

DR JOSIP LONČAR

ELEKTRIČKA MJERENJA

ČETVRTO IZDANJE



TEHNIČKA KNJIGA
ZAGREB 1965

U V O D U

ELEKTRIČKA MJERENJA

N A P I S A O

DR JOSIP LONČAR

ČETVRTO IZDANJE

(NEPROMIJENJENI OFSETNI NOVOTISAK)



TEHNIČKA KNJIGA

ZAGREB 1965.

PREDGOVOR PRVOM IZDANJU

Ova je knjiga namijenjena kao uvodno djelo i informativni priručnik električne mjerne tehnike onima koji bilo iz kojega razloga dolaze u doticaj s električkim aparaturama i električkim postrojenjima ili imaju inače interesa na ovom području. Pisac je nastojao da uvede čitaoca u kritičko razumijevanje savremenih naprava i postupaka, no istodobno i da mnogobrojnim detaljnim podacima zadovolji potrebe tehničke prakse.

Kraj ogromnosti obrađivanog područja nisu ni ovako opsežnim dijelom od 300 stranica i 280 slika mogle biti iscrpene i sve specijalne teme. Kako se može razabrati pregledom »Sadržaja«, pojedina područja razrađena su u prvom redu principno, no dodano je i sve ono što se prirodno dalo nadovezati na obrađivanu materiju; samo za neka naročita područja, na pr. visokofrekventna, električka, temperaturna i slična posebna mjerenja, predviđeno je da se postepeno drugdje obrade, nadovezujući na ovu knjigu kao bazu.

Djelo odgovara najnovijem stanju tehnike i u njemu je registrirano ono što se piscu činilo principno važnim u današnjim tendencijama razvoja, dok su naprotiv većinom izbjegavana ulaganja u nebitne novosti konstrukcija i detalje vanjskih izvedbi, koji variraju od fabrikata do fabrikata i mogu se konačno razabrati iz kataloga samih proizvođača. Na taj način pisac se nada da će knjiga zadržati dugi niz godina vrijednost kao osnovno djelo i polazna tačka za dalje informacije. Ako su tu i tamo u knjigu uzeti i više efemerni podaci, na pr. upozorenja na propise VDE, IEC i slične, koji se od vremena do vremena revidiraju, učinjeno je to zbog ilustracije osnovâ na kojima počivaju ovakve specifikacije, tako da će se čitalac lako prilagoditi i eventualnom kasnijem revidiranom tekstu.

U tipografskom pogledu učinjeno je sve da knjiga bude u svakom pogledu besprikorno izvedena. S tim u vezi kudikamo najveći broj slika koncipiran je i izveden specijalno za ovo djelo, tako da je moglo biti provedeno i izvjesno jedinstvo simbola i oznaka. Pisac izriče zahvalu svojim pomagačima kod čitanja korektura i sličnoga, a u prvom redu g. cand. ing. Milanu Novaku na velikoj pažnji kod crtanja slika. Ugodna mu je dužnost zahvaliti se također i firmama H&B, AEG, S&H i Norma, koje su mu za ovo djelo stavile na raspolaganje izvjestan broj klišeja, uglavnom o vlastitim konstrukcijama. Također izriče zahvalu odnosnim nakladnim zavodima na dopuštenju da slike br. 8, 22, 42, 46, 56, 64, 95, 137 i 139 preuzme iz knjige *Palm, Elektrische Messgeräte und Messeinrichtungen*, Berlin 1937, Verlag von Julius Springer, te slike br. 9, 23, 24, 60, 61, 68, 147, 148, 254, 259, 260 i 261 iz »sabinog djela« cijeje mjerne tehnike ATM (*Archiv für technisches Messen*), Verlag von R. Oldenbourg, München-Berlin.

U ZAGREBU, početkom 1939.

Dr. J. L.

PREDGOVOR TREĆEM I ČETVRTOM IZDANJU

Iz raznih tehničkih razloga dosta je vremena prošlo dok se moglo poduzeti, a evo sad i dovršiti, treće odn. četvrto izdanje ovog djela.

Kako je istaknuto već u Predgovoru prvom izdanju, djelo je još od početka bilo koncipirano da daje tek »ono što se piscu činilo principno važnim«, a sa samo najnužnijim ulaženjima u »nebitne novosti konstrukcija i detalje vanjskih izvedbi«. Tako nije bilo poteškoća da se štampanje novih izdanja kojih se potreba iz dana u dan sve više osjećala, znatno ubrza i pojeftini time da se i danas važeća glavnina teksta prvog izdanja, uz unižete tek najpotrebnije promjene, donese reproducirano u ofsetnoj tehnici, a da se veća proširenja i nadopune grupiraju u posebnom Poglavlju K), sa 110 novih paragrafa i 35 novih slika. U to su poglavlje uzeta, pored potrebnih dopuna, još i velika proširenja s detaljnijim razradama balističkih galvanometarskih gibanja, fluksmetra, diagrama po Möllingeru i Geweckeu i dr. Tako se pisac nada da će i ovo novo izdanje doista biti uvodno djelo prema današnjem stanju, kao što se kod prvog izdanja nastojalo da odgovara tadašnjem stanju. Naravno, nitko više od samog pisca nije svjestan činjenice da se moglo, uz dvostruki ili i veći obujam djela, donijeti i daljih detalja iz raznih dijelom novih područja električke mjerne tehnike, no piscu se činilo da bi timè bio narušen prvobitni karakter ovog djela kao uvoda u opća električka mjerenja, odn. da bi dalja proširenja trebalo ostaviti za više specijalizirane monografije.

U tipografskom pogledu i kod ovog izdanja nastojalo se da knjiga bude što bolje izvedena. U tom pogledu zasluge pripadaju nakladnom poduzeću, koje nije žalilo troška pri opremi (fini papir, dobar uvez i sl.), zatim tiskari Izdavačko-stamparskog preduzeća Jugoslovenskih železnica u Subotici koja je pri-donijela sve unutar svojih mogućnosti za što bolje štampanje.

Zagreb, polovicom 1965.

Dr. J. L.

S A D R Ź A J

A) OPĆENITE PRIMJEDBE	Stranica
I. POGLAVLJA, ODSJEČCI, PARAGRAFI (A—1)	5
II. JEDINICE (A—2. do A—11.)	5
Suvremeni (međusobni ekvivalentni) sistem m-kg-s-A i V-A-s-m, te sistem V-A-s-cm; veličinske i numeričke relacije. Odnosi jedinica navedenih sistema prema CGS, CGS-ESJ, CGS-EMJ, i STJ (v. K—1. do K—3., te Tab. IX. na str. 298—299).	
III. O POGRJESKAMA KOD MJERENJA (A—12. do A—17.)	12
Pojam »pogrješke« (apsolutne i procentne) i »korekcije«. Sistemske i slučajne pogriješke. O tačnosti mjerenja.	
B) O ELEKTRIČKIM INSTRUMENTIMA S DIREKTNIM OČITANJEM	
I. MJERNI INSTRUMENTI PREMA NAMJENI KOJOJ SLUŽE (B—1. do B—5.)	15
Vrste instrumenata koji direktno pokazuju. Galvanometri kao nul-instrumenti i kao ballističke sprave.	
II. O MJERNIM SISTEMIMA U INSTRUMENTIMA (B—6. do B—51.)	17
Instrumenti s pomičnim magnetom. Instrumenti s pomičnim svitkom i permanentnim magnetom. Instrumenti s mekim (pokretnim) željezom. Elektrodinamski instrumenti bez željeza, željezom zaštićeni i željezom zatvoreni. Astatički instrumenti. Instrumenti s vrućom žicom. Indukcioni instrumenti. Elektrostatski instrumenti. Instrumenti sa suhim ispravljačem. Instrumenti s termopretvaračem. Sistemi s unakrsnim svicima. Ostala »kvocijentna mjerila«. Vibracioni instrumenti za mjerenja frekvencije i brzine vrtnje.	
III. IZ PRAVILA ZA MJERNE INSTRUMENTE (B—52. do B—57.)	52
Pravila VDE za mjerne sprave. Simboli za mjerne sisteme i drugo. Ostala nacionalna pravila. Internacionalna pravila (pravila IEC).	
C) APARATI ZA REGISTRIRANJE I OSCILOGRAFI	
I. APARATI ZA REGISTRIRANJE (C—1. do C—10.)	58
Klasifikacija registracionih aparata. Pisari linija i pisari točkica. Ostali načini polaganih registriranja.	
II. OSCILOGRAFI (C—11. do C—17.)	65
Petljusti oscilografii. Katodni oscilografi.	
D) OSNOVNA MJERENJA ISTOSMJERNOM STRUJOM	
I. MJERENJA OTPORA (D—1. do D—26.)	72
Konstrukcija mjernih otpora. Mjerni otpornici s čepovima i s ručkom. Klizne žice. Klizni otpornici. Wheatstoneov most: tipovi s mjernim otpornicima i s kliznom žicom; određivanje mjesta pogriješke. Thomsonov (Kelvinov) dvostruki most. Iz teorije Thomsonova mosta. Mjerenja E-I-metodom: maleni, srednji i veliki otpori. Određivanje mjesta pogriješke metodom pada napona. Mjerenja metodom ommetra. Ommetri s pomičnim svitkom; ommetri s unakrsnim svicima. Mjerenje otpora metodom gubitka naboja; primjene na određivanje najviših otpora, kapaciteta i kratkih odsječaka vremena. Ostala mjerenja otpora.	
II. MJERENJA SPECIFIČNOGA OTPORA I TEMPERATURNOGA KOEFICIJENTA OTPORA (D—27. do D—29.)	97
Mjerenja specifičnoga otpora i temperaturnoga koeficijenta kao konstanta materijala.	

	Stranica
III. MJERENJA IZOLACIJE — MEGOMETRI (D—30. do D—36.)	98
Pojam izolacionoga otpora. Propisi za izolaciju. Mjerila izolacije. Mjerenja izolacije izvan pogona. Mjerenje u pogonu po Frischovoj metodi. Kontrola dozemnoga spoja.	
IV. MJERENJE STRUJE I NAPONA (D—37. do D—44.)	105
Priključivanje ampermetara i voltmetara. Proširivanje mjernoga opsega ampermetara »porednim otporima«. Višestruki poredni otpori. Druge metode proširivanja mjernoga područja ampermetara. Proširivanje mjernoga opsega voltmetara »predotpora« (račun serijskih otpora kod voltmetara). Voltmetri s više mjernih opsega.	
V. VIŠESTRUKI I UNIVERZALNI INSTRUMENTI (D—45. do D—46.)	112
Višestruki instrumenti (za mjerenja struja, napona, otpora itd.) za istosmjernu struju. Višestruki instrument s metalnim suhim ispravljačem za mjerenja s izmjeničnim strujama. Univerzalni instrumenti, upotrebljivi kod istosmjernih i izmjeničnih struja.	
VI. MJERENJA UČINA KOD ISTOSMJERNE STRUJE (D—47 do D—50.)	114
Osnovni spojevi za mjerenja učina generatora i potrošača. Korekcije zbog vlastitog potroška vatmetara u pojedinim slučajevima.	
VII. MJERENJA BALISTIČKIM GALVANOMETRIMA (D—51. do D—60.)	117
Balistička konstanta uz otvoreni galvanometar i uz galvanometar zatvoren vanjskim graničnim otporom. Baždarenje balističkih galvanometara normalnim kondenzatorima i normalima međusobne indukcije. Balistička konstanta prema strujnoj konstanti, titrajnom vremenu i prigušenju gibanja galvanometra. Balistička mjerenja množine elektriciteta, kapaciteta, međusobne indukcije i dr. Kombinacije otpora za smanjivanje osjetljivosti balističkih galvanometara.	

E) OSNOVNA MJERENJA IZMJENIČNIM STRUJAMA

I. IZ TEORIJE IZMJENIČNIH STRUJA (E—1. do E—13.)	125
Osnovni pojmovi i osnovne relacije. Vektorsko predočivanje. Simbolička metoda rješavanje problema izmjenične struje.	
II. MJERNI OTPORI ZA IZMJENIČNE STRUJE: MJERNI KONDENZATORI I INDUKTIVITETI (E—14. do E—23.)	135
Vremenska konstanta mjernih radnih otpora. Namotaji radnih otpora za mjerenja izmjeničnim strujama. Mjerni samoinduktiviteti, međusobni induktiviteti i kapaciteti.	
III. IZVORI STRUJE I NULINSTRUMENTI KOD MJERENJA IZMJENIČNIM STRUJAMA (E—24. do E—37.)	140
Zujala s prekidanjem, zujala-strojevi i cijevna zujala (obična reakciona, viljuškom upravljana i treptajna). Nulinstrumenti za izmjenične struje: slušalice, vibracioni galvanometri, kombinacije s ispravljačima (s metalnim suhim i s titrajnim.).	
IV. TEORIJA WHEATSTONEOVA MOSTA KOD IZMJENIČNIH STRUJA (E—38. do E—43.)	152
Općenita razmatranja. Specijalni slučajevi: uspoređivanja induktiviteta i kapaciteta, mjerenja frekvencije itd.	
V. MJERENJA INDUKTIVITETA (E—44. do E—49.)	156
Wheatstoneov most; metoda ampermetra i voltmetra; metoda resonancije. Posebne metode za međusobne induktivitete.	
VI. MJERENJA KAPACITETA I KUTA GUBITAKA KONDENZATORA (E—50. do E—65.)	162
Jednostavne mosne metode. Metoda ampermetra i voltmetra. Resonancija. Mjerila kapaciteta. Nesavršeni kondenzatori; gubici u dielek-	

trikumu. Mjerenja gubitaka (Wienov i Scheringov most; vatmetričke metode; metode s katodnom cijevi). Mjerenja kod visokih frekvencija. Dielektrička konsonanta.

VII. MJERENJA VODLJIVOSTI ELEKTROLITA (TEKUĆINA) — UNIVERZALNI MOSTOVI (E—66. do E—74.)	180
Određivanje elektrolitičkih vodljivosti izmjeničnom strujom. Elektrode. Normalne otopine. Konstanta A. Univerzalni mostovi. Katodna cijev s pojačalom kao nulindikator. Mjerenja otpora spojeva sa zemljom.	
VIII. MJERENJA FREKVENCIJE I POMAKA FAZA (E—75. do E—84.)	190
Mjerenja tehničkih niskih frekvencija. Tonsko područje. Mjerenja visokih frekvencija (valomjeri). Instrumenti za mjerenja pomaka faza, odn. faktora učina. Oscilografske metode za mjerenja frekvencije i pomaka faza. Naprave za sinhronizaciju.	
IX. DIREKTNNA MJERENJA STRUJE. NAPONA I UČINA U JEDNOFAZNIM SISTEMIMA (E—85. do E—91.)	200
Direktni spojevi za jednofazna mjerenja. Korekcije zbog vlastitoga potroška instrumenta. Mjerenja metodama triju volimmetara i triju ampermetara. Mjerila praznoga učina.	
X. MJERENJA UČINA U TROFAZNIM SISTEMIMA (E—92 do E—98.)	206
Odnosi između linijskih i faznih napona, odn. struja. Mjerenja prava i praznoga učina spojevima s 1, 2 i 3 vatmetra	

F) MJERENJA METODOM KOMPENZACIJE

I. PRINCIP KOMPENZACIJE KOD ISTOSMJERNE STRUJE (F—1. do F—4.)	213
Osnovni spojevi za mjerenja napona, struja i otpora.	
II. KOMPENZATORI ISTOSMJERNE STRUJE (F—5. do F—12.)	216
Savremeni precizioni kompenzatori. Rapsov aparat. Proširenje mjernoga opsega djeliteljem napona. Kompenzator H&B.	
III. KOMPENZACIJA KOD IZMJENIČNIH STRUJA (F—13. do F—15.)	224
Nekoliko tipova kompenzatora izmjenične struje.	

G) MJERNI TRANSFORMATORI

I. OPĆENITO O INDIREKTNIM MJERENJIMA (G—1. do G—12.)	227
Naponski i strujni mjerni transformatori. Pogriješke omjera i pogriješke kuta. Važnost kutne pogriješke kod mjerenja učina, odn. radnje. Propisi i klase tačnosti. Primjeri vatmetarskih i drugih spojeva s mjernim transformatorima.	
II. IZ TEORIJE MJERNIH TRANSFORMATORA (G—13. do G—19.)	238
Faktori koji utječu na pogriješke mjernih transformatora. Karakteristične veličine mjernih transformatora.	
III. ODREĐIVANJE POGRIJESAKA MJERNIH TRANSFORMATORA (G—20. do G—25.)	245
Apsolutne metode i metode s normalnim mjernim transformatorom. Aparature po Scheringu i Albertu. te po Hohleu.	

II) IZ VISOKONAPONSKE MJERNE TEHNIKE

I. NAPRAVE ZA VISOKONAPONSKA ISPITIVANJA (H—1. do H—11.)	230
Ispitivanja s naponima tehničkih frekvencija. Mjerenja tjemnih iznosa napona iskrištima i drugim metodama. Istosmjerni naponi. Udarni naponi. Visokofrekventna ispitivanja.	

	Stranica
II. O IZVOĐENJU VISOKONAPONSKIH ISPITIVANJA (H—12. do H—16.)	259
Primjeri visokonaponskih ispitivanja. Ispitivanja visokonaponskih kabela, u tvornici i nakon polaganja. Određivanje električke čvrstoće ulja.	
I) O MAGNETSKIM MJERENJIMA	
I. METODE S ISTOSMJERNOM STRUJOM (I—1. do I—7.)	263
Balističke metode s prstenom i s jarmom. Koepselov aparat. Mjerenja Bi-spiralom.	
II. MJERENJA IZMJENIČNOM STRUJOM. (I—8. do I—11.)	268
Vatmetričko određivanje gubitaka u željezu (jednostavni i poboljšani Epsteinov aparat). Razlučivanje gubitaka. Ferometar.	
J) BROJILA ISTOSMJERNE I IZMJENIČNE STRUJE	
I. MJERNI SISTEM ELEKTRIČNIH BROJILA (J—1. do J—15.)	273
Ah-sistemi: elektrolitički i magnetni motori. Brojila kWh: elektrodinamska i indukciona. Regulacioni elementi indukcionih brojila. Trofazna kWh-brojila s dva i tri mjerna sistema. Indukcioni sistemi za mjerenja praznoga potroška. Trofazni spojevi za prazni potrošak. Brojila prividnoga potroška.	
II. O BAZDARENJU I PREGLEDU BROJILA (J—16. do J—23.)	286
Propisi za brojila. Ispitne metode i ispitni spojevi. Izvori struje kod umjetnoga opterećenja. Računski primjeri. Postupak jednakoga opterećenja.	
K) DODACI	297-346
Uz pogl. A): K—1. do K—7.; uz B): K—8. do K—18.; uz C): K—19. do K—22.; uz D): K—23. do K—64.; uz E): K—65. do K—79.; uz F): K—80. do K—84.; uz G): K—85. do K—93.; uz H): K—94. do K—98.; uz I): K—99. do K—107.; uz J): K—108. do K—110.	

KRATICE UPOTREBLJAVANE KOD OZNAČAVANJA SPECIJALNIH KONSTRUKCIJA:

AEG	= Allgem. Elektrizitätsges., Berlin-Frankfurt
E&V	= Evershed & Vignoles, Ltd., London
H&B	= Hartmann & Braun A. G., Frankfurt
L&G	= Landis & Gyr, Zug (Švicarska)
L&N	= Leeds & Northrup, Philadelphia, Pa., U. S. A.
N. Bros. & Th.	= Nalder Brothers & Thompson, Ltd., London
NORMA	= Fabrik elektrischer Messgeräte, Wien
Philips	= N. V. Philips, Gloeilampenfabrieken, Eindhoven
S&H	= Siemens & Halske A. G., Berlin-München
SSW	= Siemens-Schuckertwerke A. G., Berlin-Erlangen
T.T.&Co.	= Trüb, Tauber & Co., Zürich

A) OPĆENITE PRIMJEDBE

I. POGLAVLJA, ODSJEČCI, PARAGRAFI

1. Djelo »Električka mjerenja« obuhvaća poglavlja od A) do J), kojima je još u ovom trećem izdanju dodano poglavlje: K) DODACI. Poglavlja A) do J) raspoređena su svako na svoje ODSJEČKE, numerirane rimskim brojkama, te na svoje PARAGRAFE, numerirane arapskim brojkama. Zbog lakše orijentacije stranice, osim rednim brojevima, označene su i slovima A do K pripadnih poglavlja. Tako će se čitalac lako snalaziti u citatima odsječaka odnosno paragrafa raznih poglavlja (primjeri: A-III. = poglavlje A), odsječak III.; B-28. = poglavlje B), paragraf 28.).

