijalnim spajanjem instrumenata priključenih na svitke za mjerjenje vrijednosti H i J .



Sl. 90. Uredaj za snimanje razmagnetizirajuće krivulje magnetskih materijala. 1 Jaram, 2 pomicni stup, 3 ispitivan uzorak, 4 cilindrična ploča, 5 uzbudni svici, 6 rotirajuća sonda za mjerjenje jakosti polja H , 7 rotirajuća sonda za mjerjenje magnetne polarizacije J

Ispitivanja svojstava magnetskih materijala izmjeničnom strujom provode se radi određivanja djelovanja izmjeničnih magnetskih polja na magnetske materijale. Ona se uglavnom svode na određivanje gubitaka uslijed vrtložnih struja i histereze, a iznosi tih gubitaka mjeri se vatmetričkim metodama ili snimanjem dinamičke petlje histereze, čija površina predstavlja ukupne gubitke u željezu tokom jedne periode.

Određivanje gubitaka u željeznim limovima vrši se najčešće vatmetričkom metodom pomoću Epsteinovog aparata (sl. 91).



Sl. 91. Epsteinov aparat. a) Shematski izgled aparata, b) shema mjerjenja; 1 postolje, 2 ispitivan uzorak, 3 svici, 4 (S_1) primarni namot, 5 (S_2) sekundarni namot

Taj se aparat sastoji od četiri svitka pravokutnog presjeka duljine ~ 43 cm, učvršćena na zajedničko postolje tako da tvore četverokut. Svaki svitak se sastoji od dva namota (primarnog i sekundarnog) s jednakim brojem zavoja. Namoti primara S_1 spojeni su seriski, a tako i namoti sekundara S_2 , pa primar i sekundar imaju svaki ukupno po 600 zavoja. Ispitivan limovi razrezani u trake dužine 50 cm i širine 3 cm slože se u četiri jednaka svežnja ukupne mase ~ 10 kg i ulože u svitke. Pri rezanju magnetskih limova polovina traka se reže paralelno sa smjerom valjanja lima, a polovina okomito na taj smjer, jer i o tome ovise magnetske karakteristike limova. Na primarni namot priključuje se izvor sinusnog napona, ampermetar A i strujna grana vatmetra W, a na sekundarni namot, koji je namotan tjesno oko ispitivanih svežnjeva, voltmeter V i naponska grana vatmetra W. Indukcija B u željezu određuje se na osnovu izmjerene inducirane napona U_2 u sekundarnom namotu a prema jednadžbi:

$$U_2 = 4 \xi B_m S N_2 f,$$

gdje ξ znači faktor oblika (npr. 1,11), B_m tjemenu vrijednost indukcije, S presjek, N_2 broj zavoja sekundarnog namota a f frekvenciju. Napon se radi dobivanja određene indukcije (obično 1 i 1,5 T) ne smije podešavati otpornicima u primarnom krugu, jer bi se u tom slučaju dobio nesinusni tok, već npr. promjenom uzbude posebnog generatora.

Gubici u željezu uz zanemarljiv otpor sekundarnog namota iznose:

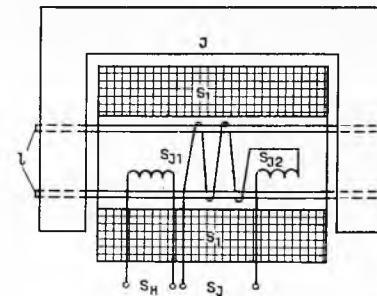
$$P_z = P_0 - \frac{U_2^2}{R_W} - \frac{U_2^2}{R_V}.$$

Budući da se voltmeter može tipkom T iskopčati, izraz se može pojednostaviti, te dobiva oblik:

$$P_z = P_0 - \frac{U_2^2}{R_W},$$

gdje su R_V i R_W otpori voltmetra i naponske grane vatmetra, a P_0 snaga koju je pokazao vatmeter.

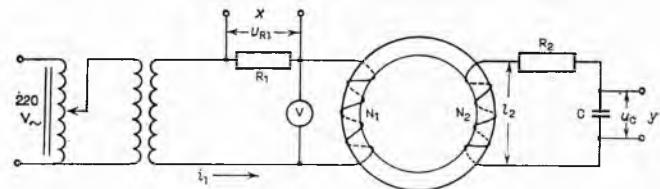
Snimanje dinamičke petlje histereze vektormetrom (v. str. 594). Jedan od uredaja za takvo snimanje petlje histereze prikazuje slika 92. Ispitivan limovi (1) podijeljeni u dva jednaka snopa ulažu se u procjepe na jarmu J od magnetskog materijala i pritegnu vijcima. Uzorci se magnetiziraju svitkom S_1 priključenim na izmjenični napon. Vektormetar priključen na svitak S_H , koji je smješten u sredini između dva snopa ispitivanog lima, gdje je jakost magnetskog polja praktički jednaka kao i u limovima, mjeri momentane vrijednosti jakosti magnetskog polja. Magnetska polarizacija J uzorka mjeri se pomoću dva svitka. Svitak S_{J1} namotan je oko oba snopa uzorka, a s njime u seriju je spojen suprotno namotani svitak S_{J2} koji se nalazi između oba snopa. Brojevi zavoja jednog i drugog svitka tako su odabrani da se naponi koje u njima inducira magnetski tok kroz zrak međusobno poništavaju. Vektormetar



Sl. 92. Uredaj za snimanje dinamičke petlje histereze vektormetrom. J jaram, 1 uzorci, S_1 svitak za magnetiziranje, S_H svitak za mjerjenje jakosti polja H , S_{J1} , S_{J2} svici za mjerjenje magnetne polarizacije J

priklučen na te svitke mjerit će, kad je uzorak uložen, momentane vrijednosti magnetske polarizacije $J = B - \mu_0 H$ u uzorku. Mjenjanjem trenutka zatvaranja kontakta mehaničkog ispravljača uz stalni izmjenični napon na svitku S_H dobivat će se različite tačke na dinamičkoj petljici histereze.

Snimanje petlje histereze osciloskopom može se vršiti pomoću relativno jednostavnog sklopa (sl. 93). Na pločice za horizontalni otklon (x) dovodi se pad napona ($U_{R_1} = R_1 i_1$) što ga stvara struju magnetiziranja i_1 na otporniku R_1 . Ovaj otpornik uvršten je u krug uzbudnog svitka koji ima N_1 zavoja. Otklon mlaza elek-



Sl. 93. Shema sklopa za snimanje petlje histereze katodnim osciloskopom

trona u smjeru x bit će dakle proporcionalan struji magnetiziranja i_1 . Kako je u uzorcima neznatnog magnetskog otpora izravnih u obliku prstenastog ili štapastog zatvorenog jarma jakost polja određena izrazom $H = \frac{N_1 i_1}{l}$, bit će otklon snopa proporcionalan jakosti polja H .

Pad napona na kondenzatoru C, spojenom na sekundarni namot sa N_2 zavoja i željeznom jezgom presjeka S , dovodi se na pločice za vertikalni otklon (y). Ako se odabere

$$R_2 \gg \frac{1}{\omega C}, \text{ bit će } i_2 \approx \frac{e_2}{R_2} \approx - \frac{N_2 S}{R_2} \cdot \frac{dB}{dt}.$$

Budući da na kondenzatoru vlada napon

$$u_C = \frac{1}{\omega C} \int i_2 dt = -\frac{N_2 S}{\omega C R_2} \int \frac{dB}{dt} = K_B B,$$

bit će otklon elektronskog mlaza u smjeru osi y proporcionalan indukciji B u uzorku. Istovremenim djelovanjem obaju naponu na otklonske pločice, na zastoru osciloskopa dobije se petlja histerese.

Analiza valnih oblika

U elektrotehnici se vrlo često nailazi na periodske veličine koje nemaju sinusni oblik zbog nelinearnih elemenata u krugu generatora ili trošila. Nesinusne periodske veličine mogu se razviti u Fourierov beskonačni red sinusnih veličina različitih amplituda i frekvencija. U općem slučaju, ako se sa C_0 označi konstantni član, a sa C_1, C_2, C_3, \dots tjemene vrijednosti i sa $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots$ kutevi članova Fourierovog reda, dobije se:

$$y = f(t) = C_0 + C_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + C_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots$$

Rastavljanjem člana $C_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$ može se beskonačni red pisati u obliku:

$$y = f(t) = C_0 + A_1 \cos \omega t + A_2 \cos 2\omega t + \dots + B_1 \sin \omega t + B_2 \sin 2\omega t + \dots$$

Koeficijenti C_0, A_n i B_n određuju se pomoću ovih izraza:

$$\begin{aligned} C_0 &= \frac{1}{T} \int_a^{a+T} f(t) dt; & A_n &= \frac{2}{T} \int_a^{a+T} f(t) \cos n\omega t dt; \\ B_n &= \frac{2}{T} \int_a^{a+T} f(t) \sin n\omega t dt, \end{aligned}$$

gdje je T period od $f(t)$, ω kružna frekvencija ($\omega = \frac{2\pi}{T}$).

Poznavajući koeficijente reda može se lako prijeći na oblik $y = f(t) = C_0 + C_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + C_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots$,

ako se zna da je $C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$ i $\varphi_n = \arctan \frac{A_n}{B_n}$.

Parne periodske funkcije [tj. za koje vrijedi $f(t) = f(-t)$] imaju samo kosinusne članove reda, a neparne [tj. za koje vrijedi $f(-t) = -f(t)$] samo sinusne članove.

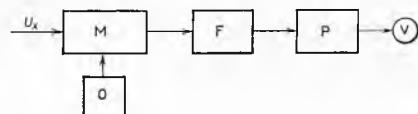
Ako je $f(t)$ takva funkcija da vrijedi $f(t + T/2) = -f(t)$, gdje je T perioda, $f(t)$ sadrži samo neparne harmoničke članove, a ako je $f(t)$ takva da je $f(t + T/2) = f(t)$, tada $f(t)$ sadrži samo parne harmoničke članove.

U praksi obično nije poznat matematički izraz za funkciju $y = f(t)$, nego samo oblik dobiven snimanjem, npr. sa zastora osciloskopa. U tom slučaju određuje se konačni broj koeficijenata Fourierovog reda numerički, tj. funkcija se predočuje konačnim trigonometrijskim polinomom. Postoje i aparati, harmonički analizatori, pomoću kojih se mogu odrediti vrijednosti stanovitog broja prvih koeficijenata Fourierovog reda ako pisaljka aparata pređe jednom duž grafa funkcije.