U poglavlju K) donose se, uvijek uz pozivanja na odsječke ili paragrafe na koje se nadovezuje, najvažnije nadopune, i proširenja prema novijem napretku, uz glavninu starog teksta, koji se iz tehničkih razloga pri mehaničkom reproduciranju u ofsetnom novotisku morao ostavljati nepromijenjen, ili je mogao biti tek malo mijenjan; međutim jedan dio teksta, posebno odsječci A-I. i A-II., donose se s posve novim tekstom.

II. JEDINICE

2. U elektrotehnici se danas, protivno od stanja pri izlaženju 1. i 2. izdanja ovoga djela, upotrebljavaju »koherentni« (povezano zaokruženi) sistemi jedinica, bazirani na prikladnim »četvorkama« osnovnih jedinica i na ove prirodno naslonjenim izvedenim jedinicama. Konkretno: primjenjuje se sistem m-kg-s-A (MKSA) sa četiri osnovne jedinice: jedinicom duljine metar m, jedinicom mase kg, jedinicom vremena sekundom s i jedinicom jakosti struje amperom A, odnosno ovom sistemu »ekvivalentni« (na isti skup jedinica vodeći, no elektrotehničaru nešto bliži) sistem V-A-s-m sa četiri osnovne jedinice: onom električkog napona volt V, te ostale tri jedinice m, s i A kao i kod m-kg-s-A.

Oba sistema m-kg-s-A i V-A-s-m (kao i njima također ekvivalentni sistemi bazirani na nekim drugim osnovnim četvorkama, ka ošto je na pr. četvorka MKSΩ (s jedinicom električkog otpora om Ω kao četvrtom osnovnom) razlikuju se tek tim: da se kod svakog od njih polazi od drukčije četvorke osnovnih jedinica, a one ostale (u svim ovim sistemima za svaku veličinu

jednake) jedinice pojavljuju se u tom sistemu kao izvedene. Tako se na iste izvedene jedinice brzine m/s, akceleracije m/s², množine elektriciteta As i dr. nailazi u sistemu m-kg-s-A kao i u sistemu V-A-s-m, i u oba sistema kao izvedena dolazi stvarno ista jedinica snage (učina), zvana i vat W (samo u sistemu m-kg-s-A pod imenom kgm²/s³ a u sistemu V-A-s-m pod imenom VA), dok je naprotiv jedinica električkog napona, koja u sistemu m-kg-s-A figurira kao izvedena jedinica kgm²/As³, u stvari identična s osnovnom jedinicom napona volt V sistema V-A-s-m, i obrnuto: u sistemu m-kg-s-A osnovna jedinica mase kilogram kg dobiva se u sistemu V-A-s-m kao izvedena jedinica VAs³/m².

3. Dobro je znati da se stvarajući tek nebitnom promjenom od sistema V-A-s-m različiti sistem V-A-s-cm, dakle sistem s osnovnim jedinicama V, A i s istima kao kod V-A-s-m, i samo s jedinicom centimetar cm 100-struko manjom od korespondentne jedinice metra m kod V-A-s-m, dobiva također za praksu vrlo prikladan koherentni sistem jedinica, u komu sve one jedinice koje su dimenziono takve da u njima ne dolazi do irražaja razlika cm prema m izlaze identične sa V-A-s-m jedinicama (i po tom i sa m-kg-s-A-jedinicama), nejednakosti se javljaju samo između korespondentnih jedinica gdje razlika cm prema m interferira. Tako izlaze iste jedinice sa V-A-s-cm kao i sa V-A-s-m: za množinu elektriciteta As, za radnju VAs, za snagu VA, za magnetski tok Vs i mnoge druge, no treba računati s razlikama na pr. jedinicâ brzine cm/s i m/s, jakosti električkog polja V/cm i V/m, jakosti magnetskog polja A/cm i A/m, magnetske indukcije Vs/cm² i Vs/m² (ova se potonja jedinica odnedavna zove i tesla T), itd.

Velika je prednost sistema V-A-s-cm da je on bliži po tomu fizikalnim sistemima, što se kao i ovaj oslanja na cm. A i mnoge sitnije duljine, površine i volumene katkad je udobnije navoditi u cm, cm² i cm³ mjesto u m, m² i m³; slično se često i električke jedinice navode i sa cm a ne samo sa m, na pr. plošna gustoća električkog naboja često se navodi i u As/cm² osim u As/m², za gustoću električke struje rabi se A/cm² porem A/m², itd.

4. Kako prema rečenomu nema uopće razlike između mnogih jedinica sistema V-A-s-m i V-A-s-cm, a i između onih s razlikama prelaz je lagan (faktori kod prelaza su 10ⁿ uz n jednako 2, 4 ili 6, odn. obrnuto —2, —4, ili —6), ne bi već zbog toga bilo poteškoća pri upotrebi, pored jedinica V-A-s-m, također jedinica V-A-s-cm. Međutim stvar postaje još povoljnija uz pretpostavku da se, suvremeno postupajući kako će se uglavnom u ovom djelu u pravilu i činiti, upotrebljavaju samo formule pisane u obliku »veličinskih relacija« (»relacija između

veličina«, zamišljajući veličine ne samo s njihovim numeričkim iznosom nego i s njihovom dimenzionom strukturom), a da se po mogućnosti izbjegavaju t. zv. »numeričke relacije«, s konstantama promjenljivima već prema upotrebljenim jedinicama. Veličinske naime relacije daju pune odnose među raznim veličinama, pa nepromijenjeno vrijede za sve na osnovnim četvorkama izgrađene sisteme koherentnih jedinica, dakle i posebno jednako dobro za sisteme V-A-s-m (m-kg-s-A) i V-A-s-cm, uz jedan jedini uvjet: da se u svakom slučaju dosljedno upotrebljavaju samo one jedinice, osnovne i izvedene, koje odnosni sistem sačinjavaju. Tako se veličinska relacija za put s prevallen jednolikom brzinom c u vremenu t , dakle relacija $s=c \times t$, može jednako dobro primijeniti sa $s(m)=c(m/s) \times t(s)$ ili pak sa $s(cm)=c(cm/s) \times t(s)$, a može se isto tako upotrebiti, uz primjenu kilometara km i sati h (=hora), sa $s(km)=c(km/h) t(h)$, pa i uz druge jedinice duljine i vremena. Slično se i veličinska relacija za kapacitet C nekog pločastog kondenzatora, pisana u obliku:

$$C = \epsilon_0 \epsilon' \cdot S/d$$

može primjenjivati s »influencionom konstantom« $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ As/Vm sa S u m^2 i d u m, ili pak s konstantnom $\epsilon_0 = 0,08854 \cdot 10^{-12}$ As/Vcm, no onda sa S u cm^2 i sa d u cm, da bi obaput C izišlo ispravno u faradima F ili As/V (bezdimenziona »relativna dielektrička konstanta« ϵ' jest samo omjerni broj, pa ne ovisi o izboru jedinica). Naprotiv kod »numeričkih relacija«, kakva je na pr. relacija:

$$N = 1,028 \cdot M \cdot n$$

koja veže proizvedenu snagu nekog motora N u W s proizvedenim momentom vrtnje u $kg \cdot m$ (kilogram-sila $\times$ metar; pazi na razliku kg -mase kg i kg -sile kg^* ili »kiloponda« kp) i s brzinom vrtnje stroja n u okretajima na minutu okr/min , vrijedi samo uz navedene jedinice, i u njoj mjesto faktora 1,028 dolazi drugi faktor ako se na pr. N izrazi u KS.

5. Pojediniosti, s definicijama jedinica osnovnih četvorki: A) sistemā m-kg-s-A i V-A-s-m te B) sistema V-A-s-cm, čitalac će naći u poglavlju K) na str. 297. A na str. 298. i 299. naći će Tabelu IX. s najvažnijim izvedenim jedinicama pojedinih sistema, i s vezama jedinica sistema po A) i B) s jedinicama CGS-ESJ i CGS-EMJ (kraće: ESJ i EMJ), o kojima će brzo biti govora, i drugo.

Treba još dodati da se i veličine i pripadne jedinice pod A) i B) uvađalo na bazi takvih stavaka da su se same nadavale elektrotehničke formule u »racionaliziranom« obliku (bez »iracionalnog« faktora 4π u praktički važnijim relacijama): na pr.

formula za kapacitet pločastog kondenzatora izlazi u obliku $C = \epsilon_0 \epsilon' S/d$ u sistemima pod A) i B), dok se u CGS-EMJ »neracionalizirano« ta formula pisala: $C^* = \epsilon' S/4\pi d$; slično formula za jakost magnetskog polja u prstenastom svitku racionalizirano glasi $H = wI/l$ i u EMJ neracionalizirano $H^* = 4\pi wI^*/l$, označujući zvijezdicom EMJ-veličine C^* , H^* , I^* ($= 10$ A), itd.

6. Na bazi onoga što je dosad rečeno, te uz upotrebu podataka na str. 297. i 298./299., čitalac će dobiti puni pregled u suvremeno vrlo zadovoljavajuće stanje jedinica u elektrotehnici. Navedimo ipak još, zbog boljšeg razumijevanja, bar nešto historijata o tom kako se postepeno dolazilo na sadanje jedinice.

Već davno se u fizici spoznalo da je, uz ograničenje na područje mehaničkih pojava, moguće izgrađivati sisteme jedinica bazirane na tri »osnovne« jedinice, na koje se dalo prirodno nadovezati ostale mehaničke jedinice kao »izvedene«. Primjer ovakvog koherentnog sustava mehaničkih jedinica jest poznati »apsolutni« CGS-sustav (cm-g-s-sustav), baziran na osnovnoj trojci: jedinici duljine 1 cm, jedinici mase 1 g i jedinici vremena 1 s. I kod mehaničkog sistema starih tehničkih jedinica (STJ) može se zamišljati da se pošlo od trojke: jedinice duljine 1 m, već spomenute jedinice sile 1 kg* (zване i 1 kp) i jedinice vremena 1 s, pri čemu je uvelike zamrsilo odnos između CGS i STJ, što su »masa« i »sila« bitno različite veličine, pa dako masa 1 kg nipošto ne odgovara sili 1 kg* (kp). A k tomu su se nekoherentno u tehnici uvriježile na pr. jedinica snage 75 kg* m/s (KS) i druge.

Međutim kad se sistemima baziranim na tri osnovne jedinice na razne načine pokušavalo pored mehaničkih obuhvatiti i električke (razumijevajući tu i magnetske) pojave, morala se svakiput dodatno postaviti izvjesna dopunska pretpostavka, za koju se s vremenom spoznalo da je ona u bitnosti ekvivalentna »anonimnom« uvođenju četvrte osnovne jedinice. Bez ulaženja u danas već nevažne detalje, spomenimo da je tako s jednom ovakvom pretpostavkom iz mehaničkog »apsolutnog« CGS-sistema nastao na CGS naslonjeni sistem »elektrostatskih jedinica«, dakle CGS-ESJ-sistem, a s drugom je jednom dodatnom pretpostavkom izrastao na CGS naslonjeni sistem elektromagnetskih jedinica«, dakle CGS-EMJ-sistem.

7. Pri fizikalnim razmatranjima upotrebljavani su, već prema prilikama, čas CGS-ESJ-sistem čas CGS-EMJ-sistem, pa iako su se oba »apsolutna« sistema u mehaničkom području slagala, oni su se potpuno razlikovali u električnom području, prema čemu je neprestano trebalo preračunavati podatke izražene u jednom sistemu na one u drugom sistemu, i obrnuto. K tomu su, zbog ignoriranja nekih »dimenzionih« odnosa prigodom uvođenja gore spomenutih dodatnih pretpostavki, i »dimenzije«

električnih veličina izlazile neispravno, ond. za istu veličinu u ESJ ovako i u EMJ onako, i obrnuto: ista tobožnja »dimenzija« pripadala je u ESJ jednoj veličini i u EMJ posve drugoj (tako je na pr. »cm« smatran u ESJ jedinicom kapaciteta i u EMJ jedinicom induktiviteta!). Konačno su se i za elektrotehničku praksu jedinice ESJ i EMJ pokazale neke prevelike neke pre-malene.

8. Sve je to dovelo koncem prošlog stoljeća do težnje da se za neposredne praktičke potrebe elektrotehnike uvedu »praktičke« električke jedinice. A pokazalo se da je za ovaj ograničeni cilj dovoljno odabrati dvije jedinice, samovoljno uzete i uz to svakomu lako razumljivo »empirički« definirane, te da se ostale praktičke jedinice iz njih izvedu po relacijama koje razne električke veličine povezuju.

Tako su konačno, nakon raznih peripetija, samovoljno odabrane, i na kongresu u Londonu 1908. internacionalno primljene (zbog čega su onda i nazvane »internacionalnima«): jedinica jakosti struje I nazvana internacionalni amper (jakost struje koja elektrolitički sekundno izlučuje 1,11800 mg srebra) i jedinica električkog otpora R internacionalni om (otpor kod 0°C stupca 14,4521 g žive svagdje istog presjeka i dugog 106,300 cm). Po Ohmovu zakonu $E = IR$, Jouleovu zakonu $N = EI$ i sl. lako se onda dolazilo na internacionalni volt kao onaj napon na krajevima internacionalnog oma uz koji kroz ovaj teče struja internacionalni amper, na internacionalni vat kao snagu korespondentnu naponu internacionalni volt i struji internacionalni amper, te slično za ostale internacionalne električke jedinice.

Međutim, iako su ove električke jedinice bile inače prikladne za praksu, pa su se i upotrebljavale internacionalno puna četiri decenija, one su imale principnu manu, zbog koje su internacionalno s 1. I. 1948. zamijenjene novima, zvanima naprosto amper, om, volt itd. Prvobitna je naime tendencija kod postavljanja empiričkih definicija iz g. 1908. bila da se s po njima određenim amperom i omom dobiju električke jedinice u jednoj relaciji s pripadnima CGS-EMJ: da ne bude razlike između internacionalnog ampera i desetog dijela EMJ struje, zvanoga apsolutni amper, da internacionalni om iziđe baš kao milijarda EMJ otpora, zvana apsolutni om, pa da prema tomu internacionalni volt ispadne jednak stomilijunskom mnogokratniku EMJ napona, zvanom apsolutni volt, itd. Naime samo onda bi bio i internacionalni vat (električki shvaćen kao produkt internacionalnog volta i internacionalnog ampera) jednak desetmilijunstrukomu mnogokratniku 10^7 erg/s mehaničke CGS-jedinice erg/s, veličini nazvanoj apsolutni vat, i slično bi postojala jednakost između električki izvedenoga internacionalnog džula (int. vatsekunde) i apsolutnog džula (aps. vatsekunde). Međutim su definicije iz g. 1908. bile u tom smislu malko ne-

točne, kako po prilici naznačuje Tabela I. (u kojoj su označivani internacionalni amper, om, volt, vat, henri, farad itd. iz g. 1908. sa A' , Ω' , V' , W' , H' , F' itd. i apsolutni amper, om, volt, vat, henri, farad itd. sa A , Ω , V , W , H , F , itd.):

Tabela I.

1 $A' = 0,99985 A$	1 $W' = 1,0002 W$
1 $\Omega' = 1,0005 \Omega$	1 $H' = 1,0005 H$
1 $V' = 1,00035 V$	1 $F' = 0,9995 F$

Kako se vidi, bio je A' uzet prema A neznatno premalen (da je mjesto u definiciju A' uzetih 1,11800 mg Ag bilo uzeto 1,11815 mg Ag, praktički ne bi došlo do razlike A' prema A), dok je Ω' uzet s nešto znatnijom pogriješkom prema Ω prevelik. To je dalje uključivalo nejednakost i ostalih jedinica iz g. 1908. prema apsolutnima. Zato su s 1. I. 1948. internacionalno za amper A (odn. i volt V) uzeti apsolutni amper, odn. i apsolutni volt, definicijama kao na str. 297., što je onda dalo i ostale električke jedinice Ω , F , H itd. apsolutne, a i vat W je ostao samo jedan jedinstveni: apsolutni vat. Po tomu, budući da od 1. I. 1948. ni nema drugih priznatih jedinica osim apsolutnih, govori se danas ispuštajući naziv »apsolutni« samo o amperu, voltu, omu, vatu itd. prema str. 297. i Tabeli IX. na str. 298./299.

U stvari se spremao prelaz na apsolutne jedinice već prije posljednjeg rata, i prema zaključku »Internacionalnog komiteta za mjere i utege« njih je trebalo uvesti početkom 1940. No zbog rata provedba je bila odgođena, i prelaz je izvršen tek početkom 1948. Kraj malenih razlika između A' i A , pa čak između V' i V , Ω' i Ω , i t. d., u običnoj praksi prelaz se nije ni primjetio; njegov se utjecaj osjetio tek kod najpreciznijih radova, na pr. onih s »kompenzacionim aparatima«, pri najdelikatnijim laboratorijskim mjerenjima i sl.

9. U praksi bilo bi neudobno polaziti uvijek od A (odn. i V) prema definicijama na str. 297. Tu se praktički upotrebljavaju »normali« ili »standardi«, na pr. napona i otpora, po mogućnosti prilagođeni jedinicama napona i otpora prema Tabeli IX. A iz njih može se smatrati da slijede, također, ispravni H , F , W , itd. Kao normal za napon danas se uzima da proizvedeni napon t. zv. »internacionalnog Westonova normalnog elementa« kod 20°C realizira 1,01865 V. A normalni Ω , ili ma koji iznos Ω , realiziraju se vanredno točno »normalnim otporima«, najpreciznije građenima iz manganina (slitine Cu-Mn-Ni). Sa živom, uz ostalo kao u A-8., za 1 Ω supac bio bi dug 106,25 cm. Brigu za realizaciju ovih normala, te za baždarenje i »sekundarnih« normala, praktički kurentno upotrebljivanih kod preciznijih mjerenja, vode specijalni *nacionalni laboratoriji* (državni instituti) kao N. P. L. (National Physical Laboratory) u Londonu, B. S. (Bureau of Standards) u Washingtonu, Laboratoire Central d'Électricité u Parizu, P. T. B. (Phys.-Techn. Bundesanstalt) u Braunschweigu i dr.

10. Evo jo šnekih primjedbi uz upotrebu jedinica ekvivalentnih sustava m-kg-s-A i V-A-s-m, kao i sustava V-A-s-cm:

a) U veličinske relacije treba uvijek dosljedno stavljati samo iznose u *punim* jedinicama *istog* koherentnog sistema. To vrijedi i za konstante s dimenzijama, poimenice za influencionu konstantu ϵ_0 i indukcionu konstantu μ_0 , kojih vrijednosti daje:

Tabela II.

Veličina	Vrijednost u V-A-s-m	Vrijednost u V-A-s-cm
ϵ_0	$8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$	$0,08854 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vcm}$
μ_0	$1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am}$	$1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Acm}$

(Veličine μ_0 i ϵ_0 vezane su s brzinom svjetlosti u vakuumu $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 3 \cdot 10^{10} \text{ cm/s}$ relacijom: $\epsilon_0 \mu_0 c^2 = 1$; faktor 1,275 u μ_0 je zapravo $0,4\pi$.)

b) Kako bi se udobnije navodili iznosi raznih veličina koji bi s punim jedinicama davali prevelike ili premalene brojeve, uvedeni su »prefiksi« (dodaci ispred imenâ jedinica), koji punu jedinicu *J* u dekadskom omjeru s određenim faktorom *f* povećavaju ili smanjuju na sekundarnu jedinicu *f.J*:

Tabela III.

Prefiks	Kratika	Faktor <i>f</i>	Prefiks	Kratika	Faktor <i>f</i>
mili-	m	10^{-3}	kilo-	k	10^3
mikro-	μ	10^{-6}	mega-(meg-)	M	10^6
nano-	n	10^{-9}	giga-	G	10^9
piko-	p	10^{-12}	tera-	T	10^{12}

Primjeri: 1 kV=1000 V; 1 mA=0,001 A; 1 MW= 10^6 W= 10^3 kW; 1 μ F= 10^{-6} F; 1 kV/cm=1000 V/cm= 10^5 V/m; 1 G Ω = 10^9 Ω ; 1 T Ω = 10^6 M Ω .