Valni (harmonički) analizatori. Osim upravo spomenutih analizatora postoje instrumenti i uređaji kojima se također mogu odrediti viši harmonički članovi, npr. *instrument s pomičnim svitkom i mehaničkim ispravljačem*. Za određivanje trećeg harmoničkog člana treba izvršiti šest mjerjenja, s time da se kontakt ispravljača podesi tako da ostaje zatvoren kroz pola perioda (180°) i da se trenutak zatvaranja kontakta za pojedina mjerjenja bira tako da se kontakt zatvara pri faznim pomacima $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ i 150° . Ako osnovni val i treći harmonički član prolaze istodobno kroz nulu, potrebna su samo tri mjerjenja, i to kod faznih pomaka $0^\circ, 60^\circ$ i 120° . Na sličan način mogu se odrediti peti i sedmi harmonički članovi. Promjenom trajanja kontakta mogu se eliminirati pojedini viši harmonički članovi i izmjeriti samo osnovni član. Analiza valnih oblika često se provodi i analizatorima s elektroničkim elementima. Najpoznatiji su izvedbe analizatora s podešivim selektivnim krugovima i analizatori s heterodinom.

Analizatori s podešivim selektivnim krugovima su pojačala sa selektivnim krugom-filterom u petlji povratne veze. Djelovanjem povratne veze pojačavaju se samo naponi uskog pojasa frekvencija. Frekventno područje se odabira podešavanjem RC-elemenata u filtru. Na izlazu iz pojačala mjere se naponi pojedinih frekvencijskih instrumentom s pomičnim svitkom i ispravljačem.

Analizatori s heterodinom (sl. 94) sastoje se od osculatora, sklopa za miješanje, uskopojasnog filtera, pojačala i elektroničkog voltmatra. Na ulaz u sklop za miješanje priključuje se ispitivani napon i napon osculatora čija se frekvencija može podešavati u određenim granicama. Podešavanjem frekvencije osculatora može se na izlazu iz sklopa za miješanje dobiti za svaku komponentu mjenog napona odgovarajući napon posve određene i stalne frekvencije. Uskopojasni filter F podešen je tako da propušta upravo tu frekvenciju. Napon te frekvencije pojačava se i mjeri elektroničkim voltmetrom. Skala podešivog osculatora označena je u vrijednostima mjenjenih frekvencija. Analizatori s heterodinom imaju pred analizatorima sa selektivnim krugom prednost što im je filter podešen na jednu određenu i stalnu frekvenciju. Takvi filteri mogu se izraditi s velikim faktorom dobrote, tako da im širina pojasa propuštanja može biti čak svega oko 20 Hz.



Sl. 94. Valni analizator s heterodinom. M stupanj za miješanje, O oscilator poznate frekvencije koja se može mijenjati (heterodin), F filter, P pojačalo, V elektronički voltmeter

Faktor harmoničkog izobličenja. Odstupanje od sinusoidne karakterizira faktor harmoničkog ili nelinearnog izobličenja (faktor distorzije), definiran omjerom drugog korijena sume efektivnih vrijednosti (A_2, A_3, \dots) viših harmoničkih članova i efektivne vrijednosti osnovnog člana:

$$k = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + A_4^2 \dots}}{A_1} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} A_n^2} \cdot 100\%.$$

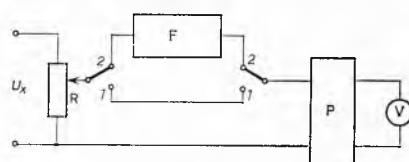
Radi jednostavnijeg i praktičnijeg mjerjenja faktor harmoničkog izobličenja izražava se često i u drukčijem obliku. U tom slučaju on je definiran omjerom drugog korijena sume efektivnih vrijednosti (A_2, A_3, \dots) viših harmoničkih članova i drugog korijena sume efektivnih vrijednosti svih članova, dakle

$$k' = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} A_n^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} A_n^2}} \cdot 100\%.$$

Odnosi između veličina k i k' dani su izrazima:

$$k = \frac{k'}{\sqrt{1 - k'^2}}, \quad k' = \frac{k}{\sqrt{1 + k^2}}.$$

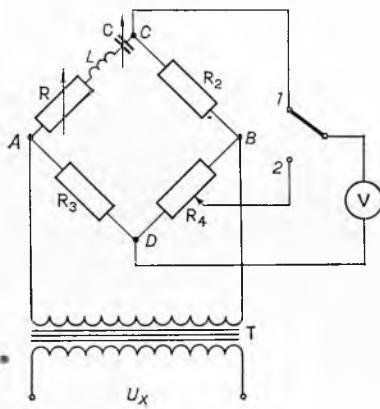
Faktor harmoničkog izobličenja može se odrediti na više načina, npr. mjerjenjem vrijednosti pojedinih harmonika analizatorima valnog oblika i izračunavanjem pomoću prije navedenih izraza. Postoje i specijalni uređaji pomoću kojih se neposredno određuje faktor izobličenja. Takav uređaj prikazuje principijelna blok-sHEMA