U praksi se katkad nailazi i na nedosljedne oznake μ F mjesto pF, i slične. A upotrebljavaju se i nedekadski mnogokratnici ili dijelovi punih jedinica, na pr. 1 kW (vatsat, h=hora=sat), pa 1 GWh= 10^6 kWh.

c) Kao zaostatak prošlosti još i danas se događa u elektrotehničkoj praksi da se neke magnetske veličine katkad navode i izražene u EMJ. Zbog upozorenja stavljat će se zvjezdica uz oznake tih s EMJ izraženih veličina; odnosi pripadnih EMJ s jedinicama V-A-s-m odn. V-A-s-cm jesu ovi:

Tabela IV.

Veličina	EMJ (i kratika)	Veze s V-A-s-m i V-A-s-cm
Jakost magn. polja	ersted (Oe)	1 Oe=100 $0,4\pi$ A/m= $1/0,4\pi$ A/cm
Magn. indukcija	gaust (G)	1 G= 10^{-4} T (Vs/m ²)= 10^{-8} Vs/cm ²
Tok magn. indukcije	maksvel (M)	1 M= 10^{-8} Wb (Vs)

Primjer: prstenasti svitak pri struji 5 A kroz njegovih 318 zavoja, pri srednjoj duljini svitka 60 cm te srednjem presjeku jezgre 15 cm² i relat. magn. permeabilnosti $u'=1200$, imao bi u unutrašnjosti polje 33,3 Oe ili 2650 A/m ili 26,5 A/cm, magn. indukcija bi bila 40000 G ili 4,0 T ili 0,0004 Vs/cm², a magn. tok kroz jezgru bio bi 600000 M ili 0,006 Vs (Wb).

11. Kako se vidi, dolaze mnogo u elektrotehnici grčka slova kao oznake veličina, jedinica i prefiksa. Evo pregleda najviše upotrebljavanih slova grčkog alfabeta. *Mala slova*: α = alfa, β = beta, γ = gama, δ = delta, ϵ = epsilon, η = eta, κ = kapa, λ = lambda, μ = mi, π = pi,

ρ = ro, σ = sigma, φ = fi, ψ = psi, ω = omega, *velika slova*: Δ = delta, Σ = sigma, Φ = fi, Ω = omega.

Da naznačimo vektorske veličine, tj. one kod kojih osim *iznosa* dolazi u obzir i *smjer* djelovanja, kao i veličine (kod izmjeničnih struja) koje se mogu *predočiti* vektorima, služit ćemo se velikim slovima frakturnoga (gotskoga) pisma, na pr. $\mathfrak{D}$, $\mathfrak{W}$, $\mathfrak{Z}$, $\mathfrak{E}$, $\mathfrak{J}$.

III. O POGRJEŠKAMA KOD MJERENJA

12. U praksi se mora uvijek računati s tim da postoje *pogrješke* kod mjerenja, tj. razlike između izmjerenih i pravih iznosa mjerne veličine. Jedino su općenito kod točnijih mjerenja te razlike manje, a kod manje točnih veće. Stepem točnosti koji se može pridavati rezultatu mjerenja često se markira time da se mjereni iznos naznači s manjim ili većim brojem dekadskih mjesta. Tako u smislu mjerne tehnike 8 ampera znači svaku struju između 7,5 i 8,5 ampera; 8,0 ampera svaku struju između 7,95 i 8,05 ampera; 8,00 ampera svaku struju između 7,995 i 8,005 ampera, itd.

13. Pogriješka, ili točnije *apsolutna* pogriješka, p je iznos koji se mora *oduzeti* od rezultata mjerenja (na pr. od očitavanja instrumenta) da se dobije pravi iznos mjerene veličine. Korekcija (*apsolutna* korekcija) k je iznos koji se mora *dodati* rezultatu mjerenja da se dobije pravi iznos mjerene veličine. Prema tomu je korekcija uvijek protivnoga predznaka nego pogriješka $k = -p$.

Osim s apsolutnim pogriješkama često je zgodno raditi i s tzv. procentnim (postotnim) pogriješkama ili »pogriješkama u procentima«: $p\%$. Ako je M pravi iznos mjerene veličine, onda između p i $p\%$ postoji relacija:

$$p\% = 100 \cdot p/M$$

Na pr. Izmjereno: 110,4 V; prava vrijednost: 110,7 V. Pogriješka je $p = -0,3$ V, a korekcija $k = +0,3$ V. Pogriješka u procentima iznosi: $p\% = -100 \cdot 0,3/110,7 = -0,28\%$.

14. Pogriješke kod mjerenja (apstrahirajući od direktnih omaški zbog nepažnje, na pr. krivih očitavanja na skali instrumenata, što nipošto nije jako rijedak slučaj kod instrumenata s nekoliko skala ili sa skalama nepregledno razdijeljenima u dijelove, mogu se klasificirati u *sistematske* i u *slučajne*.

Sistematske pogriješke mogu imati uzrok u pogriješnom funkcioniranju samih sistema instrumenata ili aparatura ili u vanjskim utjecajima (na pr. temperaturnima, od vanjskih magnetskih polja i sl.) koji izobličuju rezultat mjerenja.

Među *slučajne* pogriješke mogu se ubrojiti na pr. netočnosti očitavanja zbog nesigurnosti kod procjenjivanja dijelova skale instrumenata, zatim, recimo, što očitavanje neke promjenljive veličine nije bilo izvedeno baš točno u određenom momentu i

slično. Utjecaj ovih slučajnih pogriješaka može se umanjiti, ako se izvrši nekoliko opažanja (mjerenja) iste veličine, pa se kao rezultat uzme aritmetička sredina (aritmetička srednja vrijednost) dobivenih očitavanja. Naime prema Gaussovoj teoriji t. zv. »metode najmanjih kvadrata« aritmetička sredina opažanih vrijednosti je najvjerojatnija vrijednost mjerene veličine. Iz formule pak za »srednju pogriješku« ove aritmetičke sredine, koja nas ovdje ne treba pobliže zanimati, slijedi da je spomenuta »srednja pogriješka« obrnuto proporcionalna ne možda s brojem opažanja, nego samo s drugim korijenom iz broja opažanja. Nema dakle pravoga interesa uzimati odviše mnogo opažanja, tim više što se, naravno, sistematske pogriješke većim brojem opažanja ne uklanjaju.

Ako je na pr. pet mjerenja nekoga određenoga napona, izvedenih s po mogućnosti jednakom pomnjom, dalo redom vrijednosti: 121,1 V; 121,3 V; 121,1 V; 121,4 V; 121,5 V, najvjerojatnija je vrijednost aritmetička sredina:

$$U = (121,1 + 121,3 + 121,1 + 121,4 + 121,5) : 5 = 121,3 \text{ V.}$$

15. U tehnici električkih mjerenja procentualna veličina pogriješaka kod različitih mjerenja može biti od vrlo različite važnosti. Na pr. kod mjerenja izolacionih otpora pojedinih vodiča nekoga voda jednoga prema drugomu ili prema zemlji ne može biti od naročitoga interesa poznavati iole točnije takove otpore, jer su oni i onako promjenljivi, a i propisi traže samo da izolacioni otpori ne budu ispod određenih granica. Ako je dakle propisana granica u nekomu slučaju 0,22 MΩ, a mjerenje dađe nekoliko MΩ, onda je izolaciono stanje vrlo dobro, bez obzira na to da li je rezultat za megom viši ili niži. Mnogo veća točnost, ali ipak ne pretjerana, može se zahtijevati kod magnetskih mjerenja. Poznato je naime da se magnetska svojstva na pr. transformatorskih limova (krivulja magnetiziranja i gubici energije kod izmjeničnoga magnetiziranja) mogu ponešto izmijeniti mehaničkim obrađivanjem, pa i samim savijanjem limova i inače, pa zato i pripadna magnetska mjerenja ne moraju biti pouzdanija, nego odgovara varijacijama mjerenih svojstava, koliko se mogu očekivati u praksi.

Naprotiv ima u tehnici slučajeva gdje treba svim sretstvima ići za što većom točnošću, ako se ne žele dobiti malo vrijedni rezultati. Takovi su slučajevi na pr. adjustiranje shuntova (porednih otpora) za ampermetre, mjerenja neznatnih napona (milivolta) kod temperaturnih mjerenja termoelementima itd.

16. Naročito velika točnost potrebna je kod onih mjerenja gdje se mjerenom veličinom indirektno udesi neka druga veličina, koja varira s drugom, trećom ili možda još višom potencijom mjerene veličine. Ako je naime ta druga veličina, najvažnija u danomu slučaju, proporcionalna s n-tom potencijom prve,

onda treba uzeti u obzir da se sitne pogreške u mjerenju prve veličine manifestiraju n -struko povećane u iznosu druge veličine. Na pr. ako neka sijalica ima uz propisani broj volta služiti kao standard jakosti svjetlosti u fotometriji, onda je vrlo potrebno da se taj broj volta (napon sijalice) kontrolira s po mogućnosti što točnijim instrumentom, jer samo 1% promjene napona sijalice s metalnom (volframovom) niti u vakuumu ima za posljedicu 3 do 4% promjene jakosti svijetla sijalice.

Uostalom u ovakovom slučaju povoljnije je udešavati jakost svijetla sijalice adjustirajući na propisanu jakost struju umjesto napona. S variranjem napona varira naime i otpor sijalice, i to rastući s naponom, tako da su varijacije struje manje intenzivne, pa 1% pogreške u udešavanju jakosti struje ima za posljedicu manju procentualnu pogrešku, najviše oko 2%, u jakosti svijetla sijalice.

17. Ako je rezultat nekoga ispitivanja ovisan o više veličina, onda se pogreške mjerenja tih veličina mogu u rezultatu sumirati tako da rezultat može postati znatno manje pouzdan, nego što su pojedina mjerenja. Na pr. ako se mjeri faktor učina (kosinus pomaka faza) kod neke izmjenične struje time da se mjere učin (vati), napon (volti) i struja (amperi) pouzdano na 1,5%, 0,5% odn. 1,0%, rezultat $k = \cos \varphi = N EI$ (i ako se uzmu potrebne korekture zbog vlastitoga potroška instrumenata) nepouzdan je sa $1,5 + 0,5 + 1,0 = 3\%$, jer se, u najnepovoljnijemu slučaju, moglo dogoditi da su vati N ispalili recimo preveliki baš za 1,5%, a volti E i amperi I premaleni za 0,5%, odn. za 1%.

Nezgodno također dolaze do izražaja već i same po sebi relativno malene pogreške kod pokušaja direktnoga određivanja »stepena djelovanja« η , osobito ako je η blizu jedinici (odnosno $\eta\%$ blizu 100%). Ako na pr. treba odrediti η nekoga transformatora koji se kreće oko 0,98 (98%), onda je dakako od velikoga utjecaja, da li za η iziđe na pr. 0,97, 0,98 ili 0,99, t. j. jesu li gubici transformatora 3%, 2% ili 1%. Međutim, ako se izmjere učini N_1 i N_2 (primarni i sekundarni) s nesigurnošću od samo 1%, to je $\eta = N_2/N_1$ nesigurno sa 2% i može poprimiti sve vrijednosti od 0,96 do 1,00 (uzevši da je 0,98 faktički iznos za η), već prema tomu kako N_1 i N_2 unutar granica najnepovoljnijih skrajnosti ispadnu. Zato se u praksi mjesto ovakovim direktnim postupkom stepen djelovanja transformatora (t. j. omjer N_2/N_1 između učina N_2 , što ga transformator sekundarno od sebe daje, i učina N_1 privedenoga transformatoru primarno) određuje indirektno, tako da se odrede gubici N' i N'' u željezu i u bakru transformatora, pa se uzme:

$$\eta = N_2 / (N_2 + N' + N'')$$

i lako je vidjeti da sad moraju izići znatno pouzdanije vrijednosti za η , makar bile moguće procentualne pogreške kod određivanja malih iznosa N' i N'' i nešto veće.

B) O ELEKTRIČNIM INSTRUMENTIMA S DIREKTNIM OČITANJEM

1. MJERNI INSTRUMENTI PREMA NAMJENI KOJOJ SLUŽE

1. Električka mjerenja izvode se bilo mjernim instrumentima s direktnim očitanjem, bilo indirektnim metodama s pomoću različitih aparatura iz kojih se na temelju određenih udešavanja, na pr. kod t. zv. »nul-metoda« na »nulu« struje odnosno napona, dobivaju podaci za određivanje iznosa mjerene veličine. Primjeri za ovo drugo jesu različiti mostovi za mjerenje otpora, induktiviteta, kapaciteta itd., pa kompenzatori (kompenzacioni aparati) za istosmjernu i za izmjeničnu struju i sl. Ima i naprava na granici između obih kategorija aparata.

Pojedine električke veličine može se mjeriti, već prema prilikama i zahtjevima na točnost i udobnost u pojedinim slučajevima, različito, bilo mjernim instrumentima s direktnim očitavanjem, bilo više indirektnim metodama (na pr. napon bilo voltmetrom, bilo kompenzatorom, koje je poslijednje mnogo točnije, ali i neudobnije; kapacitet bilo mjerilom kapaciteta, bilo mostom izmjenične struje, itd.).

2. Međutim u tehničkoj praksi, gdje god je tole moguće, pretpostavljaju se posrednim više laboratorijskim mjernim metodama mjerenja mjernim instrumentima s direktnim očitavanjem. Od ovih služe specijalno:

voltmetri za mjerenja napona

ampermetri za mjerenja struje

ommetri (odnosno megommetri) za mjerenja otpora

vatmetri za mjerenja učina

$\cos\varphi$ -mjerila (mjerila faktora učina) za mjerenja $k = \cos\varphi$
 $= N/EI$

mjerila frekvencije za mjerenja broja perioda (titraja) izmjenične struje na sekundu (dakle za mjerenja herca, Hz)

mjerila kapaciteta za mjerenja kapaciteta kondenzatora, itd.

Specijalnu grupu čine »brojila« (»strujomjeri«), koja sumiraju (integriraju), i to bilo množinu *elektricitete*, što je u nekomu određenom vremenu prošla (t. zv. ampersatna brojila za istosmjernu struju na motornom principu, ili na starom principu voltametara, kod kojih se množina *elektriciteta* mjeri elektrolitički izlučenom količinom na pr. žive), bilo *radnju* električke struje (t. zv. vatsatna brojila za istosmjernu i za izmjeničnu struju). O brojilima će biti kasnije govora u posebnoj poglavlju.

3. Za mjerenja vrlo slabih struja i napona služe *galvanometri*. Oni su prikladni i kao indikatori slabašnih struja i napona,

pa se njima specijalno može kod nul-metoda ustanoviti iščežavanje struje ili napona. U tomu dakle slučaju galvanometri služe kao nul-instrumenti i ne trebaju biti baždareni.

4. Konačno se galvanometri mogu upotrebljavati i za t. zv. balistička mjerenja za koja su naročito podesne galvanometerske konstrukcije s relativno tromim pomičnim sistemom s vlastitim titrajima u trajanju od više sekunda. Kod balističke upotrebe galvanometra ne mjeri se, kako je to slučaj u običnim prilikama, stalni otklon galvanometra proizveden nekom trajnom strujom, nego se motri trenutni otklon do koga pomični sistem galvanometra »baci«¹⁾ neki vrlo kratkotrajni prolaz struje, t. zv. udar struje (Stromstoss). Kad naime vrlo kratkotrajna struja projuri kroz galvanometar, njegov pomični sistem dobije kratki mehanički udarac (impuls), koji treba da svrši još prije nego pomični sistem dopiye da se iole jače makne. Već prema veličini dobivenoga udarca pomični se sistem onda, prepušten sam sebi nakon svršenoga trenutnoga prolaza struje, otkloni za veći ili manji »balistički«¹⁾ otklon. Teorija pokazuje da su uz opisane prilike balistički otkloni galvanometra proporcionalni množini električnosti Q što je prošla za vrijeme cijeloga udara struje kroz galvanometar, pri čemu je svejedno da li je na pr. struja 2 A tekla 0,01 s ili je struja 4 A tekla 0,005 s, jer su množine električnosti u oba slučaja jednake, budući da je $2,0 \cdot 0,01 = 4,0 \cdot 0,005 = 0,02$ As (C). A mogla je, kako i jest praktički slučaj na pr. kod izbijanja kondenzatora ili kod pojava indukcije, također struja u različitim odsječcima ukupnoga vremena t biti varijabilna, pa bi galvanometar i opet izmjerio ukupnu množinu električnosti $Q = \int i \cdot dt$, gdje se sumiranje (integracija) ima protegnuti na cijeli razmak vremena t koliko je udar struje ukupno trajao. Treba još primijetiti da se otkloni balističkoga galvanometra mogu i tako iskoristiti da se njima umjesto ampersekunda, dakle strujnih udara, mjere voltsekunde, dakle naponski udari (Spannungstoss) ili također promjene magnetskoga toka (maksvela). O svemu ovomu će kasnije biti više govora.

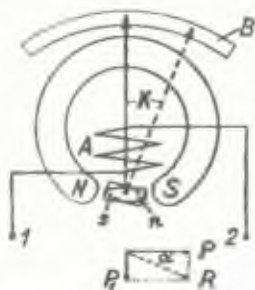
5. Kod mjerenja *istosmjernom* strujom obični galvanometri s pomičnim svitkom uvijek su prikladni kao nul-instrumenti. Kod mjerenja *izmjeničnom* strujom moraju se upotrebljavati drugi nul-instrumenti. Već prema prilikama to mogu biti, kako će se kasnije pobliže razložiti, telefonske slušalice ili specijalni t. zv. »vibracioni«¹⁾ galvanometri; no mogu se upotrebiti i obični galvanometri u prikladnoj kombinaciji s metalnim suhim ili s mehaničkim »ispravljačima«, koji izmjeničnu struju pretvore u istosmjernu, pa na ovu onda galvanometar reagira.

1) Odatle i ime »balistički«; grčki bálein = bacati.

II. O MJERNIM SISTEMIMA U INSTRUMENTIMA

6. Najstariji električki instrumenti osnivali su se na utjecaju električke struje na permanentni magnet, na pr. na magnetsku iglu (galvanometri s iglom). Princip im je bio: struja otklanja magnet. Međutim ovi t. zv. *sistemi s pomičnim magnetom* potisnuti su danas skoro posvema iz tehničke prakse drugima prikladnijima, pa ih na pr. u »pravilima VDE o mjernim instrumentima«, o kojima će još biti govora, ni nema naročito nabrojanih.

Ipak se iznimno susreću u praksi naročite konstrukcije s pomičnom magnetskom iglom po principu kao u sl. 1., na pr. kod automobilskih instrumenata za pokazivanje struje punjenja ili pražnjenja akumulatora. U magnetskom polju između polova N i S permanentnoga magneta postavljena je slobodno vrtivo magnetska igla s polovima *n* i *s* (ili igla od mekoga željeza, koja se magnetizira u magnetskom polju). Dok nema struje, igla je samo pod utjecajem magnetskoga polja permanentnoga magneta koje iglu orijentira vodoravno. Teče li kroz neki fiksni svitak A istosmjerna struja, nastaje još i magnetsko polje vertikalnoga smjera, pa se igla, a s njom zajedno i kazalo K instrumenta, otklone za neki kut α , kod koga igla padne približno u smjer rezultante obih polja. Otklon kazala je nalijevo ili nadesno, te jači ili slabiji, već prema smjeru i jakosti struje kroz A.



Sl. 1.



Sl. 2.

7. Tehnički su za mjerenja istosmjernom strujom mnogo savršeniji *instrumenti s pomičnim svitkom* (Drehspulinstrumente, moving coil instruments), kod kojih je gibljiv u polju jakoga magneta sam svitak protjecan strujom. Točnije bi trebalo ove instrumente nazivati instrumentima s pomičnim (zakretnim) svitkom i *permanentnim magnetom*, jer pomični svitak imaju i

elektrodinamski instrumenti. Princip djelovanja jest: četvero-
kutni svitak, protjecan strujom i postavljen kao na sl. 2. vrtivo
tako da mu dvije strane leže u jakom magnetskom polju, što
vlada u obje uzdušne pukotine magnetskoga kruga, sastavljenoga
od jakoga permanentnoga magneta s polnim nastavcima od
mekoga željeza i od jedne cilindričke jezgre od mekoga željeza,
dobiva zakretnu silu ili »moment vrtnje« proporcionalan struji
što teče kroz svitak (i istodobno proporcionalan jakosti magnet-
skoga polja u uzdužnoj pukotini).

Pomični svitak kod konstrukcije po sl. 2. namotan je na
aluminijском оквирићу kao nosiocu. U tome se okviriću, kod
gibanja pomičnoga sistema instrumenta, induciraju vrtložne
struje zbog kojih nastaju *prigušenja* gibanja i praktički »ape-
riodsko« (bez titranja) namještanje svitka, i s njim spojenoga
kazala, na konačni otklon. Protumoment vrtnje izvode dvije
elastične spirale (pera) koje ujedno služe i za dovod i odvod
struje svitka.

Otkloni su ovih instrumenata unutar cijeloga područja skale
praktički točno proporcionalni struji kroz svitak (»jednolika«
skala), jer se magnetsko polje, u kome se svitak zakreće unutar
granica gibanja svitka, može smatrati praktički jednoliko jakim.
Kod promjene smjera struje obrne se i moment vrtnje koji
otklanja svitak, pa su zato ovi instrumenti *neposredno* upotreb-
ljivi samo za mjerenja *istosmjernih* struja i napona, dakle kao
istosmjerni ampermetri i voltmetri.

8. Instrumenti s kazalom po shemi u sl. 2. dadu se graditi
i s tolikom osjetljivošću da mogu služiti i kao galvanometri (za
mjerenja vrlo slabih struja i napona, te za nul-metode u »mo-
stovima« itd.). No za mjerenja ekstremno slabih struja i napona,
kod nul-metoda u najosjetljivijim mostovima, kompenzatorima
itd., te za naročito osjetljiva »balistička« mjerenja kratkotrajnih
t. zv. »udara« struje i napona, mjerni instrumenti s pomičnim
svitkom izvode se u naročitoj konstrukciji predočenoj u sl. 3.:
kao instrumenti sa *zrcalnim očitavanjem* otklona, t. j. sa očitava-
njem uz pomoć zraka svjetlosti umjesto materijalnoga kazala.
Općeniti princip očitavanja otklona zrcalom vidi se iz sheme
na sl. 4. Svjetlost iz izvora R ide na zrcalce Z, koje je čvrsto
spojeno s pomičnim (otklonskim) sistemom instrumenta, i odra-
zuje se na više ili manje udaljenu skalu SS.

U promatranom specijalnom slučaju instrumenta s pomič-
nim svitkom u sl. 3. zrcalce je čvrsto vezano uz pomični svitak
koga se otklon želi mjeriti. Pomični svitak nije kao u aparatu
na sl. 2. snabdjeven krutom osovinom sa šiljcima (u prikladnim
ležajima od, recimo, ahata), nego je obješen na tankoj metalnoj
vrpci, koje torzionna sila kod zakretanja svitka izvodi protu-
moment vrtnje. I dovod i odvod struje sačinjavaju vrlo nježne

metalne vrpce. Svjetlost iz rasvjetnoga uređaja s malom električkom sijalicom i prikladnom optikom pada na zrcalce instrumenta i baca svijetlu marku (oštru tamnu liniju okruženu svijetlim poljem ili oštru svijetlu crt) na, recimo, 1 m ili više udaljenu skalu, razdijeljenu na pr. u milimetre. Kad se pomični svitak instrumenta, a s njime i zrcalce otklone za kut α , otkloni se svijetli pramen što ide sa zrcalca na skalu za kut 2α i svijetla marka pomakne se jako vidljivo na skali. Tako se postizava da se neznatni otkloni pomičnoga svitka mogu očitavati kao veliki pomaci svijetle mrlje na skali.



Sl. 3.



Sl. 4.

9. Kod konstrukcije *galvanometara*, ne samo zrcalnih nego i onih najosjetljivijih s kazalom, redovno se ne predviđaju onako energična sredstva prigušenja kao što su aluminijski okviri direktno kratko spojeni u zatvoreni prsten, kojima se kod mjernih sistema za jače struje i napone postizavaju približno beztitrajna namještanja svitka. Tako pomični sistemi galvanometara sami po sebi kod *otvorenoga* (nepriključenoga) galvanometra izvođe redovno dosta malo prigušene titraje prije konačnoga smirenja na nekomu danomu otklonu. Tek kod priključka nekoga »vanjskoga otpora« R_v na stezaljke galvanometra, dakle uz *zatvoreni* strujni krug galvanometra, titraji galvanometarskoga sistema postaju jače prigušeni. I to u tim većoj mjeri, čim se više smanjuje vanjski otpor R_v priključen na »unutarnji otpor« R_g samoga sistema instrumenta. Uzrok je tomu pove-

čanomu prigušenju kočenje gibanja od struja koje se kod pomicanja pomičnoga svitka u magnetskom polju permanentnoga magneta induciraju u strujnom krugu sastavljenom od R_v i R_g , i čim je R_v manje, tim je manji i ukupni otpor strujnoga kruga $R_v + R_g$, pa su inducirane struje jače, a prema tomu i prigušenje gibanja energičnije.

Ako je sad otpor R_g dovoljno malen, tako da se još dade dosegnuti jednom izvjesnom »kritičkom« vrijednošću R_a vanjskoga otpora R , priključenoga na galvanometar tako niski iznos $R_g + R_a$ i stanje tako silnoga prigušenja gibanja da se galvanometarski sistem više ni ne može gibati periodično nego se namjesti bez ikakvih titraja (aperiodski) na pravi otklon, onda se otpor R_a , koji odgovara ovomu »graničnom aperiodskom stanju« gibanja galvanometarskoga sistema zove *granični vanjski otpor* galvanometra. Taj granični vanjski otpor R_a važno je znati kod upotrebe galvanometra, jer se vrlo često prilike kod mjerenja udešavaju na »granično stanje« kao najpovoljnije.

Kod daljega smanjivanja iznosa vanjskoga otpora R_v na sve niže i niže vrijednosti ispod R_a galvanometar postaje prejak prigušen, pa mu se sistem giblje već »gmizavo« (kriechend), čemu se redovito nastoji izbjeći u praksi.

10. Treba dakle razlikovati tri slučaja galvanometarskoga gibanja:

- a) s manje ili više prigušenim *titrajima* sistema ako je $R_v > R_a$;
- b) *kritičko* ili *aperiodsko granično stanje* uz $R_v = R_a$; i
- c) *gmizavo aperiodsko* (prekomjerno prigušeno) gibanje uz $R_v < R_a$.

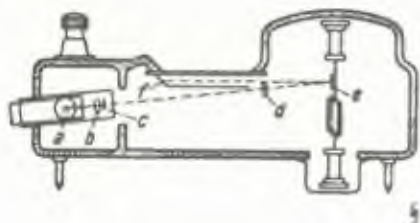
U isporjedbi s instrumentima s kazalom i šiljcima u ležajima mogu se galvanometrima sa zrcalom postići kudikamo veće strujne i naponske osjetljivosti. Tako se bez poteškoća mogu dobiti osjetljivosti karakterizirane sa 1 mm otklona na skali udaljenoj 1 m kod struja 10^{-9} A i još znatno nižih, odnosno kod napona oko 10^{-6} V i znatno nižih. Instrumenata s kazalom i sa šiljcima u ležajima ima danas već s otklonom 1 dijela skale (u instrumentu) uz struje na pr. ispod 10^{-9} A ili napone oko 10^{-6} V ili slično.

Velike su i »balističke« osjetljivosti koje se mogu dosegnuti s galvanometrima sa zrcalom, prikladno konstruiranima za balistička mjerenja. Mogu se na pr. postići, kod galvanometarskoga kruga udešenoga na granični aperiodski slučaj, otkloni oko 1 mm na skali udaljenoj 1 m već kod trenutnih prolaza množina elektricitete oko $0,03 \cdot 10^{-6}$ As ($= 0,03 \mu C = 0,03$ mikrokulona) ili još manjih.

11. Kao prelazni tipovi između više laboratorijskih instrumenata galvanometara sa zrcalom s jedne strane i instrumenata s pomičnim svitkom sa šiljcima u ležajima s druge strane mogu se smatrati oni s kazalom, no s pomičnim sistemom »obješenim na

metalnoj vrpici« (Instrumente mit Bandaufhängung), kao i *fonekl*
 moderni instrumenti »sa svijetlom markom« (Lichtmarkeninstrumente).

u raket Kod ovih posljednjih pomični je sistem *katkad* obješen *no najčešće* na vrpci, no umjesto materijalnoga kazala predviđen je naročiti uređaj za zrcalno očitavanje s tako kratkom udaljenošću od rasvjetnoga uređaja do zrcala, odnosno od zrcala do skale, da su i rasvjetna naprava i skala mogle biti smještene unutar kućišta instrumenta. Iz sl. 5. razabire se поближе konstrukcija i tok zraka svijetlosti jednoga ovakovoga instrumenta (S&H). Kako se vidi, paralelni pramen svijetla zgaga jedno nepomično kazalo (znak) c i baca njegovu sjenu preko zrcala na skalu, pa kad se zrcalo otkloni, pomakne se na skali i sjena kazala.



Sl. 5.



Sl. 6.

Poseban je tip instrumenat u sl. 6. (H&B). To je instrument s obješenjem na metalnoj vrpici, no koji ima istodobno i kazalo sa skalom u instrumentu i zrcalce za očitavanje s pomoću svjetlosti. Za manje osjetljivosti upotrebljava se očitavanje kazalom, a za veće zrcalno očitavanje uz pomoć dodanoga prikladnoga vanjskoga rasvjetnoga uređaja sa skalom.

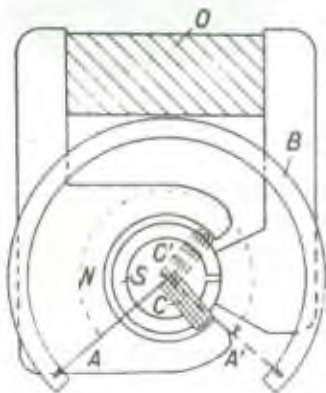
Opisani instrumenti, pogotovo oni sa svijetlom markom, mogu kraj svojih velikih osjetljivosti u mnogim prilikama poslužiti i tamo gdje su prije morali biti upotrebljavani obični galvanometri sa zrcalom, što je naročito udobno u tehničkoj praksi.

12. Naročita izvedba instrumenata s pomičnim svitkom jesu novije konstrukcije, kao ona na sl. 7., s proširenom skoro »kružnom« ili »prstenastom« skalom, koja ima opseg skoro punoga kuta (u praksi oko 270° do 300°), dok obične izvedbe, po sl. 2. mjernih sistema s pomičnim svitkom dopuštaju skale široke samo oko 90° . Izvedba u sl. 7. je takova da se u magnetskom polju skoro prstenaste uzdušne pukotine, dobivene osobitim oblikom i rasporedajem polnih nastavaka N i S od mekoga željeza, nalazi samo jedna strana pomičnoga svitka C koji je vrtiv oko ekscentrično (postrance) smještene osi. Šrafirani dio O mag-

netskoga kruga jest magnet od »oerstita« (novoga specijalnoga čelika za permanentne magnete s primjesom aluminija i nikalja, koji je magnetski još bolji od već otprije uvedenih čelika za magnete s voframom, odnosno s kobaltom). Kako se vidi, kazalo A instrumenta može pokazivati otklone na skali B instrumenta sve do položaja C' svitka, odnosno A' kazala.

Ima i ponešto drukčijih konstrukcija instrumenata sistema pomičnog svitka s kružnom skalom; a izvedbi sa širokom skoro kružnom skalom nalazi se i kod instrumenata drugih mjernih sistema, poimence kod onih s pomičnim (mekim) željezom i kod t. zv. indukcionih.

13. Karakterizirajući ukratko instrumente s pomičnim svitkom mogli bismo ih nazvati izrazito kvalitetnim instrumentima istosmjerne struje, prikladnima za *najpreciznije* izvedbe. Njihove su prednosti naročito osjetljivost, jednolikost skale i praktička neovisnost o utjecajima vanjskih magnetskih polja. Nažalost im je konstrukcija skuplja i manje robustna, nego na pr. kod instrumenata s pomičnim željezom. Već istaknuta osobitost instrumenata s pomičnim svitkom da nisu *direktno* upotrebljivi za mjerenja izmjeničnih struja znatno je ublažena novijim razvojem



Sl. 7.



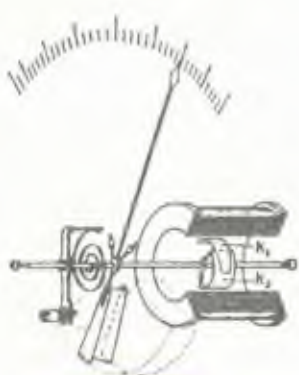
Sl. 8.

mjerne tehnike kojim je *indirektno* otvoreno i područje izmjeničnih struja instrumentima s pomičnim svitkom time da se ovi kombiniraju s metalnim suhim ispravljačima, dok se već odavna znade iskorišćivati mogućnost mjerenja i visokofrekventnih struja kombiniranjem osjetljivih instrumenata s pomičnim svitkom s t. zv. »termo-parovima«, o čemu će svemu biti još govora.

14. Najrašireniji su kao ampermetri i voltmetri u praktičkoj upotrebi *instrumenti s pomičnim željezom* (Dreheiseninstrumente, moving iron instruments). Zovu ih i instrumentima s *mekim* že-

ljezom (Weicheisenmessgeräte, soft iron instr.), odnosno *elektromagnetskim* instrumentima. To su po konstrukciji najjednostavniji električki instrumenti, vanredno mnogo upotrebljavani ne samo u običnim prilikama za tehničke svrhe (na pr. na ras-klopnim pločama i sl.), nego u vrlo usavršenim novijim izved-bama i kao izrazito precizioni instrumenti.

Princip mjerenja osniva se na djelovanju magnetskoga polja struje što teče kroz čvrsti svitak, na meko željezo. Najstariji, tehnički još nezreli instrumenti ovoga tipa iskorišćivali su pojavu da štapić od mekoga željeza, obješen na elastičnom peru, biva magnetiziran i uvlačen dublje u unutarlost svitka protjecanoga strujom. Slično mehaničko djelovanje na ekscentrično vrtivi listić



Sl. 9.



Sl. 10.

od mekoga željeza primijenjeno je kod nekih kasnijih, tehnički usavršenih konstrukcija, naime kod t. zv. instrumenata s *plo-snatim* svitkom po shemi u sl. 8. Magnetsko polje struje kroz svitak 1 djeluje na željezni listić 3, s kojim se zajedno otklanja i kazalo 4 instrumenta. No češće se u savremenim konstrukcijama upotrebljavaju t. zv. instrumenti s *okruglim* svitkom. U takvom se svitku, po shemi u sl. 9., nalaze dva komadića lima od me-koga željeza, jedan k_1 čvrst, a drugi k_2 pomičan. Oba se komadića djelovanjem magnetskoga polja struje, puštené kroz svitak, magnetiziraju tako da se međusobno odbijaju, pa se pomični listić željeza otkloni zajedno s pripadnim kazalom. U sl. 10 prikazana je praktička izvedba jednoga ovakovog mjernog sistema s okruglim svitkom, no postoje i izvedbe s ponešto druk-čijim rasporedajima listića od mekoga željeza.

Prigušenje titraja kod instrumenata s pomičnim željezom jest, kako se vidi iz sl. 8. do 10., mehaničko s uzduhom (s me-talnom »zastavicom« 7, koja koči gibanje gibljući se u »prigušnoj komori« 8.) Za protumoment vrtnje iskorišćuje se ili sila teža

(sistem u stabilnom ravnotežju), kao u sl. 8., ili (mnogo češće) elastičnost spiralnoga pera, kao kod izvedbi u sl. 9., odn. 10.

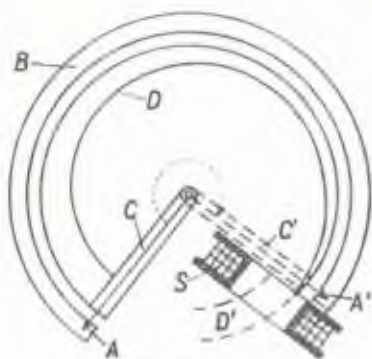
15. Kako listići od mekoga željeza lako slijede svojom magnetskošću promjene magnetskoga polja svitka, to se kod instrumenata s pomičnim željezom moment vrtnje ne obrne, ako se smjer struje izmijeni, pa instrumenti ovoga sistema mogu uglavnom mjeriti uz istosmjerne struje s istom skalom bez daljega i izmjenične struje tehničkih niskih frekvencija. Kod mjerenja izmjeničnih veličina oni pri tomu pokazuju t. zv. *efektivne* vrijednosti (vidi kasnije pod B-38.), s kojima se u praksi baš i računa, a karakter skale jest, barem uglavnom i osobito u prvomu dijelu, »kvadratičan«. Ako se naime struja pojača na dvostruko, magnetsko polje postane dvostruko jako, pa ujedno i magnetskost mekoga željeza postane približno dvostruka, te prema tomu kod dvostruke struje moment vrtnje postane približno četverostruk.

16. Kvadratične skale nisu baš poželjne u mjernoj tehnici, jer su kod njih, kraj danoga mjernoga opsega instrumenta, niže vrijednosti mjerene veličine, na pr. kod opsega skale 5 A vrijednosti 0,5—1,0—1,5 A, tijesno nagomilane na početku skale. Tako bi, uz točno kvadratični karakter skale, na pr. desetom dijelu maksimalnoga iznosa koji instrument mjeri odgovarao samo stoti dio maksimalnoga otklona. To znači, da se rečeni iznos ne bi dao više praktički pravo mjeriti, dok se naprotiv deseti dio maksimalnoga otklona, koji bi se uz dane prilike pokazao na jednolikoj skali, dade još vrlo točno očitati.

Zato se većinom kod instrumenata s pomičnim željezom dijelovi skale nanesu samo za vrijednosti obasegnute sa, recimo, gornje četiri petine ili najviše sa devet desetina maksimalnoga iznosa, pa na pr. ampermetar do 5 A ima skalu i mjeri zapravo samo struje od 1 do 5 A, odnosno od 0,5 do 5 A, dok je analogni instrument s pomičnim svitkom snabdjeven jednolikom skalom od 0 do 5 A. Uostalom svi instrumenti koji *direktno* mjere izmjenične struje (efektivne iznose) imaju skalu, bar u početku, uglavnom kvadratičnoga karaktera, pa se i kod njihovih osjetljivijih izvedbi opaža nedostatak osjetljivosti kod silaženja do sve slabijih struja i napona. Naprotiv u gornjim dijelovima dadu se prikladnim mjerama skale učiniti više jednolike, pa čak i pri kraju stisnuti, na pr. kod instrumenata s pomičnim željezom time da se dade naročiti oblik listićima od mekoga željeza.

I kod instrumenta sa širokom »kružnom« skalom (oko 270°) po shemi u sl. 11., gdje svitak S protjecan strujom uvlači u sebe više ili manje komad željeza D u obliku srpa smješten na vrtivoj ručki C, dade se postići da glavni dio skale B ograničene položajima A i A' kazala ima dosta jednoliku podjelu.

17. Velika su mana starijih instrumenata s pomičnim željezom bile zamjetljive nejednakosti njihovih otklona prema tomu da li se kod udešavanja određene struje išlo »uzlazno« ili »silazno« (počevši od slabijih ili od jačih struja), kao i razlike očitavanja kod jednakih iznosa istosmjernih i (efektivnih) izmjeničnih struja, tako da su se instrumenti za upotrebu s izmjeničnim strujama baždarenjem s takovim strujama snabdjevali skalom samo za izmjenične struje (koja je tek grubo vrijedila i za istosmjerne). Ove nejednakosti, zbog kojih su instrumenti s pomičnim željezom još do ne jako dugoga vremena bili malo cijenjeni za preciznija mjerenja, imale su glavni razlog u upotrebljenim neprikladnim komadima mekoga željeza koji su naročito pokazivali pojav magnetske histereze (a kod izmjeničnih magnetskih polja i pojav vrtložnih struja). Međutim bolje građeni današnji instrumenti s pomičnim željezom, sa specijalnim vrstama magnetskoga materijala s neznatnom histerezom, skoro su potpuno slobodni od spomenutih mana, pa u najboljim izvedbama mogu dati upravo odlične precizione instrumente, s otklonima praktički posve istima kod jednake jakosti istosmjernih struja i izmjeničnih s frekvencijama recimo do 100 ili 150 Hz.



Sl. 11.



Sl. 12.