Sl. 95. Principijelna shema uređaja za mjerjenje faktora harmoničkog izobličenja

na sl. 95. Ako su preklopke u položaju 1, mjereni napon dovodi se izravno na pojačalo P. Potenciometrom R podesi se kazaljka voltmatra V (voltmetra za mjerjenje efektivnih vrijednosti) na puni otklon (100%). Prebacivanjem preklopke u položaj 2, mjereni napon se priključuje preko filtera F koji propušta samo više harmoničke članove. Otklon kazaljke voltmatra u tom slučaju pokazuje faktor izobličenja u postocima. Često se upotrebljavaju uređaji u kojima kao filter služi Robinsonov most, budući da napon u

dijagonali podešenog mosta sadrži samo više harmoničke članove. Pri mjerenu faktora harmoničkog izobličenja *rezonantnim mostom* (sl. 96) mjereni napon priključuje se na dijagonalu *AB* preko transformatora. Podesi li se u grani *AC* sklop induktiviteta *L* i kapaciteta *C* na rezonanciju s osnovnim članom, pri toj će frekvenciji reaktivni otpori elemenata toga sklopa biti jednaki ($\omega L = \frac{1}{\omega C}$), a ukupni reaktivni otpor jednak nuli. Ako su djetalni otpori mosta uravnoteženi, $R/R_2 = R_3/R_4$, napon u dijagonali *CD* neće sadržati osnovni član. Za sve harmonike će, međutim,



Sl. 96. Shema mjerjenja faktora harmoničkog izobličenja rezonantnim mostom

serijski sklop *LC* predstavljati velik otpor; zbog toga za njih most neće biti uravnotežen, pa će napon u dijagonali sadržati sve harmoničke članove. Napon na dijagonali *CD* za *n*-ti harmonik, uz pretpostavku da priključeni voltmetar ima vrlo velik otpor, bit će:

$$U_{CD} = U_{AB(n)} \left[\frac{R_4}{R_3 + R_4} - \frac{R_4}{R_3 + R_4 + j \frac{R_4}{R_2} (nL\omega - \frac{1}{n\omega C})} \right].$$

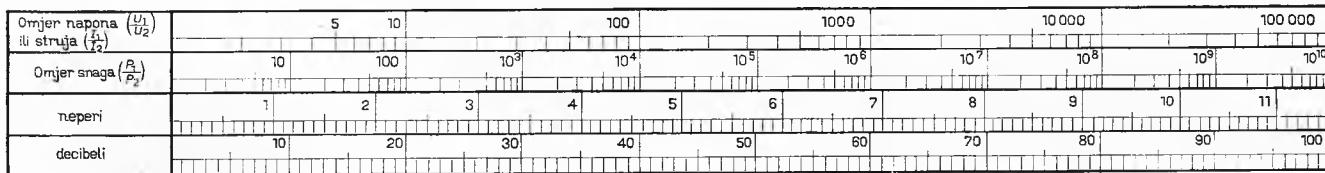
Odaberu li se vrijednosti tako da kod viših harmoničkih članova vrijedi:

$$\frac{R_4}{R_2} \left(n\omega L - \frac{1}{n\omega C} \right) \gg R_3 + R_4,$$

napon u dijagonali *CD* približno iznosi:

$$U_{CD(n)} \approx U_{AB(n)} \frac{R_4}{R_3 + R_4}.$$

Voltmetar za efektivne vrijednosti pokazat će ukupni napon u



Sl. 97. Omjeri napona, struje i snage izraženi u neperima i decibelima

dijagonali *CD* kad je preklopka u položaju 1:

$$U_{CD} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}.$$

Kad je preklopka u položaju 2, voltmetar mjeri napon:

$$U_{2D} = \frac{R}{R_3 + R_4} \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}.$$

Podesi li se da je $U_{CD} = U_{2D}$, bit će $k' = R/R_4$, pa se potenciometar *R* može baždariti u iznosima faktora harmoničkog izobličenja. Pored rezonantnog mosta za eliminiranje osnovnog člana upotrebljavaju se u pojedinim uredajima Robinsonov most i premošteni T-četverpoli.

Mjerena na području telekomunikacija

Pored nekih mjerena i mjernih postupaka koji su već opisani, na području telekomunikacija provode se mjerena nekih specifičnih veličina: razine, gušenja, pojačanja, stupnja modulacije. Te veličine predstavljaju omjere veličina iste vrste i običavaju se izražavati u posebnim jedinicama za takve omjere: belima (odn. decibelima) i neperima.

Izražavanje omjera. U telekomunikacionoj tehnici i općenito u tehničke struje pri uspoređivanju dviju veličina iste vrste, npr. dvaju napona, dviju struja ili snaga, ne upotrebljava se običan omjer, već prirodn ili dekadski logaritam tog omjera. Za izražavanje omjera u logaritmičkom mjerilu služe danas dvije bezdimenzione jedinice: *neper* (Np) i *bel* (B). (Budući da je bel velika jedinica, umjesto njega se upotrebljava redovito *decibel* (dB)).

Prirodnji logaritam omjera dvaju napona (U_1 i U_2) ili dviju struja (I_1 i I_2) izražava se u neperima (Np) te iznosi:

$$p_{NP} = \ln \frac{U_1}{U_2} \quad \text{ili} \quad p_{NP} = \ln \frac{I_1}{I_2}.$$

Omjer 1 Np postoji u slučaju kad stvarni omjer između dva napona ili dvije struje iznosi: $\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_1}{I_2} = e = 2,718$.

Mada je neper prema definiciji predviđen za izražavanje omjera između struja i napona, ova se jedinica upotrebljava i za omjere snaga, ali još u tom slučaju odgovara drugi stvarni omjer. Odnos između dviju snaga P_1 i P_2 iznosi:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{U_1^2 R_2}{U_2^2 R_1} = \frac{I_1^2 R_1}{I_2^2 R_2}.$$

Ako su otpori R_1 i R_2 na kojima se mjeri snaga jednaki, može se pisati:

$$\frac{U_1}{U_2} \quad \text{ili} \quad \frac{I_1}{I_2} = \sqrt{\frac{P_1}{P_2}} \quad (R_1 = R_2).$$

Ako se ova jednadžba logaritmišira i u njoj uvrsti ranije dobiveni izraz za p_{NP} , dobija se izraz za omjer snaga u neperima:

$$p_{NP} = \frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_2}.$$

Omjer snaga od 1 Np postoji ako stvarni odnos snaga pri jednakim otporima iznosi:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{e}{2} = 1,359.$$

Dekadski ili Briggsov logaritam omjera dviju snaga izražava se u belima ili decibelima te iznosi:

$$p_B = \log \frac{P_1}{P_2} \quad \text{ili} \quad p_{dB} = 10 \log \frac{P_1}{P_2}.$$

Omjer dviju snaga od 1 dB postoji kad je $\log \frac{P_1}{P_2} = 0,1$ ili stvarni omjer $\frac{P_1}{P_2} = 1,259$.

Iako su decibeli predviđeni prvenstveno za izražavanje omjera dviju snaga, njima se mogu izražavati i omjeri dvaju napona ili dviju struja, ali u tom će slučaju decibelu odgovarati drugi stvarni omjer. Ako se opet pretpostavi da su otpori jednak i izraz za omjer snaga logaritmišira, dobiva se:

$$\begin{aligned} \frac{P_1}{P_2} &= \frac{U_1^2 R_2}{U_2^2 R_1} = \frac{I_1^2 R_1}{I_2^2 R_2} = \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2 [R_1 = R_2] = \left(\frac{I_1}{I_2} \right)^2 [R_1 = R_2] \\ \log \frac{P_1}{P_2} &= 2 \log \frac{U_1}{U_2} = 2 \log \frac{I_1}{I_2}. \end{aligned}$$

Ako se u taj izraz uvrsti izraz za p_{dB} , dobiva se:

$$p_{dB} = 20 \log \frac{U_1}{U_2} \quad \text{ili} \quad p_{dB} = 20 \log \frac{I_1}{I_2}.$$

Omjer dvaju napona ili struja od 1 dB postoji kad je dekadski logaritam njihova omjera jednak 0,05 ili njihov stvarni omjer 1,12, pri jednakim otporima.

Slika 97 pokazuje omjere napona, struje i snage izražene u neperima i decibelima.

Između nepera i decibela vrijede sljedeći odnosi:

$$1 \text{ Np} \triangleq 8,686 \text{ dB} \quad \text{i} \quad 1 \text{ dB} \triangleq 0,1151 \text{ Np},$$

što međutim striktno važi samo ako su i otpori jednak.

Zbog širokog područja frekvencijske koje se primjenjuje u telekomunikacijama, za mjerenu navedenih veličina upotrebljavaju se po pravilu elektronički instrumenti ili uređaji. Razine i gušenja mjeru se voltmetrima koji imaju skalu baždarenu u neperima ili decibelima. Veoma često se u voltmetrima pored skale baždarene u voltima ucrtava i skala baždarena u neperima ili decibelima. Nula te skale je na mjestu koje odgovara naponu od 0,775 V.

Razina. Logaritam omjera neke veličine *A* prema nekoj usporedbenoj veličini *B* naziva se razina ili nivo veličine *A*. Prema definiciji veličine *B* razlikuje se apsolutna i relativna razina.

Apsolutna razina veličine A jednaka je logaritmu omjera A/B , gdje je B međunarodno utvrđena nulta razina. Prema preporukama CCIF (Međunarodne savjetodavne komisije za telefoniju) uzima se za nultu razinu napona $U_0 = 0,775$ V, struje $I_0 = 1,29$ mA i snage $P_0 = 1$ mW.

Prema tome apsolutne razine napona, struje i snage iznose:

$$p = \ln \frac{U_x}{0,775} [\text{Np}], \quad p = 20 \log \frac{U_x}{0,775} [\text{dB}],$$

$$p = \ln \frac{I_x}{1,29} [\text{Np}], \quad p = 20 \log \frac{I_x}{1,29} [\text{dB}],$$

$$p = \frac{1}{2} \ln \frac{P_x}{1} [\text{Np}], \quad p = 10 \log \frac{P_x}{1} [\text{dB}],$$

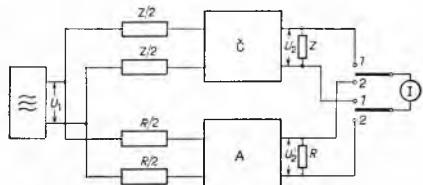
gdje je U_x numerička vrijednost napona u voltima, I_x numerička vrijednost struje u miliamperima i P_x numerička vrijednost snage u milivatima.

Relativna razina definirana je kao razlika između apsolutne razine u tački 1 sistema i apsolutne razine na usporedbenom mjestu 2. Ona iznosi:

$$p_1 = \ln U_1/U_2 = \ln U_1/U_0 - \ln U_2/U_0 [\text{Np}].$$

Mjerjenje gušenja. Pod gušenjem prenosnog sistema (četveropola) razumijeva se logaritam odnosa snage P_2 na zaključnoj impedanciji sistema i snage P_1 koju daje izvor pod tačno određenim uvjetima. Ovisno o definiciji snage P_1 postoji čitav niz gušenja: vlastito, pogonsko, uneseno itd. Za praksu su najinteresantnija pogonsko i uneseno gušenje.