18. Kod točnijih mjerenja s instrumentima s pomičnim željezom neugodno se zamjećuju pogreške mjerenja u slučaju da su instrumenti izvrgnuti utjecaju vanjskih magnetskih polja, na pr. od susjednih vodiča ili svitaka protjecanih strujom, od transformatorskih »rasipnih« magnetskih tokova, itd. U tomu slučaju mnogo pomaže ako se instrument postavi podalje, ili u zgodniji položaj, u kome je učinak stranoga polja manji. A radikalnije se ovoj poteškoći izbjegava upotrebom u novije vri-

jeme proširenih t. zv. *astatičkih* mjernih sistema. Uzmimo na primjer dva kompletna mjerna sistema s pomičnim željezom, kruto tako učvršćena na zajedničku osovinu da se njihovi momenti vrtnje sumiraju. Ako su sad svici obih sistema protjecani strujom u takovom smjeru da magnetska polja obih svitaka imaju protivne smjerove, onda koliko se superpozicijom vanjskoga magnetskoga polja oslabi magnetsko djelovanje jednoga sistema, toliko se pojača djelovanje drugoga, pa se u konačnom efektu djelovanje vanjskoga polja praktički eliminira.

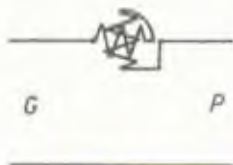
Sličan astatički rasporedaj upotrebljava se za eliminiranje utjecaja vanjskih polja i inače, poimence kod elektrodinamskih mjernih sistema, kako će još biti razloženo. Osim astatičkoga rasporedaja primjenjuje se kod mjernih sistema s pomičnim željezom u novije vrijeme i magnetska zaštita mjernoga sistema u obliku kućišta od magnetski naročito prikladnih materija koje magnetske linije vanjskoga polja na sebe skreću i tako drže podalje od mjernoga sistema; kod elektrodinamskih sistema ovakova je zaštita već prije uvedena.

19. Glavne su osobitosti instrumenata s pomičnim željezom, prema gornjemu, jednostavnost (a prema tomu i jeftinoća) njihove konstrukcije, te mehanička jakost, zbog čega i jesu u praksi tako jako rašireni, osobito kod mjerenja izmjeničnih struja i napona. Nasuprot tomu treba kod njih spomenuti prosječno ipak manju preciznost, te nejednolikost skale i slabu osjetljivost za neznatne struje, a i učinci vanjskih polja ne mogu se uvijek zanemariti, osim kod astatičkih ili magnetski zaštićenih izvedbi.

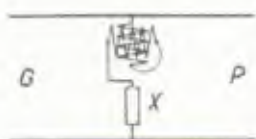
20. Za osobitu preciznost dadu se konstruirati *elektrodinamski instrumenti* (dinamometrički instrumenti). I ovo su instrumenti koji mjere jednako istosmjerne i izmjenične struje. Princip im je bitno drukčiji nego kod prethodnih instrumenata. Prema sl. 12. u polju jednoga nepomičnoga svitka protjecanoga strujom nalazi se umjesto mekog željeza jedan pomični (vrtivi) svitak, također protjecan strujom. Između oba svitka, kad kroz njih teku struje, rada se posredstvom njihovih magnetskih polja t. zv. »elektrodinamsko djelovanje«, zbog koga se pomični svitak nastoji postaviti paralelno nepomičnomu, točnije tako da magnetski tokovi obih svitaka budu usporedni i uz to istoga smjera. Nastalomu momentu vrtnje protivi se elastičnost spiralnih metalnih pera, koja ujedno služe (slično kao kod instrumenata po sl. 2.) za dovod i odvod struje pomičnom svitku. Tako rezultira neki otklon, kod koga zakretne sile drže ravnotežje elastičnim silama obih pera. Kut otklona α kod elektrodinamskih instrumenata raste, bar približno i u najvećem dijelu skale, proporcionalno jakosti struje I_1 u prvomu i proporcionalno jakosti struje I_2 u drugom svitku, dakle proporcionalno umnošku $I_1 I_2$.

21. Ako *ista* istosmjerna struja $I = I_1 = I_2$ teče redom kroz jedan i drugi svitak, kaošto je to slučaj kod mnogih elektrodinamskih ampermetara (spoj kao u sl. 13.; kod G je priključen generator ili izvor struje, kod P potrošač) i kod elektrodinamskih voltmetara (sl. 14.; X je dodani otpor volmetra, obično nekoliko hiljada oma, u kome se, kako će još biti pobliže razmotreno, potroši ostatak mjerenoğa napona, što ostane neutrošen u svicima), onda moment vrtnje raste, prema gornjemu, proporcionalno s *kvadratom* struje (proporcionalno s I^2), pa je skala (približno) kvadratičnoga karaktera, sa svim neudobnostima od toga u početku skale.

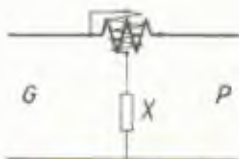
Kod izmjeničnih struja otklon je proporcionalan s kvadratom efektivne vrijednosti, a vrijedi posve ista skala kao kod istosmjernih struja, bar recimo do 100 ili 150 Hz, a i dalje. Zbog toga se precizioni elektrodinamski instrumenti upotrebljavaju, sa skalom baždarenom s pomoću istosmjerne struje, kao »normalni« instrumenti izmjenične struje za baždarenje i nadziranje ostalih.



Sl. 13.



Sl. 14.



Sl. 15.

Elektrodinamski instrumenti izvode se, za najslabije izmjenične struje, i u obliku galvanometara sa zrcalnim očitavanjem. No postignute osjetljivosti znatno zaostaju za onima kod zrcalnih galvanometara s pomičnim svitkom i permanentnim magnetom za istosmjerne struje.

22. Elektrodinamski sistemi važni su pogotovo zato, što mogu biti građeni i priključeni kao *vatmetri*. Spoj je onda kao u sl. 15, t. j. takov, da jednim svitkom sistema, t. zv. *svitkom struje* (redovno nepomični svitak, s malo zavoja deblje žice), koji se ukopča u glavni tok struje, teče struja I uzimana iz nekoga izvora (generatora) ili slana u neki potrošač struje, dok je drugi svitak, t. zv. *svitak napona* (redovno pomični, s mnogo zavoja tanje žice) zajedno s dodanim otporom X , analognim onomu kod voltmetara, priključen paralelno glavnom toku na napon E izvora ili potrošača, tako da kroz taj svitak teče, po Ohmovu zakonu, struja I' proporcionalna tomu naponu E . Uz dane prilike bit će dakle, uz suponiranu proporcionalnost sa I i I' , otkloni instrumenta praktički proporcionalni sa $I.I'$, t. j. sa $E.I$, dakle u zadnjoj liniji s mjerenim učinkom $N = E.I$ u vatima.

A i kod izmjeničnih struja instrument (uz praktički »neinduktivni« otpor kombinacije: svitak napona + dodani otpor) svojim otklonima pokazuje (pravi) učin: $N = E \cdot I \cdot \cos \varphi$. A to je formula za učin (vate) kod jednofaznih struja. Elektrodinamski instrumenti mogu dakle služiti kao vatmetri istosmjerni i izmjenični, i to s istom, uglavnom jednolikom (linearnom) skalom, a ne približno kvadratičnom, kao kod ampermetara i voltmetara.

23. Evo zašto je važno da kombinacija »naponski svitak + dodani otpor X « u sl. 15. predstavlja prema izmjeničnim strujama čisti radni otpor R_w (neinduktivan i nekapacitivan), ako instrument treba da pokazuje baš iznos pravoga učina $N = EI \cos \varphi$, te da skala vata za istosmjerne učine vrijedi i za izmjenične. Ako je i momentana jakost u času t izmjenične struje u *strujnom* svitku, a i' korespondentna vrijednost u *naponskom* svitku, onda će, u promatranom času, djelovati u instrumentu moment vrtnje proporcionalan umnošku $i \cdot i'$. Kraj brzo periodski promjenljivih veličina i i i' izvodit će i sam moment vrtnje brze periodske varijacije (postajući, općenito, na momente čak negativan), a kako tromi otklonski sistem vatmetra ne će moći slijediti te varijacije, on će se otkloniti koliko odgovara *prosječnom* iznosu momenta vrtnje, dakle proporcionalno prosječnom iznosu produkta $i \cdot i'$. Međutim za ovaj posljednji iznos jednostavnim matematskim razmatranjem dobiva se izraz $0,5 \cdot I_m \cdot I'_m \cdot \cos \psi = I \cdot I' \cdot \cos \psi$, gdje su I_m i I'_m »maksimalne«, a I i I' »efektivne« vrijednosti (sinusoidno) periodskih struja i i i' , dok ψ označuje međusobni pomak faza tih struja, t. j. okolnost da maksima, minima, prolazi kroz nul-vrijednosti itd. kod struje i' dolaze nešto kasnije (ili nešto ranije) nego kod i , dakle vremenski *pomaknuto* prema analognim stadijima veličine i . Koji je dio punoga kuta kut ψ , za taj su dio trajanja pune periode T vremenski pomaknute vrijednosti i' prema vrijednostima i ; na pr. ako je $\psi = 60^\circ = \frac{1}{6}$ punoga kuta, onda između maksima, minima itd. struje i i korespondentnih stadija struje i' proteče uvijek vremenski razmak $T/6$, šestina trajanja periode.

Kako se vidi, od odlučnoga je utjecaja na prosječni iznos produkta $i \cdot i'$, a po tomu i na otklon vatmetra, veličina pomaka ψ , jer se otklon instrumenta udesi proporcionalno kosinusu toga kuta ψ . Ako dakle instrument treba da pokazuje baš učin $N = EI \cos \varphi$ između struje i kroz strujni svitak i napona e , primijenjenoga na kombinaciju »naponski svitak + dodani otpor« i pomaknutoga u fazi prema za kut φ , onda je očito potrebno da bude $\psi = \varphi$. A da to bude, treba da spomenuta kombinacija predstavlja čisti radni otpor R_w , jer po najosnovnijim zakonima izmjenične struje samo pod tim uvjetom postoji *podudaranje* u fazi (istodobnost maksima, minima, prolaza kroz nul-točke itd.) između i' i e , pa će pomak faza između i i i' biti isti kao i pomak

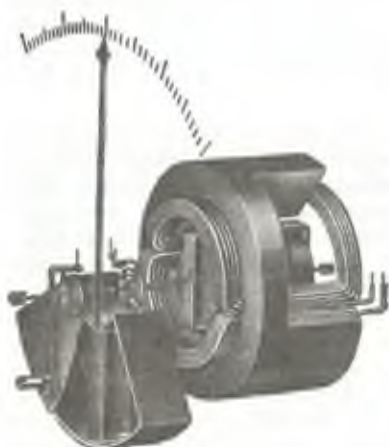
faza između i i e : $\psi = \varphi$, a i efektivni iznos I' struje kroz naponski svitak bit će s efektivnim iznosom E napona, primijenjenoga na vatmetar, vezan baš takovom relacijom $I' = E/R_w$ kao kod istosmjernih struja. Instrument koji dakle kod istosmjernih struja daje otklon proporcionalan sa $I' \cdot I$, a po tomu i sa $N = EI$ vata, davat će kod izmjeničnih struja otklon određen sa $I' \cdot I \cdot \cos \varphi$ a po tomu i sa $N = EI \cos \varphi$ vata, i to s istom skalom vata. A to je baš i trebalo dokazati.

Praktički se postizava da kombinacija »naponski svitak + dodani otpor X « pretstavlja, po mogućnosti i do određene granice frekvencija, čisti radni otpor na taj način da se X , koji i onako sa svojim hiljadama oma kudikamo prevladava u kombinaciji »naponski svitak + X « tako namota da praktički uzeto nema samoinduktiviteta i vlastitoga kapaciteta.

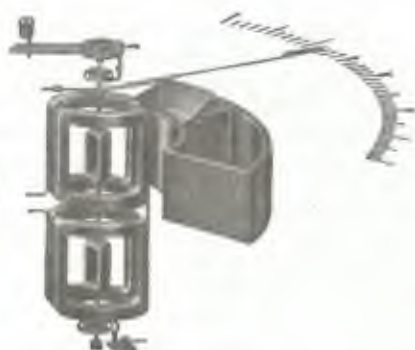
Neznatni pomaci faza između napona i struje u naponskom svitku, dakle neznatne diferencije između φ i ψ , u koliko ipak do njih dođe, ne utječu kod mjerenja učina $EI \cos \varphi$ mnogo kod velikih iznosa »faktora učina« $k = \cos \varphi$ i mogu se zanemariti, no mogu biti od jakoga utjecaja (i zahtijevati uzimanje korekcija) kod mjerenja učina s malim $k = \cos \varphi$, na pr. učina transformatora u praznom hodu. Tako na pr. uz razliku $\delta = \varphi - \psi = 0^\circ 10'$ vatmetar griješi (zaokruženo): kod $k = 0,8$ samo 0,2%, kod $k = 0,5$ još uvijek samo 0,5%, ali kod $k = 0,2$ već 1,4% i pogriješka dalje naglo raste kod silaženja prema još nižima vrijednostima k . Kod $\delta = 1^\circ$ pogriješka 1% postigla bi se već kod k oko 0,85, 2% kod k oko 0,65, a kod $k = 0,2$ vatmetar bi već griješio oko 9% (i kod nižih iznosa k naglo sve više i više). Teži su dakle zahtjevi na vatmetar kod manjih $\cos \varphi$.

24. Instrumenti po shemi u sl. 12. nemaju željeza, pa kod njih nema ni neprilika od histereze i vrtložnih struja, niti razlika u podacima kod mjerenja istosmjernih i izmjeničnih struja istom skalom. No magnetska polja u njima su razmjerno slaba, pa su i momenti vrtnje u ovim instrumentima slabi. Ovako *bez željeza* instrumenti moraju dakle biti nježnije konstrukcije sa slabijim perima, a njihove podatke ne samo da mogu znatno izobličiti vanjska magnetska polja, superponirana slabim vlastitim magnetskim poljima instrumenata, nego mogu postati zamjetljivi čak i elektrostatski učinci od električkih polja u slučaju nešto većih napona (razlika potencijala) između nepomičnih i pomičnih dijelova instrumenta. Da se izbjegne neprilikama zbog utjecaja vanjskih magnetskih polja, pokušalo se elektrodinamske instrumente graditi s naročitim zaštitnim oklopom od željeznog lima, pa su tako nastali *željezom zaštićeni* (eisengeschirmt) elektrodinamski instrumenti. Ovom magnetskom zaštitom poboljšava se donekle i magnetski krug instrumenta, pa se dobiva nešto veći moment vrtnje, iako se s druge strane kod mjerenja izmjeničnih struja uvode neprilike zbog željeza.

Ako se međutim željezo upotrebi u tolikoj mjeri i tako rasporedi, da ono naročito sačinjava bitni dio magnetskoga kruga kojim se zatvaraju magnetske linije proizvedene u instrumentu, onda nastaju t. zv. *željezom zatvoreni* (eisengeschlossen) elektrodinamski, ili kako ih također katkad zovu: »ferodinamski« mjerni sistemi kao onaj u sl. 16. Oni su pogotovo zaštićeni od vanjskih magnetskih polja, a imaju i relativno jak moment vrtnje. Neprilike zbog prisustva željeza uspjelo je u novije vrijeme uglavnom svladati i kod ovih instrumenata, kao i kod onih s mekim željezom.



Sl. 16.



Sl. 17.

25. Upoznali smo tri podgrupe elektrodinamskih instrumenata: a) bez željeza, b) željezom zaštićene i c) željezom zatvorene. Radikalnu zaštitu protiv magnetskih polja pružaju bez upotrebe željeza kao u neku ruku zasebna podgrupa: d) *astatički elektrodinamski instrumenti*. Kako se razabire iz sl. 17., kod njih su, analogno astatičkim instrumentima s pomičnim željezom, kombinirana u jednom instrumentu dva mjerna sistema, montirana na istu osovinu, a protjecana na protivni način električkim strujama. Tako eventualno vanjsko »homogeno« (na različitim mjestima jednako) polje, koliko jedan sistem u djelovanju potpomogne, toliko drugi oslabi, pa biva u ukupnom djelovanju eliminirano.

Kako se vidi iz sl. 12., 16. i 17., upotrebljava se i kod elektrodinamskih instrumenata »uzdušno prigušenje« sa zastavicama, koje se giblju u prigušnim komoricama.

26. Dajući općeniti pregled elektrodinamskih sistema mogli bismo instrumente ove grupe označiti kao vrlo važne naročito za najpreciznija mjerenja kod *izmjeničnih struja*, gdje precizioni

instrumenti s pomičnim svitkom i permanentnim magnetom ne dolaze direktno u obzir. Sistemi po elektrodinamskom principu prikladni su za doista precizne konstrukcije, doduše ne tako jednostavne i čvrste i s prosječno ne s tako malo vlastitoga potroška električne snage kao one s pomičnim željezom ali s mogućnostima primjene i za mjerenje *učina*, a ne samo struje i napona. Izvedbe bez željeza same po sebi daju prosječno više precizne i više laboratorijske konstrukcije, dok one sa željezom, naročito željezom zatvorene, predstavljaju izvedbe prikladne i za grublje uvjete upotrebe, na pr. kod pogonskih i sličnih mjerenja. Zato se elektrodinamski instrumenti i susreću mnogo u praksi, naročito kao vatmetri gdje im sa strane instrumenata s pomičnim željezom nema takmaca.

Neka bude još, zbog potpunosti, spomenuto da ima i t. zv. *indukcionih* elektrodinamometara, koji se međutim više upotrebljavaju za mjerenja kapaciteta ili otpora, te kao mjerila frekvencije izmjeničnih struja; pobliže vidi na pr. u *Palm*, Elektr. Messgeräte, Springer, Berlin 1937, str. 68 do 71.

27. Vrlo su dugo poznati *termički instrumenti* ili *instrumenti s vrućom žicom* (Hitzdrahtinstrumente, hot wire instruments). Princip im je, po shemi u sl. 18., da se na kazalo prenosi s velikim povećanjem produljenje proizvedeno ugrijavanjem žice kroz koju teče mjerena električna struja. Žica, redovno od platin-iridija, učvršćena na oba kraja, produljuje se zbog ugrijavanja od prolaza struje više ili manje i njezin srednji dio popušta jače ili slabije sili kojom ga vuče, okomito na duljinu vruće žice, jedna druga, t. zv. mosna žica koja opet sa svoje strane biva posredstvom jedne (na pr. svilene) niti vučena, okomito na svoju duljinu, od elastičnoga lisnatoga pera. Kako je nit prebačena oko sitnoga kolotura, vrtivoga na osovini koja služi i kao osovina za kazalo, ovo se gibanje u zadnjoj liniji prenosi na kazalo, pa se mjerena struja može prosuditi po odklonu kazala.

Prigušenje gibanja kazala postizava se kod ovih instrumenata slično kao kočenje kod električkih brojila indukcionim vrtložnim strujama, koje se rađaju kod gibanja aluminijske pločice u magnetskom polju u uskom prostoru između krajeva jakoga permanentnoga magneta (»magnetsko prigušenje«). Kako se iz sl. 18. vidi, ta je pločica smještena na istoj osovini na kojoj i kazalo, te vrtložne struje koje nastaju koče gibanje dokgod se pomični sistem instrumenata zakreće, i to proporcionalno brzini zakretanja.

Instrumenti s vrućom žicom moraju imati »kompenzaciju« zbog promjena temperature prostorije ili samog instrumenta u pogonu. Kod nešto jačih struja morala bi vruća žica biti relativno debela, da je struja ne bi odviše ugrijala (i eventualno i rastalila), pa bi funkcioniranje instrumenta bilo odviše tromo. U tomu slu-

čaju porazdjeli se struja na niz paralelno ukopčanih, cilindrično porazmještenih tankih metalnih žica ili vrpca, a na kazalo se prenosi samo produljenje jedne od njih.

28. Po samoj naravi stvari dobro izvedeni instrumenti s vrućom žicom moraju jednako dobro mjeriti istosmjerne i izmjenične struje, pokazujući kod ovih poslijednjih *efektivne* vrijednosti. Njihovi podaci moraju biti praktički neovisni o frekvenciji struja. Utjecaji frekvencije postaju zamjetljivi tek kod viših radiofrekvencija zbog sekundarnih učinaka, koji se redovno mogu zanemariti kod umjereno visokih frekvencija. Instrumenti s vrućom žicom su dakle izrazito instrumenti za područja viših frekvencija. I doista oni se susreću u praksi baš najviše kod mjerenja struja i napona takovih frekvencija (u tonfrekventnom i u radiofrekventnom području; na pr. kao antenski ampermetri i sl.), pri čemu se baždarenje može izvršiti



Sl. 18.