Mjerjenje pogonskog gušenja. Pogonsko gušenje definirano je kao polovina prirodnog logaritma omjera snage P_1 koju izvor daje impedanciji Z_1 , jednakoj unutarnjoj impedanciji izvora, i snage P_2 koju isti izvor daje preko četveropola impedanciji Z_2 .



Sl. 98. Blok-sHEMA uređaja za mjerjenje pogonskog gušenja četveropola. A atenuator, Č četveropol

Označi li se sa E elektromotorna sila izvora, a sa U_2 napon na impedanciji Z_2 , može se napisati:

$$a_p = \frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_2} = \frac{1}{2} \ln \frac{E^2 Z_2}{4 U_2^2 Z_1} [\text{Np}]$$

ili:

$$a_p = \ln \frac{E}{2 U_2} + \frac{1}{2} \ln \frac{Z_2}{Z_1} [\text{Np}].$$

Uvođenjem apsolutnih razina, pogonsko gušenje može se izraziti u ovom obliku:

$$a_p = \frac{E}{2} - \ln \frac{U_2}{0,775} + \frac{1}{2} \ln \frac{Z_2}{Z_1} = p_1 - p_2 + \frac{1}{2} \ln \frac{Z_1}{Z_2}.$$

Ako je $Z_2 = Z_1$, izraz za pogonsko gušenje poprima vrlo jednostavan oblik:

$$a_p = \ln \frac{E}{2 U_2} = \ln \frac{U_1}{U_2} = p_1 - p_2.$$

Tipična metoda za mjerjenje pogonskog gušenja pomoću bažđenog atenuatora (v. dalje) prikazana je na sl. 98. Mjereni objekt, četveropol Č čije pogonsko gušenje treba odrediti, priključi se na mjeri sklop i pri položaju preklopke 1–1 očita pokazivanje indikatora, koji mora posjedovati visoku ulaznu impedanciju. Nakon prebacivanja preklopke u položaj 2–2 mijenja se gušenje atenuatora, koje je tačno poznato, tako da se opet dobije isti otklon kazaljke indikatora, tj. da bude $U_2 = U_2'$. Gušenje četveropola Č je u tom slučaju jednako gušenju atenuatora A. Iznos gušenja može se izravno očitati na atenuatoru.

Mjerjenje unesenog gušenja. Uneseno gušenje definirano je kao polovina prirodnog logaritma odnosa snage P_1 na impedanciji Z_2 priključenoj direktno na izvor unutarnje impedancije Z_1 i snage P_2 na impedanciji Z_2 priključenoj preko četveropola:

$$a_u = \frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_2}.$$

$$\text{Kako je } P_1 = \frac{E^2 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}; \quad P_2 = \frac{U_2^2}{Z_2},$$

bit će:

$$a_u = \frac{1}{2} \ln \frac{E^2 Z_2}{U_2^2 (Z_1 + Z_2)^2} = \ln \frac{U_1}{U_2} = p_1 - p_2.$$

Mjerjenje unesenog gušenja najčešće se provodi tako da se odredi apsolutna naponska razina p_1 kad je impedancija Z_2 direktno priključena na izvor i razina p_2 kad je impedancija Z_2 priključena na izlaz iz četveropola.

Atenuatori ili oslabljivači su naprave za smanjenje jakosti niskofrekventnih i visokofrekventnih signala bez njihova izobličenja. Oni se upotrebljavaju za mjerjenje gušenja i u mnogim drugim telekomunikacionim mjerjenjima. To su četveropoli s tačno određenom i stalnom karakterističnom impedancijom i s tačno poznatim gušenjem. Oni se izrađuju bilo s jednom stalnom vrijednošću karakterističnog gušenja ili tako da se ono može mijenjati u određenom opsegu kontinuirano ili u skokovima, a da se pri tome ulazna i izlazna impedancija ne mijenjaju. Sastavljaju se od dječalnih otpornika spojenih u simetrične ili nesimetrične četveropole, čiji broj ovisi o opsegu gušenja koje se želi postići. Atenuatori se osim toga razlikuju i po stepenu neovisnosti gušenja od frekvencije. Pažljivom izradom otpornika mogu se izraditi atenuatori čije je gušenje neovisno o frekvenciji sve do nekoliko desetaka megaherca.

Mjerjenje pojačanja nekog četveropola u principu se provodi na isti način kao i mjerjenje gušenja, samo se tom prilikom promatra pojačanje četveropola umjesto gušenja.

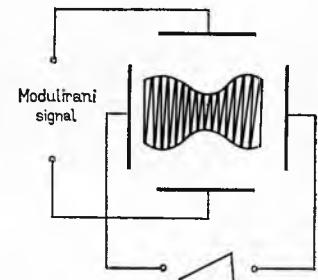
Mjerjenje stupnja modulacije pri amplitudnoj modulaciji. Radi prenosa informacija moduliraju se visokofrekventni signali niskofrekventnim signalom koji sadrži informaciju. Pri tome je poželjno da promjene amplitudu visokofrekventnog signala budu linearne proporcionalne modulirajućem signalu, što je ostvareno samo ako je stupanj modulacije (tj. odnos između modulirajućeg napona i moduliranog visokofrekventnog nosećeg napona) $m < 1$. U protivnom slučaju dolazi do izobličenja i time do smanjenja kvaliteta prijenosa.