Sl. 19.

istosmjernom strujom. Za mjerenja tehničkih niskih frekvencija, u području »jake struje«, oni se manje upotrebljavaju, jer su tamo mnogo prikladniji instrumenti s pomičnim željezom, elektrodinamski i drugi, koji prosječno trebaju i manje električke snage za puni otklon. A i u području viših i najviših frekvencija u novije vrijeme s uspjehom konkuriraju instrumentima s vrućom žicom instrumenti s »termopretvaračem«, odnosno »termoparom«, s malenim vlastitim potroškom i po potrebi većom osjetljivošću, tako da se instrumenti s vrućom žicom danas uopće manje upotrebljavaju, nego prije.

29. Samo na izmjenične struje reagiraju *indukcioni instrumenti*. Oni rade po principu zakretnoga (rotatornoga) magnetskoga polja, koje djelujući induktivno na njihov pomični sistem, jedan metalni (redovno aluminijski) vrtivi bubanj, izvode vrtložne struje, i moment vrtnje analogan momentu vrtnje što ga

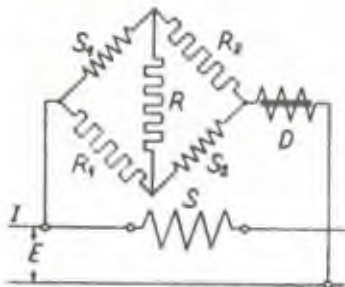
takovo zakretno magnetsko polje izvodi na, recimo, krletkasti rotor indukcionoga asinhronog motora. Prema tomu su po samoj naravi svoga djelovanja indukcionni instrumenti doista ograničeni samo na izmjenične struje kao i indukcionni motori. Za razliku od pojava kod motora, ovdje, kod indukcionih mjernih instrumenata sa zakretnim poljem, ne dolazi do trajne vrtnje nego samo do određenoga zaokreta pomičnoga sistema pod utjecajem zakretnoga magnetskog toka, jer nasuprot momentu vrtnje, proizvedenom od zakretnoga toka, djeluje protumoment vrtnje elastičnih spiralnih pera, koji raste proporcionalno odklonu sistema. Zakretni magnetski tok izvodi se »dvofazno« na taj način da se »umjetno« (naročitim spojevima) proizvedu u dva para svitaka, unakrsno smještena kao na sl. 19., izmjenične struje pomaknute u fazi, i to tako da veličina pomaka faza bude po mogućnosti što bliže četvrtini periode, odn. 90° . Poblíže razmatranje pokazuje da je moment vrtnje koji se ima očekivati proporcionalan struji I_1 kroz prvi par svitaka, struji I_2 kroz drugi par svitaka i sinusu kuta pomaka faza α , t. j. da je proporcionalan produktu $I_1 I_2 \sin \alpha$, koji je doista najveći (najpovoljniji) ako je $\alpha = 90^\circ$. Ako instrument služi kao ampermetar ili kao voltmetar, skala je u bitnosti kvadratičnoga karaktera i samo naročitim mjerama može se učiniti jednoličnijom. A ako je izveden kao vatmetar, onda je skala uglavnom jednolika.

30. U ovomu posljednjem slučaju, kad treba da se mjeri $N = EI \cos \varphi$, pomak faza, umjetno proizveden u drugom paru svitaka indukcionoga instrumenta, treba pogotovo da je upravo 90° . Evo zašto. Prvi par svitaka kod indukcionoga vatmetra upotrebljava se kao »svitak struje« i priključuje direktno u strujni tok, pa biva protjecan strujom I . Drugi par svitaka, igrajući ulogu »svitka napona« vatmetra, ima priključak na napon E . Zato je struja I' u tom drugom paru prema struji I u prvomu paru zapravo pomaknuta za kut $\alpha - \varphi$, jer je to struja s »umjetno« proizvedenim pomakom faza prema naponu, koji je podržava, za kut α u instrumentu samom, no sa pomakom faza za φ manjim prema struji I , ako I već sam po sebi zaostaje u fazi prema E za kut φ . Prema onomu što je općenito rečeno o momentu vrtnje kod indukcionih instrumenata, odkloni instrumenta bit će dakle proporcionalni sa I , sa E i sa sinusom pomaka faza $\alpha - \varphi$ između I i E , dakle s produktom $E I \sin(\alpha - \varphi)$. To znači: s veličinom $N = EI \cos \varphi$, koja se želi mjeriti, oni će biti proporcionalni *samo* uz uvjet da je α baš točno 90° , jer je: $E I \sin(90^\circ - \varphi) = EI \cos \varphi$.

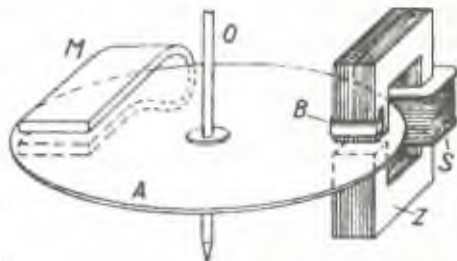
Umjetni spoj kojim se postizava pomak faza 90° u drugom paru svitaka može kod vatmetara biti na pr. kao onaj u sl. 20. Napon E ne pušta se da djeluje direktno na svitke S' i S'' drugoga para svitaka, nego na »mosnu« kombinaciju tih svitaka i

još triju čistih radnih otpora veličine R_1 , R_2 i R oma, s kojom je u seriju ukopčan još jedan veliki induktivitet D (induktancija, Drosselspule, choke coil) sa željeznom jezgrom. Ovakov spoj se daje za određenu frekvenciju izmjenične struje tako adjustirati da α između struja u svicima bude točno jednako 90° .

31. Nažalost iz gornjega slijedi da podaci indukcionih instrumenata, a naročito indukcionih vatmetara, moraju biti vrlo jako ovisni o frekvenciji, dok to ni izdaleka nije toliko slučaj kod elektrodinamskih instrumenata ili onih s pomičnim željezom. Osim toga se indukcionni instrumenti za razliku od instrumenata drugih sistema ne daju preuđesavati kao voltmetri i kao vatmetri na različite napone pukim dodavanjem serijskih (dodanih) neinduktivnih otpora (kao X u sl. 14. i 15.) nego bi, u koliko se ne bi upotrebili »mjerni« naponski transformatori sa stalnim naponom sekundarno, kod prelaza na druge napone trebalo uvijek nanovo adjustirati i umjetni pomak faza.



Sl. 20.



Sl. 21.

Zbog spomenutih razloga, kao i zbog komplikacija od temperaturnih utjecaja na njihove podatke, indukcionni instrumenti sa zakretnim magnetskim poljem danas se više mnogo ne upotrebljavaju usprkos nekih njihovih inače dobrih svojstava (na pr. prosječno jak moment vrtnje; mogućnost vrlo širokih skala, do 360°), pogotovo otkad su usavršeni instrumenti s pomičnim željezom, koji ih mogu nadomjestiti kao ampermetri i voltmetri kod izmjeničnih struja, te kraj elektrodinamskih instrumenata koji daju i odlične vatmetre. Ima firmi koje su u novije doba ove instrumente, kao i one s vrućom žicom, prestale fabricirati.

Prigušenje titraja kod indukcionih instrumenata redovno je magnetsko s vrtložnim strujama koje izvide permanentni magneti, smješteni poput onoga na sl. 19. u aluminijskom bubnju, dok se ovaj giblje.

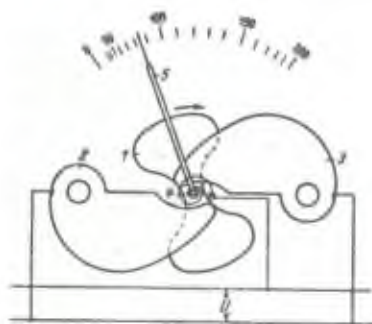
32. Osim gore spomenutih indukcionih instrumenata sa zakretnim magnetskim poljem i vrtivim bubnjem ima i instrumenata koji također rade s induciranim vrtložnim strujama u masivnim vodičima, ali na ponešto drugom principu.

Kod izmjeničnih *ampermetara* i *voltmetara* po ovom principu moment vrtnje dobiva se time da se izazivlju vrtložne struje na jednoj okrugloj vrtivoj ploči A, na pr. od aluminija, koja zahvaća pri rubu u uzdušnu pukotinu (raspor) jednoga elektromagneta izmjenične struje s jezgrom Z od željeznih limova, pri čemu je za stvaranje momenta vrtnje potrebno da je jedan dio polnoga nastavka elektromagneta slobodan a drugi se obuhvati kratko spojenim bakrenim prstenom B, kako je to naznačeno na sl. 21. Prigušenje gibanja i ovdje je magnetsko, uz pomoć permanentnoga magneta M, koji već prema brzini gibanja pomičnoga sistema inducira veće ili manje vrtložne struje u onoj istoj kružnoj pločici u kojoj se induciraju i one vrtložne struje, proizvedene od izmjeničnom strujom uzbuđenog elektromagneta, koje su potrebne za proizvođenje momenta vrtnje. Tako ista vrtiva pločica služi i kod stvaranja momenta vrtnje, proporcionalnoga s kvadratom struje odnosno napona, kao i kod kočenja za vrijeme gibanja. Kako se protumoment vrtnje kod instrumenata za mjerenje po ovom principu izvodi elastičnim djelovanjem metalnoga spiralnog pera, to je skala ovih instrumenata u bitnosti kvadratična. Na sl. 21. vidi se i svitak S kroz koji se pušta da teče mjerena izmjenična struja.

33. Kod *vatmetara* po ovom principu mjerni sistem mora imati dva različita elektromagneta od kojih je jedan »strujni«, sa svitkom ukopčanim u glavni tok na način »svitaka struje« kakovi dolaze kod svih vatmetara, a drugi »naponski« kome se namotaj priključuje na napon na način »svitaka napona« kod vatmetara. Jedan od oba elektromagneta, na pr. strujni, stoji s jednim polom nasuprot kružnoj vrtivoj ploči, a onaj drugi, u sponiranom primjeru naponski, s dva pola. Ako je sad struja u naponskom elektromagnetu prikladnim umjetnim spojem pomaknuta u fazi prema pripadnom naponu za 90° (za četvrtinu trajanja periode), onda je proizvedeni moment vrtnje proporcionalan s produktom $EI \cos \varphi$, ako je φ pomak faza između struje I kroz strujni elektromagnet i napona E na koji je priključen naponski elektromagnet. Instrument dakle u ovom spoju može mjeriti učin $N = EI \cos \varphi$, ako ima spiralno pero koje proizvodi protumoment vrtnje, i skala mu je kao *vatmetru* u bitnosti jednolika. No ako naprava nema spiralnoga pera za ograničenje vrtnje, vrtiva kružna ploča će se neprekidno (kao rotor motora) okretati, tjerana momentom vrtnje zbog učinaka obih elektromagneta, a kočena u svome gibanju djelovanjem permanentnoga magneta, i brzina gibanja će biti u svakomu času proporcionalna učinu $N = EI \cos \varphi$. Ako se dakle vrtnja pločice prenese na mehanizam s kotačićima koji broji (i pokazuje) ukupni broj okretaja kružne pločice, imat ćemo napravu koja mjeri ukupnu *radnju* električke struje u danom vremenu,

dakle napravu koja sumira ili integrira, t. j. *brojilo*, i to brojilo vatsekunda, odnosno (kilo)vatsati, dakle *kilovatsatno brojilo* po *indukcionom motornom* principu. I doista, kako ćemo kasnije još vidjeti, najobičnija i danas najviše razrađena brojila izmjenične struje jesu baš indukciona brojila, koja u bitnosti rade na spomenuti način, zbog čega smo se namjerno i dulje zadržali na ovom principu indukcionih naprava s vrtivom kružnom pločom nego li bi to zasluživali sami mjerni instrumenti: ampermetri, voltmetri i vatmetri ovakove konstrukcije, jer ovi se još manje u praksi upotrebljavaju nego li i sami danas već u velikoj mjeri iz prakse istisnuti indukциони instrumenti sa zakretnim poljem i vrtivim bubnjem.

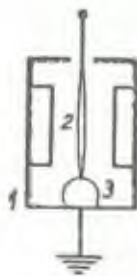
34. Specijalne sprave, no ipak u naročitim prilikama vrlo prikladne i za tehničku praksu, jesu *elektrostatski instrumenti*. Konstrukcije im mogu biti vrlo različite, ali u principu se osnivaju na elektrostatskom privlačenju ili odbijanju, slično kao kod »elektrometara« (elektrostatskih aparata više laboratorijske izvedbe, koji se od starinskih »elektroskopa« razlikuju u bitnosti većinom tim da su za mjerne svrhe prikladnije izvedeni i snabdjeveni skalom za očitavanja odklona)



Sl. 22.



Sl. 23.



Sl. 24.

Konstrukcije tehničkih elektrostatskih instrumenata vanredno su raznolike i ovdje ih ne možemo redom opisivati. Jedan primjer elektrostatskoga mjernog sistema predložen je u sl. 22. (izvedba T.T. & Co.).

Pomični sistem je jedna pločica, t. zv. »igla« 1, koja je tako vrtivo smještena na osovinu 4 sa šiljcima, da kod razlike potencijala (napona) U između te igle i dva međusobno električki spojena para fiksnih paralelnih pločica 2 i 3 igla biva vučena jače ili slabije elektrostatskim silama u međuprostor između spomenutih fiksnih pločica. Gibanju igle protivi se protumoment vrtnje (direkciona sila) jednoga spiralnog pera. Nastane zakret igle.

koji se učini vidljivim s pomoću kazala 5 i skale baždarene u voltima.

Od više elektrometarskih konstrukcija osobito je jednostavan stari Braunov elektrometar (sl. 23.), kod kojega se očitava na skali 3 otklon lagane aluminijske igle 2 vrtivo smještene na metalnom nosiocu 1, veći ili manji već prema većoj ili manjoj razlici potencijala između mjernoga sistema i kućišta 4 elektrometra. Mjereni naponi mogu sezati i do nekoliko hiljada volta.

Mnogo se upotrebljavaju Wulfovi nitni elektrometri (Faden-elektrometer), »dvonitni« i »jednonitni«, od kojih je dvonitni prikazan u principu na sl. 24. Dvije vanredno fine niti 2 (žice promjera samo nekoliko tisućinki mm) lako su napete elastičnim nježnim stremenom 3 od amorfna kremenca. Kod razlike potencijala između sistema niti i kućišta 1 elektrometra niti se razmaknu više ili manje, već prema primijenjenom naponu, a razmak niti očitava se s pomoću mikroskopa sa skalom u okularu (ili se projicira). Dielektrikum provodnoga izolatora: jantar.

35. Svi elektrostatski instrumenti mjere u bitnosti uvijek električke *napone* i, u koliko se uopće upotrebljavaju, u tehničkoj praksi oni redovno služe za takove svrhe (kao voltmetri). Tek posredno mogu se elektrostatski instrumenti upotrebiti i za mjerenja jakosti struje (ako se na pr. njima mjeri napon na krajevima čistoga radnog poznatog otpora, kroz koji se pusti mjerena struja, koja može biti i izmjenična), dok se neke elektrostatske konstrukcije mogu čak, u naročitom spoju, upotrebiti i za mjerenja vata.

U principu tehničke izvedbe elektrostatskih instrumenata redovno mogu mjeriti jednako dobro istosmjerne kao i izmjenične (efektivne) *napone*, do vrlo visokih iznosa volta i do najviših frekvencija. Pri tomu imaju svojstvo, naročito važno u stano-vitim prilikama, da kod istosmjernih struja ne troše praktički baš ništa struje. Ali i struje, što ih elektrostatski instrumenti uzimlju kraj svojih neznatnih vlastitih kapaciteta kod mjerenja izmjeničnih napona obično se mogu zanemariti, a k tomu su, ako je mjerni sistem sam direktno priključen, to prazne kapacitivne (bez potroška učina) struje. Međutim za mjerenja kod niskih frekvencija elektrostatski instrumenti imaju i vrlo visoki »zaštitni« otpor, predviđen za slučaj kratkoga spoja u sistemu (na pr. od proboja iskrom), a taj smanjuje i potrošak izmjenične struje u pogonu. Kod visokih frekvencija, na pr. u radiotehnici, svakako struja i kroz kapacitet instrumenta od samo malo piko-farada može dosegnuti već i nešto malo veće iznose, pa se instrumenti u takovom slučaju priključuju bez serijskih zaštitnih otpora, jer bi u ovima uz spomenute prilike nastali preveliki gubici.

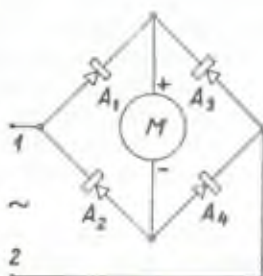
36. Općenito se može reći o elektrostatskim instrumentima da su oni po svome slabom momentu vrtnje i drugim konstruk-

tivnim osobitostima manje prikladni za općenitu upotrebu, ali su vrlo prikladni za mjerenja u specijalnim prilikama gdje se zahtijevaju instrumenti koji praktički ništa ne troše, kad mjere istosmjerne ili niskofrekventne izmjenične napone, odnosno instrumenti prikladni za direktna mjerenja vrlo visokih napona.

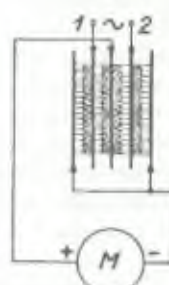
37. Relativno nije još davno da su uvedeni u mjernu tehniku *instrumenti sa suhim ispravljačima*. Kraj odličnih svojstava instrumenata s pomičnim svitkom i permanentnim magnetom, koji sami po sebi nisu direktno upotrebljivi za mjerenja izmjeničnih struja, bio je velik napredak kad je dodavanjem istom u novije vrijeme usavršenih metalnih suhih »ispravljača« uspješno osposobiti i ove instrumente, i to s vrlo povoljnom, uglavnom jednolikom skalom, za mjerenja izmjeničnih struja, pa i tonfrekventnih i čak onih s još višim frekvencijama. Metalni suhi ispravljači (naročito se mnogo upotrebljava kombinacija »bakar Cu — bakarni oksidul Cu_2O — olovo Pb«) propuštaju naime električku struju praktički samo u jednom smjeru.



Sl. 25.



Sl. 26.

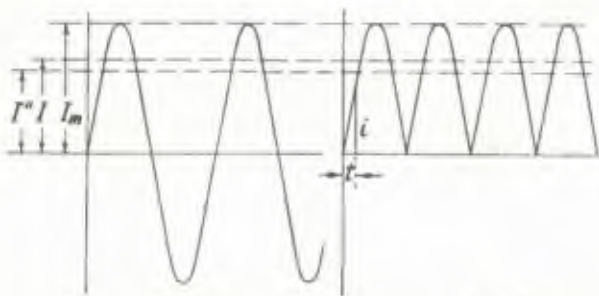


Sl. 27.

Prema tomu bi u kombinaciji: »metalni suhi ispravljač A + instrument M s pomičnim svitkom« po sl. 25. i kod priključka na izmjenični izvor struje tekla struja samo u onom smjeru, u kome bi je propuštao ispravljač, i instrument bi reagirao na one polovice vala izmjenične struje koje teku u smjeru propuštanja ispravljača (tako zvano »poluvalno« ispravljanje). Međutim redovno se ispravljački instrumenti grade tako da kroz instrument s pomičnim svitkom mogu teći *obje* polovice vala izmjenične struje (»punovalno ispravljanje«) i instrument daje dva puta toliki otklon prema onomu u sl. 25. U tu svrhu prikladnim naročitim mosnim spojem, sa četiri ispravljača A_1 , A_2 , A_3 , A_4 i instrumentom istosmjerne struje M (t. zv. »Graetzov spoj« u sl. 26.) postizava se, da kroz instrument M teče struja uvijek istim smjerom, bio smjer izmjenične struje ovakav ili onakav, kako se to odmah vidi slijedeći jednom mogući tok struje kod mjera, uz koji bi 1 bio ulaz a 2 izlaz struje, a drugi puta mogući tok struje s ulazom kod 2,

a izlazom kod 1. Praktička izvedba spoja iz sl. 26. prikazana je u sl. 27.

38. Ali i ovako u spoju za punovalno ispravljanje podaci ispravljačkih instrumenata nisu zapravo direktno oni, što su redovno od interesa u praksi. Ovi naime instrumenti po naravi same stvari ne daju otklone određene *efektivnim* vrijednostima mjerene izmjenične veličine nego su dobiveni otkloni zapravo određeni *aritmetičkom srednjom vrijednošću* mjerene veličine. Ako je, naime, krivuljom na sl. 28. predočeno vremensko mijenjanje *momentanih* vrijednosti mjerene izmjenične veličine, na pr. struje, pa ako, idealizirajući, uzmemo da je punovalno ispravljanje tako savršeno da je krivulja pulzirajuće istosmjerne struje kroz instrumenat M predstavljena, kao što je to nacrtano u sl. 29., nizom neizobličenih pozitivnih polovica titraja mjerene izmjenične veličine, onda instrumenat M, osjetljiv samo za istosmjernu struju, očito mjeri *aritmetičku srednju* vrijednost I'' (t. j. aritmetičku sredinu apsolutnih iznosa momentanih vrijednosti) umjesto *efektivne* vrijednosti I (t. j. drugoga korijenja iz aritmetičke sredine kvadrata momentanih vrijednosti).



Sl. 28.

Sl. 29.

No kako se redovno u praksi izmjenične struje primjenjuju kod onih pojava, gdje odlučuju *efektivni* iznosi, a samo iznimno dolaze prilike gdje je od interesa znati koju od druge dvije karakteristične vrijednosti kod izmjeničnih veličina, naime I'' (aritmetičku srednju vrijednost) ili I_m (maksimalnu ili tjemenu vrijednost), to podaci instrumenata, koji zapravo mjere I'' mogu redovno biti od interesa samo onda ako se znade i odnosaj $\xi = I : I''$, t. zv. »faktor oblika«, baš kao što bi, u slučaju da se zna samo efektivna vrijednost, a od interesa da je poznavati tjemenu, trebalo poznavati odnosaj $\sigma = I_m / I$, t. zv. »tjemeni faktor«.

U praktički najvažnijim slučajevima, kod izmjeničnih veli-

čina koje se vremenski mijenjaju po zakonu *sinusa* (s krivuljom sinusiodom kao na sl. 28.), vrijede relacije:

$$I'' : I : I_m = 1 : 1,11 : 1,57$$

pa je specijalno: $\xi = 1,11 (= \pi/2\sqrt{2})$. Sad polazeći od pretpostavke *sinusoidnih* struja, i da se ne moraju uvijek očitavanja ispravljačkih instrumenata preračunavati sa vrijednosti I'' na vrijednost I uz pomoć faktora $\xi = 1,11$, napišu se na skalu ispravljačkog instrumenta odmah 1,11 puta veće vrijednosti. U *tomu smislu* graduirane su dakle skale ispravljačkih instrumenata u efektivnim vrijednostima. No ne treba kod toga zaboraviti da prema izloženomu graduacija vrijedi *samo* za sinusoidne veličine, jer vrijednost 1,11 faktora ξ vrijedi za njih, dok u slučaju većih ili manjih odstupanja od sinusoide ovi instrumenti moraju pokazivati veće ili manje sistematske pogriješke, jer izmjenične veličine različitih oblika krivulje mogu uz istu aritmetičku srednju vrijednost imati različito velike efektivne vrijednosti. Pogriješke zbog oblika krivulje mogu kod nekih mjerenja iz područja tonskih frekvencija, na pr. u telefoniji, elektroakustici i sl., dosegnuti i oveće procentne iznose, pa je u ovakovim iznimnim slučajevima na mjestu oprez kod upotrebe ispravljačkih instrumenata.



Sl. 30.

39. Instrumenti sa suhim ispravljačem pokazuju međutim uz pogriješke zbog oblika krivulje još i osjetljivosti na druge utjecaje. Tako temperaturni utjecaji na ispravljač mogu biti znatni. Zatim postoje još i »pogriješke frekvencije« u tomu smislu da je zbog više razloga ispravljačko djelovanje u instrumentu različito savršeno kod različitih frekvencija, i to slabije kod viših. Ipak se dade udesiti da se ovi učinci u jačoj mjeri opažaju istom u radiofrekventnom području, a ima danas već specijalnih izvedbi ispravljača s malenim elektrostatskim kapacitetom i za radiofrekventne struje ne odviše visokih frekvencija.

No i uz istu frekvenciju ispravljačko djelovanje ovisi o jakosti struje u tomu smislu, da kod posvema slabašnih struja ispravljač stavlja znatno veći otpor prolazu struje. Tako ni skala ovih instrumenata nije posvema linearna, nego je posve u početku nešto stisnuta, iako bi u principu bila posvema jednolika kod savršenoga ispravljanja. Na sl. 30. vide se skale jednoga

te istoga instrumenta s pomičnim svitkom i permanentnim magnetom. Dolje je praktički posve jednolika skala za direktna mjerenja istosmjernih struja mjernim sistemom s pomičnim svitkom bez ispravljača, a gore je skala za mjerenja izmjeničnih struja u kombinaciji s ispravljačem po shemi u sl. 28. Ova je poslijednja, kako se vidi, u višim dijelovima uglavnom jednolika, no pri početku je stisnuta i skoro kvadratičkoga karaktera, pa ni nema detaljne podjele na tom početnom dijelu.

40. Usprkos svega toga ispravljački instrumenti proširili su se jako u ovo nekoliko godina od njihova uvođenja za mjerenja izmjeničnih struja i napona od malo Hz pa sve do mnogo hiljada Hz zahvaljujući prednostima, kojima se odlikuju: velikoj osjetljivosti i neznatnom vlastitom potrošku učina, te ipak u najvećem dijelu jednolikoj skali.

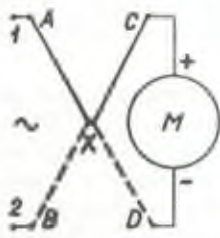
I kao nulinstrumenti suhi ispravljači u vezi s osjetljivim galvanometrima s pomičnim svitkom upotrebljivi su kod mjerenja s izmjeničnim strujama, na pr. kod izmjeničnih mostova, no tu im ipak smeta ograničenje, da im osjetljivost naglo pada u području vanredno slabih struja.

41. Također sa sistemima s pomičnim svitkom i permanentnim magnetom, ali na posve drugom principu, rade *instrumenti s termopretvaračima*. Za visokofrekventna mjerenja ovo su danas najviše upotrebljavani instrumenti (voltmetri i ampermetri), jer su osjetljiviji i s manje vlastitoga potroška, nego instrumenti s vrućom žicom. Za izmjenične struje nižih frekvencija oni su također dobro upotrebljivi, no tu im konkuriraju robustniji instrumenti s pomičnim željezom i elektrodinamski, a mogu se upotrebljavati i ispravljački instrumenti.

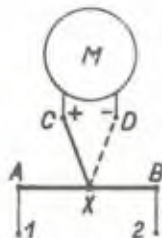
Princip je instrumenata s termopretvaračima da se izmjenične struje upotrebe, da indirektno izvedu otklon instrumenta s pomičnim svitkom, ali se ovdje svrha ne postizava ispravljanjem izmjenične struje, kao kod instrumenata sa suhim ispravljačima, nego se kod termopretvaračkih sprava uz pomoć topline, proizvedene od mjerene izmjenične struje, ugrije spojno mjesto jednoga *termoelementa*, kojega termo-elektromotorna sila izazove onda istosmjernu struju i otklon u priključenom osjetljivom sistemu s pomičnim svitkom i permanentnim magnetom. Praktički se ova ideja može realizirati jednostavnim-t. zv. *termokrižem* (termokrstom) po shemi u sl. 31. Termokriž je kombinacija dvaju različitih unakrsno zakvačenih žica AXC i BXD, kojih materije zajedno daju dobar »termopar« (termoelement). Na A i B priključi se izmjenična struja, a na C i D vrlo osjetljiv instrument s pomičnim svitkom M. Ako se (pajano ili svaeno) spojno mjesto X termokriža ugrije izmjeničnom strujom, koje je tok AXB, ono postane sijelo elektromotorne sile, pa u strujnom krugu XCMDX teče istosmjerna struja, koja se manifestira ma-

njim ili većim odklonom istosmjernoga instrumenta M, već prema jakosti mjerene izmjenične struje. Umjesto jednostavnoga termokriža iz sl. 31. pokazalo se zgodnijim, osobito za jače struje, upotrebljavati termopretvaračke kombinacije po sl. 32. od žice AB, kojom teče izmjenična struja s termoparom od dvije različite kovine ili kovne slitine CX i DX koji je svojim spojištem pripajan na strujom grijanu žicu AB. Kod nekih pak konstrukcija termopar je samo tijesno prislonjen uz grijanu žicu AB, no električki izolirano od nje (tankim slojem izolatora između spojišta X termopara i žice AB).

42. Skala je kod instrumenata s termopretvaračima kvadratična, a kod dobrih izvedbi mogu se ovi instrumenti upotrebljavati sve do najviših radiofrekvencija, na pr. u specijalnim izvedbama do 10^7 ili čak do 10^8 Hz ili slično, dakle i kod kratkih i ultrakratkih valova radija.



Sl. 31.



Sl. 32.



Sl. 33.

Na osjetljivost termopretvaračke kombinacije znatno utječe, da li je *odvod* topline s termopretvarača veći ili manji, pa je za najveće osjetljivosti kod slabih struja dobro (i može donijeti nekoliko puta veće osjetljivosti), ako je termopretvarač smješten u *evakuiranom* staklenom balonu, jer u vakuumu izmjenične struje jače ugriju spojno mjesto X nego ako uzduh može konvekcijom odvoditi toplinu.

Kao kombinacije materija za termopar upotrebljavaju se na pr. parovi: željezo i konstantan, nikal j i kromnikal j, i različiti drugi. Instrument M u sl. 31. i 32. mora dati puni odklon već kod nekoliko (na pr. 10) milivolta.

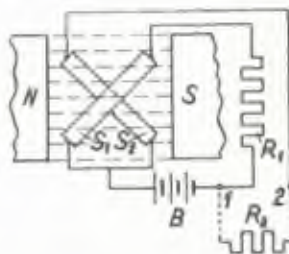
43. Jedna neprilika kod instrumenata s termopretvaračem jest da relativno slabo podnose preopterećenja, pa i kratkotrajnija, jer se kod prejakih struja termopretvarač usja i lako pregrije. Ako je pretvarač ugrađen unutar instrumenta, kao na sl. 33., treba onda instrument otvarati zbog popravka, premda redovno ne strada mjerni sistem s pomičnim svitkom, nego samo termopretvarač. Obzirom na to pokazalo se praktičnim, i često

se tako i postupa, da se termopretvarač izvede kao posebna jedinica koja se izvana priključuje na galvanometar (zapravo milivoltmetar) s pomičnim svitkom. Onda je lako, u slučaju da pretvarač pregori, zamijeniti ga isto takovim ne dirajući u galvanometar, a mogu se na isti instrument s pomičnim svitkom priključivati i termopretvarači za različita područja jakosti izmjeničnih struja i napona, u kojem slučaju vrijede, dakako, različite krivulje baždarenja za kombinacije pojedinih pretvarača s milivoltmetrom s pomičnim svitkom.

44. Za specijalne svrhe služe *instrumenti s unakrsnim svicima i permanentnim magnetom*. Kod mjernih sistema ovih instrumenata iskorišćuje se djelovanje vremenski konstantnoga magnetskog polja na dva svitka, *slobodno* vrtiva na istoj osovinu, ali čvrsto jedan prema drugomu *unakrsno* postavljena (pod kutom 90° ili manjim). Struje u svicima teku tako da sile vrtnje na jedan i na drugi svitak djeluju u protivnom smislu. Momenti vrtnje kod svakoga svitka neka su proporcionalni osim sa strujom još i sa *sinusom* kuta otklona svitka od nekoga položaja ravnotežja. Teorijski najjednostavnije je ovomu uvjetu sinusa



Sl. 34.



Sl. 35.

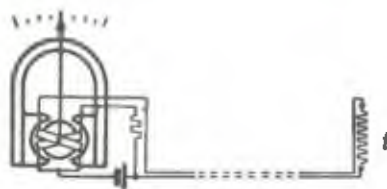
zadovoljiti, ako se pomisli, po sl. 34., svitak postavljen u homogeno (jednoliko po smjeru i veličini) magnetsko polje, predloženo na sl. 34. svagdje paralelnim i jednako razmaknutim pravcima kao magnetskim linijama. U tomu naime slučaju, kako se lako razabire primjenom osnovnih stavaka o djelovanju magnetskoga polja na vodiče protjecane strujom, moment vrtnje D svitka, kojega je os zakrenuta prema smjeru magnetskih linija za kut α , jest veličina proporcionalna sa strujom I kroz svitak i sa sinusom kuta α , t. j. $D = K.I.\sin\alpha$, gdje je K neki konstantni faktor (faktor proporcionalnosti), ovisan o plohi i o broju zavoja svitka. Ako dakle približno proizvedeno homogeno polje između dva pola N i S permanentnoga magneta i u tomu polju zamislimo po shemi u sl. 35. unakrsne svitke međusobno priklonjene pod kutom 90° i protjecane strujama I_1 i I_2 , onda, ako je α kut otklona prvog svitka prema magnetskom polju, kut otklona drugoga svitka

prema tom polju iznosi $90^\circ - \alpha$, pa momenti vrtnje obih svitaka, koji djeluju nasuprot jedan drugomu, iznose: $D_1 = K_1 I_1 \sin \alpha$ i $D_2 = K_2 I_2 \sin (90^\circ - \alpha) = K_2 I_2 \cos \alpha$, gdje su K_1 i K_2 neke konstante. Kako su svici inače slobodni, uvjet je ravnotežja: $D_1 = D_2$, a pripadni kut odklona α određen je relacijom $K_1 I_1 \sin \alpha = K_2 I_2 \cos \alpha$, iz koje se može izračunati $\operatorname{tg} \alpha = \sin \alpha / \cos \alpha$ po formuli:

$$\operatorname{tg} \alpha = K_0 \cdot (I_1 / I_2) \quad (\text{I})$$

Tu je $K_0 = K_1 / K_2$ neka nova konstanta. To znači: sistem unakrsnih svitaka zauzet će neki posve određeni stav, koji zadovoljava uvjetu (I), s položajem kazala prema skali instrumenta posvema određenim po (I) samo kvocijentom I_1 / I_2 struja kroz prvi i kroz drugi svitak.

Instrumenti s unakrsnim svicima i permanentnim magnetom mogu dakle mjeriti kvocijente struja kroz oba svitka, a posredno i kvocijente drugih veličina proporcionalnih (direktno ili obrnuto) s tim strujama. Oni su zapravo »mjerila kvocijenata« (Quotientenmesser), kao što su zapravo obični elektrodinamski



Sl. 36.

instrumenti u bitnosti »mjerila produkata« (jer im je moment vrtnje proporcionalan s produktom $I_1 I_2$ struja I_1 i I_2 kroz oba svitka). Zato se u praksi instrumenti s unakrsnim svicima i permanentnim magnetom i upotrebljavaju kod onakvih mjerenja, gdje se žele odrediti kvoci-

jenti, na pr. kod mjerenja otpora kao »ohmmetri« i »megohmmetri« s unakrsnim svicima (jer po Ohmovu zakonu otpor $R = E / I$ određen je kvocijentom napona i struje); zatim za mjerenja temperatura, gdje se u spoju kao na sl. 35. (praktička izvedba kao na sl. 36.) određuje kvocijent nepromjenljivoga otpora R_1 i nekoga otpora R_2 koji se mijenja s mjerenom temperaturom t na mjestu mjerenja gdje se R_2 postavi; onda za prenošenje podataka drugih instrumenata kod t. zv. mjerenja na daljinu, o čemu će još biti govora; itd.

45. Kod praktičke realizacije instrumenata s unakrsnim svicima i permanentnim magnetom homogeno polje između dvije daleko razmaknute ravne paralelne polne plohe kao na sl. 35. daje odviše neznatne momente vrtnje i premalenu sigurnost postavljanja pomičnog sistema u pravi položaj, osobito kod slabijih struja u svicima, pa se zato po sl. 37. upotrebljavaju magneti s konkavnim polnim nastavcima (slično kao kod običnih instrumenata s pomičnim svitkom) i prostor između njih se djelomično premosti, zbog lakšega prolaza magnetskih linija, jez-

grom od mekoga željeza. Međutim ova jezgra (za razliku od one kod običnih instrumenata s pomičnim svitkom, koja je kružnoga presjeka i daje s polnim nastavcima dvije uzdušne pukotine jednolike širine) mora biti *ovalnoga* presjeka, kao na sl. 37., tako da širina obih uzdušnih pukotina raste od sredine svake



Sl. 37.

pukotine prema rubovima, a prema tomu gustoća magnetskih linija opada od sredine prema rubovima, i to redovno približno po zakonu sinusa. Onda naime varira po istom zakonu i veličina momenata vrtnje kojima magnetsko polje djeluje na svitke pomičnoga sistema instrumenta u njihovim različitim položajima, a takovo je variranje, kako je pokazano, pretpostavka za funkcioniranje instrumenata s unakrsnim svicima. I kut priklona obih unakrsnih svitaka se u tomu slučaju uzimlje znatno

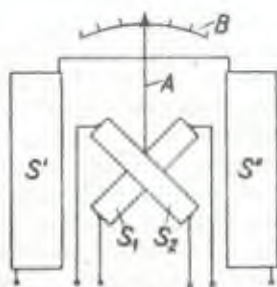
manji od 90° (v. sl. 36. i 37.), tako da i kod većih otklona pomičnoga sistema još oba svitka ostanu u području pripadnih polnih nastavaka.

Kao strujni priključci k svicima instrumenata, kojih unakrsni sistem mora biti po samoj naravi mjernoga principa po mogućnosti slobodno vrtiv, služe redovno slabašne tanke metalne vrpce, koje ne izvode praktički nikakove direkcione sile. Ovakovi dovodi vide se na sl. 37. (i to njih tri, jer kod instrumenata u spoju kao na sl. 35. ili 36. jedan par krajeva obih svitaka može imati zajednički dovod). A ima slučajeva, osobito kod instrumenata (na koje odmah prelazimo) s unakrsnim svicima elektrodinamskoga tipa s velikim otklonskim kutevima, da se strujni priključci k unakrsnim svicima vrše uz pomoć sitnih »kliznih koluta« i nježnih »kefica«, slično onomu što se u velikom radi na pr. kod indukcionih motora.

46. Instrumenti s unakrsnim svicima elektrodinamskoga tipa su također specijalni mjerni sistemi, koji su vrlo prikladni za mjerenja važnih veličina izmjenične struje. Razlika je kod njih prema malo prije opisanim instrumentima što magnetsko polje koje djeluje na sistem unakrsnih svitaka nije stalno (konstantno) polje permanentnoga magneta, nego polje u kome se vrti pomični sistem od dva unakrsna svitka jest vremenski promjenljivo polje, proizvedeno izmjeničnom strujom kroz jedan veliki nepomični svitak (analogan nepomičnom svitku kod običnih elektrodinamskih instrumenata sa samo jednim pomičnim svitkom).