Stupanj amplitudne modulacije može se mjeriti osciloskopom na više načina.

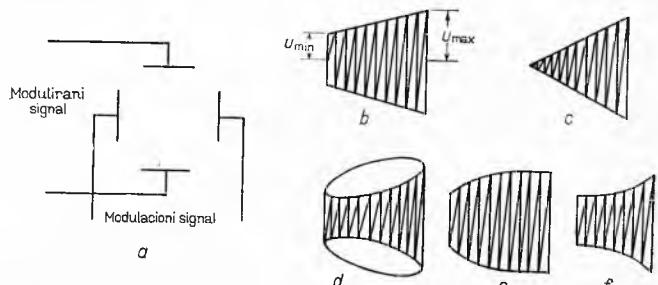
a) Napon visoke frekvencije moduliran signalom niske frekvencije dovodi se na pločice za vertikalni otklon, a na pločice za horizontalni otklon priključuje se pilasti napon (sl. 99). Stupanj modulacije određuje se izraza: $m = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min}}$, gdje su U_{\max} i U_{\min} maksimalna i minimalna amplituda napona ovojnica (anvelope) moduliranog signala.

b) Vrlo često se stupanj modulacije mjeri prema shemi na sl.

100. Na pločice za vertikalni otklon dovodi se modulirani visokofrekventni napon, a na pločice za horizontalni otklon niskofrekventni napon modulirajućeg signala. Na zastoru osciloskopa dobije se u općem slučaju, ako su naponi na pločicama u fazi, oscilogram trapezasta oblike (sl. 100 b). Kad je $m = 1$, tj. kad je modulacija 100%, oscilogram je trokut (sl. 100 c). Kad ta dva



Sl. 99. Mjerjenje stupnja amplitudne modulacije osciloskopom uz primjenu pilastog napona



Sl. 100. Mjerjenje stupnja amplitudne modulacije osciloskopom

naponu nisu u fazi, dobije se osciloskopom kao na sl. 100 d. Na sl. 100 e i f prikazani su oscilosogrami u slučaju izobličenja.

c) Priključi li se modulirani signal preko ispravljača i filtera na pločice za vertikalni otklon, a pilasti napon na pločice za horizontalni otklon, na zastoru osciloskopa dobit će se anvelopa moduliranog signala (sl. 101). Mjeranjem U_{\max} i U_{\min} može se odrediti stupanj modulacije izrazom navedenim u tački a.

Mjerenje stupnja modulacije instrumentom s kazaljkom provodi se na više načina. Npr. metodom prema sl. 102 potenciometrom

P podesi se napon U , kojemu je predznak suprotan predznaku ispravljenog moduliranog napona, tako da se dioda D_2 nalazi na pragu vodenja ($I = 0$), što se registrira mikroampermetrom (μA). Napon očitan na voltmetu V pri položaju preklopki 1—1 jednak je U_{\max} . Zatim se preklopnik stavi u položaj 2—2 i time dioda D_2 priključi u obratnom smislu. Ako se opet pomicanjem potencijometra P struja smanji do nule, napon (očitan kad je preklopka u položaju 2—2) jednak je U_{\min} . Iz ta dva podatka može se prema naprijed spomenutoj formuli izračunati m .

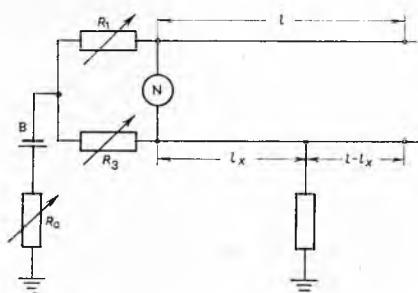
Sl. 102. Mjerenje stupnja amplitudne modulacije instrumentima s kazaljkom

metra P struja smanji do nule, napon (očitan kad je preklopka u položaju 2—2) jednak je U_{\min} . Iz ta dva podatka može se prema naprijed spomenutoj formuli izračunati m .

Određivanje mesta kvara na vodovima

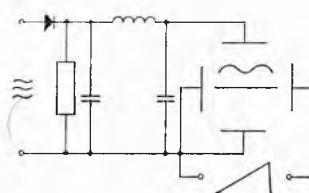
Među najkarakterističnije kvarove na nadzemnim vodovima i kabelima idu prekidi pojedinih vodiča i različita oštećenja izolacije. Zbog takvih oštećenja može doći do nepoželjnih spojeva između dva ili više vodiča ili između vodiča i zemlje. Radi utvrđivanja mesta kvara primjenjuju se različne mjerne metode. Izbor metoda mjerena ovisi o karakteru kvara, raspoloživim instrumentima, traženoj tačnosti određivanja mesta kvara, itd.

Mjerenje pomoću megaomometra i omometra može služiti da se ustanovi postojanje kvara na vodovima, tj. spoj sa zemljom, spoj između dva vodiča i prekid vodiča. *Spoj sa zemljom* ustanavljuje se mjeranjem izolacionog otpora pri otvorenim krajevima voda između zemlje i svakog pojedinog vodiča. Vodič koji ima mali izolacioni otpor u spoju je sa zemljom. *Dodir između dva vodiča* ustanavljuje se pri otvorenim krajevima voda tako da se mjeri izolacija između pojedinih vodiča. Mali otpor izolacije između dva vodiča ukazuje na oštećenu izolaciju ili znači da između njih postoji izravni dodir. *Prekid vodiča* utvrđuje se mjeranjem otpora između zemlje i svakog pojedinog vodiča, pri čemu krajevi svih vodiča moraju biti kratko spojeni i uzemljeni. Utvrđivanje povrede izolacije visokonaponskih kabela pomoću mjerila izolacije može dati pogrešne rezultate jer se zbog relativno niskog napona mjerila (~ 500 V) ne dobiva prava slika stanja izolacije.



Sl. 103. Murrayeva metoda za određivanje mesta kvara na vodu

Zbog toga se izolacije takvih kabela ispituju naponom višim od nominalnog, a visina ispitnog napona i trajanje ispitivanja navedeni su u propisima.



Sl. 101. Mjerenje stupnja modulacije osciloskopom uz prikazivanje anvelope moduliranog signala

Određivanje mesta kvara. Nakon konstatacije da postoji kvar na jastostrujnom ili telekomunikacionom vodu ili kabelu, njegovo se mjesto može odrediti metodama koje ovise o vrsti kabela, vrsti kvara, otporu itd. Od velikog broja upotrebljavanih metoda bit će spomenute samo neke.

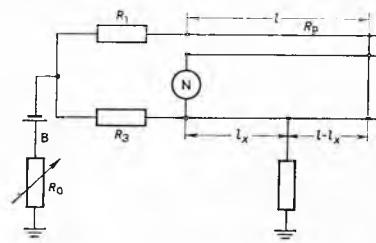
Murrayeva metoda se zasniva na primjeni Wheatstoneovog mosta (sl. 103). Dvije grane Wheatstoneovog mosta čine precizni otpornici R_1 i R_3 promjenljiva otpora. Treću granu predstavlja neispravni vodič, od njegova početka do mesta kvara, dužine l_x . Kao četvrta granu služi pomoćni vodič dužine l , najčešće jedan od ispravnih vodiča istog voda ili kabela, i s njime na kraju voda spojeni preostali dio neispravnog vodiča dužine $l - l_x$. Ako su presjeci oštećenog i pomoćnog vodiča jednaki i ako njihov otpor po jedinici dužine iznosi R_p , onda u slučaju ravnoteže tog mosta vrijedi jednadžba:

$$\frac{R_1}{R_p(l + l - l_x)} = \frac{R_3}{R_p l_x},$$

a iz nje može se izračunati udaljenost mesta kvara:

$$l_x = 2 l \frac{R_3}{R_1 + R_3}.$$

Kod određivanja mesta kvara na kabelima malog otpora upotrebljava se Murrayeva metoda sa dva pomoćna vodiča (sl.

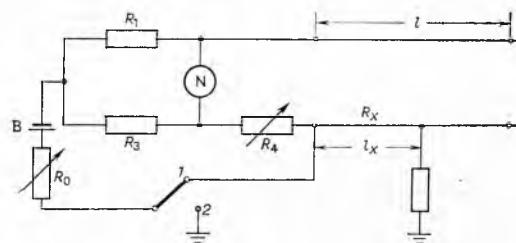


Sl. 104. Varijanta Murrayeve metode za određivanje mesta kvara na kabelima malog otpora (energetskim kabelima)

104). Iz uvjeta ravnoteže $\frac{R_1 + R_p}{R_3} = \frac{l - l_x}{l_x}$ dobije se:

$$l_x = \frac{l R_3}{R_1 + R_3 + R_p}.$$

Varleyeva metoda se upotrebljava pri određivanju mesta kvara na vodovima velikog otpora (sl. 105). Podešavanjem otpor-



Sl. 105. Varleyeva metoda za određivanje mesta kvara na vodovima velikog otpora

nika R_4 na vrijednost otpora R'_4 uspostavlja se ravnoteža mosta kad je preklopka u položaju 1 i dobije se otpor R_p petlje koju tvore pomoćni i ispitivani vodič:

$$R_p = \frac{R_1}{R_3} R'_4.$$

Podešavanjem otpornika R_4 na vrijednost otpora R''_4 kad je preklopka u položaju 2, postiže se ravnoteža mosta:

$$R_1(R''_4 + R_x) = R_3(R_p - R_x).$$

Uz jednake presjeke vodiča vrijedi odnos $\frac{R_x}{R_p} = \frac{l_x}{2l}$, pa se dobije:

$$l_x = 2l \frac{R_3 - \frac{R_1}{R_p} R''_4}{R_1 + R_3}.$$

ELEKTRIČNA MJERENJA

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

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

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

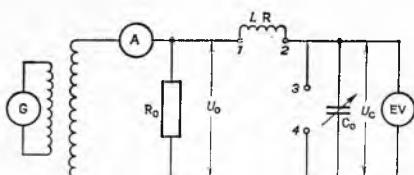
Sl. 106. Slika na zastoru katodne cijevi uređaja za utvrđivanje greške na vodovima zaključenima različitim impedancijama. a) Vod zaključen karakterističnom impedancijom voda, b) impedancija tereta manja od karakteristične impedancije (odgovara kratkom spoju voda), c) impedancija tereta veća od karakteristične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

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

Ostala mjerena

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

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



Sl. 107. Principijelna shema Q-metra

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

V. Bego D. Vujević

ELEKTRIČNA MJERENJA NEELEKTRIČNIH VELIČINA

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

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

PRETVORBA NEELEKTRIČNIH VELIČINA U ELEKTRIČNE

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