I ovi su instrumenti zapravo *kvocijentna* mjerila. Da im razložimo funkciju, pokazat ćemo njihovu primjenu kod mjerila

faktora učina ($\cos\varphi$ -mjerila), za koju važnu svrhu su ovi mjerni sistemi vrlo prikladni. Ako treba izmjeriti pomak faza φ (ili kosinus toga pomaka: faktor učina $k = \cos\varphi$) između struje I i napona E , onda, prema sl. 38., pustimo struju I da teče nepomičnim svitkom S sastavljenim od obje polovice S' i S'' , a kroz unakrsne svitke S_1 i S_2 pomičnoga sistema pustimo struje I_1 i I_2 određene naponom E (u koju svrhu treba S ukopčati u glavni tok struje I , a S_1 i S_2 , uz dodatak potrebnih serijskih otpora, odnosno induktancija, priključiti na napon E .) Da sad instrument učinimo sposobnim da pokazuje φ (ili $\cos\varphi$), mi ćemo struju I_1 ostaviti u fazi s naponom E , dok ćemo između I_2 i E proizvesti



Sl. 38.

pomak faza od 90° . U tu svrhu praktički je dovoljno priključiti na E , po shemi u sl. 39., svitak S_1 u seriji s vrlo velikim radnim (neinduktivnim i nekapacitivnim) otporom R , a S_2 naprotiv u seriji s induktancijom X kojoj je induktivitet vrlo velik, a radni otpor zanemariv. Prema razmatranjima koja smo izveli o mjerenju izmjeničnih učina uz pomoć elektrodinamskih vatmetara očito je, da će (srednji) momenti vrtnje svitaka S_1 i S_2

biti proporcionalni produktu struja kroz nepomični i kroz promatrani pomični svitak s kosinusom kuta pomaka faza između tih struja. No uz to će, kao i kod sličnog sistema s unakrsnim svitcima na sl. 35., postojati i proporcionalnost momenta vrtnje sa sinusom kuta otklona promatranoga pomičnoga svitka, koji neka za svitak S_1 bude označen sa α . Prema tomu će za moment vrtnje D_1 , koji djeluje na svitak S_1 , obzirom na činjenicu da je fazni kut između I i I_1 isti kao i traženi kut φ između I i E , vrijediti izraz:

$$D_1 = K_1 \cdot I \cdot I_1 \cdot \cos\varphi \cdot \sin\alpha,$$

a za suprotni moment vrtnje D_2 na drugi pomični svitak S_2 , uzevši u obzir, da je struja I_2 pomaknuta prema E za 90° i prema tomu pomaknuta prema I za fazni kut $90^\circ - \varphi$, te da je nadalje, uz okomiti međusobni položaj unakrsnih svitaka, kut otklona svitka S_2 prema magnetskom polju $90^\circ - \alpha$, ako je α kut otklona svitka S_1 , izlazi izraz:

$$D_2 = K_2 \cdot I \cdot I_2 \cdot \cos(90^\circ - \varphi) \cdot \sin(90^\circ - \alpha) = K_2 \cdot I \cdot I_2 \cdot \sin\varphi \cdot \cos\alpha$$

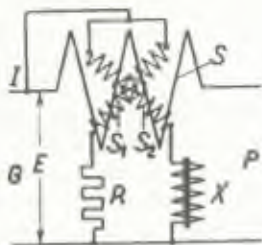
gdje su K_1 i K_2 konstante. Pomični sistem postaviti će se u položaj, koji odgovara uvjetu $D_1 = D_2$, ili drugim riječima (ako se skрати sa I) relaciji:

$$K_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi \cdot \sin\alpha = K_2 \cdot I_2 \cdot \sin\varphi \cdot \cos\alpha$$

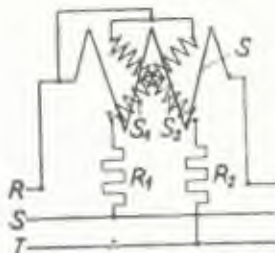
Ova se relacija može preudeliti u:

$$\operatorname{tg} \varphi = K \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (\text{II})$$

gdje je $K = (K_1 \cdot I_1) / (K_2 \cdot I_2)$ neka nova konstanta, budući da je omjer I_1/I_2 struja I_1 i I_2 , proizvedenih istim naponom E , također konstantna veličina za neki dani instrument s određenim R i određenim X .



Sl. 39.



Sl. 40.

No relacija (II) ne izriče u bitnosti ništa drugo nego da je otklon pomičnog sistema instrumenta uvijek određen samo kutom pomaka faza φ , te da prema tomu instrument po shemi u sl. 39. pokazuje *pomake faza* između struje i napona u jedno-faznim krugovima izmjenične struje, sa skalom koja se može nacrtati bilo u samim iznosima kuta pomaka faza φ , bilo u vrijednostima $\cos \varphi$ koje obično u praksi više interesiraju (katkad se nanese obje skale).

47. Izvedba, skicirana na sl. 38., jest konstrukcija *bez željeza*, pa se njom — slično kao kod izvedbi *bez željeza* običnih elektrodinamskih sistema s jednim pomičnim svitkom — ne mogu postići nešto veći momenti vrtnje. Mnogo veće momente vrtnje, i prema tomu mnogo veću sigurnost postavljanja pomičnog sistema unakrsnih svitaka u pravi položaj, daju *željezom zatvorene* izvedbe, po načinu gradnje analogne željezom zatvorenim izvedbama običnih elektrodinamskih instrumenata. Samo ovdje se, kao i u slučaju sl. 37., magnetski krug (od željeznih limova) mora tako izvesti da rezultira uzdušna pukotina promjenljive širine kojom se postizava variranje (bar približno po zakonu sinusa) momenta vrtnje na svaki od oba unakrsna svitka u ovisnosti od kuta otklona, kakovo je potrebno za funkcioniranje instrumenta.

Uostalom, ako to variranje i nije posve sinusoidalno, te ako svici i nisu posvema okomiti jedan na drugi, i konačno ako pomak faza između struja I_1 i I_2 u unakrsnim svicima ne doseže baš 90° , instrument ipak funkcionira, samo što se time nešto mijenja karakter skale.

48. Na temelju ove posljednje primjedbe bit će razumljiv jednostavni spoj (bez ikakovoga umjetnoga stvaranja pomaka faze uz pomoć induktancija) kojim se $\cos\varphi$ -mjerilo ukapča kod upotrebe u *trofaznim* mrežama. Po shemi u sl. 40. dovoljno je tu nepomični svitak ukopčati u seriju u vodič jedne faze, a pomične svitke priključiti na dva različita linijska napona (dakako ne neposredno nego u seriji s jednakim otporima R_1 i R_2 , analognim serijskim otporima kod naponskih grana vatmetara i kod voltmetara). Između obih linijskih napona postoji pomak faza 120° , pa bi isti toliki trebalo uzeti i između struja I_1 i I_2 kroz oba unakrsna svitka S_1 i S_2 kad bi I_1 i I_2 bili ukopčani na složno djelovanje. Međutim u konkretnom slučaju pomak između I_1 i I_2 treba računati sa 60° , jer se struja u jednom od oba unakrsna svitka mora računati suprotno (budući da momenti vrtnje moraju biti protivnoga smisla), a kad kut između dvaju struja iznosi 120° , kut jedne prema obrnutoj drugoj jest 60° . Tih 60° u bitnosti ima onda sličan efekt kao i 90° , pa aparat po shemi u sl. 40. doista pokazuje $\cos\varphi$ u prikladno crtanoj skali.

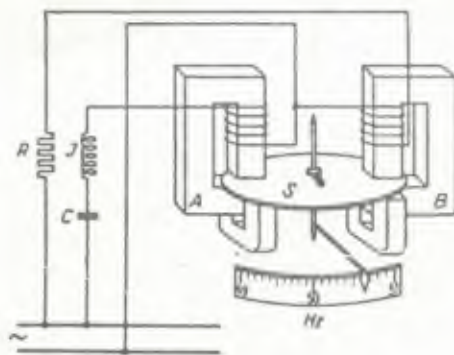
49. Osim opisanih grupa mjerila kvocijenata (s permanentnim magnetom i unakrsnim svicima i elektrodinamskih s unakrsnim svicima) postoje još i »kvocijentna mjerila« po drugim principima, poimence s *pokretnim željezom* u obliku nepotpuna *prstena*, zatim *elektrostatska*, te ona po principu *indukcionih instrumenata* opisanih u B-32. I kod ovih se instrumenata radi o dva mjerna sistema, smještena na istoj osovini i protivnih momenata vrtnje. Cijela mjerna kombinacija, slobodno vrtiva, postavlja se u položaj koji odgovara *kvocijentu* dvaju veličina, na pr. kod prikladnoga spoja kvocijentu dvaju otpora. Tako se onda mogu nepoznati ili promjenljivi otpori isporučivati s poznatima stalnima, a mogu se posredno mjeriti i druge veličine, s kojima je skopčana promjena otpora (za koje svrhe, uostalom, stoje također na raspolaganju osjetljiviji instrumenti s permanentnim magnetom i unakrsnim svicima, danas upotrebljivi ne samo kod istosmjernih struja nego i kod izmjeničnih u kombinaciji sa suhim ispravljačima (po B-37.).

Važna je primjena kvocijentnih mjerila po indukcionom principu (AEG) kod *mjerila frekvencije s kazalom s priključkom* na izmjeničnu struju preko kombinacije kapaciteta, induktiviteta i otpora kao u sl. 41.

Ukratko prikazano¹⁾ instrumenti po shemi u sl. 41. funkcioniraju po principu dvaju suprotnih momenata vrtnje, proizvedenih djelovanjem elektromagneta A i B na ekscentrično vrtivu aluminijsku ploču S. Uzbudni namotaj elektromagneta A priključen je

¹⁾ Poblježe: Elektrotechn. Z. (ETZ), god. 1935, str. 205/206, te AEG-Mittell., god. 1932, str. 373—375 i god. 1937., str. 218/219.

na mrežu izmjenične struje preko kondenzatora C i induktancije (induktivnoga svitka) L , koji se tako odaberu da pripadni strujni krug ispadne »resonantan« za struje frekvencije samo malo iznad područja frekvencija za koje je instrument predviđen. Kako je poznato, kod električke resonancije struja u priključenom krugu prolazi kroz maksimalni iznos. Ali već i kod približavanja frekvencije priključene izmjenične struje »resonantnoj« frekvenciji struja jako raste s frekvencijom, pa prema tomu moraju i u slučaju manjih variranja mjerene frekvencije mreže na koju je instrument priključen nastupiti jake varijacije struje elektromagneta A. Naprotiv struja elektromagneta B ne će uopće praktički varirati s frekvencijom, jer je uzbudni namotaj toga elektromagneta priključen u seriji s dodanim velikim čistim otporom R , dakle otporom istoga iznosa za ma koju frekvenciju. Prema tomu će



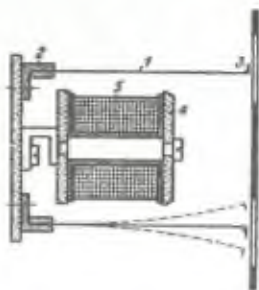
SI. 41.

svakoj frekvenciji izmjenične struje na koju je instrument priključen odgovarati posve određeni kvocijent struja kroz oba elektromagneta, te će ploča S kvocijentnoga mjerila iz sl. 41. zauzeti položaj posve određen tom frekvencijom, koju će kazalo instrumenta pokazati na skali.

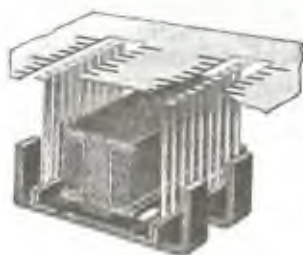
Pouzdanost mjerenja ovih aparata može biti s tolerancijom od samo tridesetine Hz; točnost je mnogo veća nego kod mjerila frekvencije s resonantnim jezičcima (B-50.). K tomu pridolazi, da se instrumenti za mjerenja frekvencije s kazalom dadu udesiti i za trajna registriranja mjerene veličine.

50. Bez kazala su *vibracioni instrumenti s resonantnim perima (jezičcima)*. Ovi se instrumenti mnogo upotrebljavaju za mjerenja niskih frekvencija u području jake struje, no mogu se graditi i za mjerenja ne odviše visokih srednjih (tonskih) frekvencija, na pr. za struje od nekoliko stotina Hz. Princip njihova funkcioniranja jest mehanička resonancija čeličnih pera u obliku jezičaca pod utjecajem periodskih impulsa od izmjeničnoga magnetskoga polja elektromagneta od željeznih limova, uzbuđenoga izmjeničnom strujom. U tu svrhu upotrebljavaju se

elastični jezičci 1, postavljeni u niz jedan do drugoga i smješteni prema elektromagnetu 4 kao što je naznačeno na sl. 42. Jezičci su tako adjustirani da redom mehanički resonantno titraju kod uzbuđenja elektromagneta izmjeničnim strujama različitih frekvencija, recimo kod frekvencija 45—45,5—46—46,5—... itd.

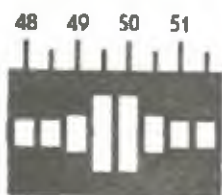


Sl. 42.

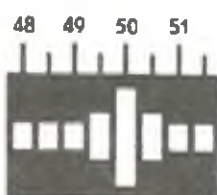


Sl. 43.

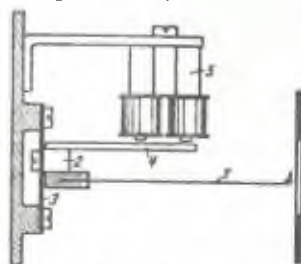
sve do 55 Hz ako se žele ispitivati struje frekvencije oko 50 Hz. Uzmimo sada da izmjenična struja ima baš frekvenciju 50 Hz; onda će titrati »resonantno«, dakle najintenzivnije, samo onaj jezičac koji je udešen na titranje pod utjecajem magnetskog polja 50 Hz, a također donekle i susjedni jezičci koji su ipak već blizu resonanciji, dok će titraji ostalih jezičaca, koji su daleko od resonancije, biti tako neznatni, da se ne će praktički ni zamjećivati. Da se titraji jezičaca mogu bolje motriti, jezičci nose na vrhu male bijele zastavice 3, pa se vide tim dulje bijele pruge, čim pojedini jezičac snažnije vibrira. Ako frekvencija izmjenične struje leži tako, da ne izazivlje punu resonanciju jednoga određenog jezičca, i opet se po raspoređaju amplituda titraja jezičaca u blizini resonancije može prosuditi, s točnošću



Sl. 44.



Sl. 45.



Sl. 46.

od 0,1 Hz, kolika je frekvencija izmjenične struje. Tako je na sl. 44. prikazano očitavanje instrumenta po shemi u sl. 42. (i s praktičkom izvedbom kao u sl. 43.) kod 49,75 Hz, a na slici 45. očitavanje kod 50,0 Hz.

Osim na opisani način po sl. 43. (Hartmann-Kempff, H&B) s direktnim djelovanjem elektromagneta na pojedine jezičce grade se instrumenti s resonantnim jezičcima također (Frahm, S&H) i tako da se po sl. 46. jezičci 1 montiraju na zajedničkom hrptu 2 u vezi s jednom magnetskom kotvom 4, koja pod utjecajem elektromagneta 5 dode u vibracije neznatne amplitude. Te se vibracije preko hrpta prenesu dalje na sve jezičce, od kojih međutim intenzivno zatitiraju samo oni koji su u resonanciji ili blizu nje, tako da je slika titranja jezičaca ista kao i kod prve izvedbe.

Kod sistema u sl. 43. vide se dva reda jezičaca, s jedne i s druge strane elektromagneta, čime je postignut veći opseg mjerenja instrumenta zbog većega broja jezičaca. Međutim osim ovih »jednostrukih« ima i instrumenata s jezičcima za mjerenja frekvencija s dva sistema, dakle »dvostrukih« mjerila frekvencije za isporođivanje frekvencija struja iz dvaju različitih izvora. Jedan takov instrument pokazuje istu frekvenciju 50,0 Hz za obje struje na sl. 47.



Sl. 47.



Sl. 48.



Sl. 49.

Vlastiti potrošak instrumenata s resonantnim jezičcima vrlo je malen, jer je elektromagnet moguće uzбудiti s malo potroška učina. Instrumenti se redovno priključuju na način voltmetara, t. j. uzbudni namotaj elektromagneta (u seriji s dodanim otporom kao i kod voltmetara) priključi se u »poredni tok« (analogno spoju voltmetra u sl. 14.)

Zanimljivo je da jezičci zapravo izvode mehaničke titraje frekvencije dvostruko tolike kolika je frekvencija izmjenične struje, jer svaka polovica periode izmjenične struje daje po jedan titrajni impuls jezičcima. Samo u slučaju »polariziranih« jezičaca (koji su trajno prije magnetizirani u magnetskom polju istosmjerne struje) frekvencija struje mora biti ista kao i vlastita frekvencija titraja jezičaca.

51. Indirektno se aparati s resonantnim jezičcima mogu upotrebiti i za mjerenja brzine (broja okretaja na minutu) različitih strojeva, dakle kao *tahometri*. Za očitavanje kod same mašine dovoljno je već ako se »češalj« s nizom jezičaca reso-

nantnih na različite frekvencije, prisloni uz mašinu. Trešnje mašine već su dovoljne da uzbude jezičac s resonantnom frekvencijom. Za očitavanje brzine mašine na daljinu udesi se da zajedno s mašinom rotira i jedan mali generator izmjenične struje, od kojega vode dvije žice do udaljenoga električkoga mjerila frekvencije s jezičcima (u jednoj od već opisanih izvedbi). Već prema brzini stroja od generatora proizvedena izmjenična struja bit će više ili niže frekvencije, a prema tomu će resonantno (jako) titrati u udaljenom instrumentu jezičci s višom ili nižom vlastitom frekvencijom, iznad kojih se odmah može napisati brzina mašine preračunana u okretaje n na minutu (vidi oznaku: n/min na aparatu u sl. 48. sa skalom brzina od 900 do 1200 okretaja na minutu). Sami generatori izmjenične struje za ove svrhe mogu biti vrlo raznoliko izvedeni, na pr. s pločicom od mekoga željeza s određenim brojem izbočina kao u sl. 49. Kod rotiranja pločice izbočine redom prolaze ispred polova magneta s električkim namotajem i induciraju u tomu namotaju struje tim veće frekvencije čim više izbočina sekundno projuri ispred magneta.

III. IZ PRAVILA ZA MJERNE INSTRUMENTE.

52. Kod upotrebe mjernih instrumenata od velikoga je praktičkoga značenja da se detaljnije poznaju granice pouzdanosti njihovih podataka, te druge pojedinosti u vezi sa sistemom i načinom upotrebe pojedinih instrumentskih izvedbi. To je tim potrebnije što za unutarnju vrijednost instrumenta nije odlučna njegova manje ili više fina vanjska izvedba, nego kvaliteta njegove unutarnje konstrukcije. Smjernice za prosuđivanje u tomu pogledu daju različita pravila, odnosno specifikacije za mjerne instrumente, postavljena u pojedinim industrijski naprednim zemljama. Po kriterijima u tim pravilima dadu se instrumenti više ili manje pouzdano kategorizirati i procjenjivati.

Najstarije ovakove specifikacije bile su britanske (postavljene god. 1919.). Iza njih slijedila su druga slična pravila, i to najprije 1921. francuska, a zatim 1923. (kod nas i u mnogim drugim zemljama najviše upotrebljavana) njemačka »Pravila za mjerne sprave« unutar okvira poznatih *VDE-propisa* (propisa, što ih izdaje »Savez Njemačkih Elektrotehničara«, »Verband Deutscher Elektrotechniker«).

53. Po njem.prvim pravilima za mjerne instrumente (VDE 0410/1923), iz kojih ovdje donosimo samo nekoliko najbitnijih točaka, predviđalo se četiri stepena preciznosti: instrumentske kategorije E i F (*fini* ili *precizioni* instrumenti prve, odnosno druge klase), te instrumentske kategorije G i H (*pogonski*

instrumenti prve, odnosno druge klase). Pri tomu treba primjetiti, da u praksi redovno nisu susretani instrumenti označeni od fabrikanta s klasom lošijom od G. Na svakom instrumentu osim oznake tvornice i slova koje označuje klasu (E, F, G, H) trebalo je posebnim »simbolom« označiti i mjerni sistem. U pravilima VDE 0410/1923 predviđani su ovi mjerni sistemi:

	M 1	M 1 Instrumenti s permanentnim magnetom i pomičnim svitkom
	M 2	M 2 Instrumenti s pomičnim željezom
	M 3	M 3 Elektrodinamski instrumenti, i to: a) bez željeza, b) željezom zaštićeni, c) željezom zatvoreni
	M 4	M 4 Indukcioni instrumenti
	M 5	M 5 Instrumenti s vrućom žicom
	M 6	M 6 Elektrostatski instrumenti
	M 7	M 7 Vibracioni instrumenti.
	Z ₁	Simboli za ove sisteme naznačeni su u sl. 50., gdje su primjera radi uz simbole za obične sisteme s permanentnim magnetom, odnosno elektrodinamski (bez željeza) M 1 i M 3 s jednim pomičnim svitkom done-seni i simboli istih sistema s <i>unakrsnim</i> svicima. Na sl. 50. naznačeni su također kod Z ₁ i Z ₂ simboli (jed-nostavna kružnica, odnosno nešto kompliciraniji okvir) kojima se po pravilima VDE imalo zaokružiti sisteme tipa M3 kad je trebalo naznačiti da se radi o »željezom zaštićenim«, odnosno »željezom zatvorenim« izvedbama.
	Z ₂	

Sl. 50.

Ako se instrument imao upotrebljavati, odnosno ako su mu očitavanja skale vrijedila za upotrebu u horizontalnom ili vertikalnom (eventualno i nekom kosom) položaju, moralo se i to naznačiti na instrumentu horizontalnim ili vertikalnom crticom (odnosno naznakom propisanoga priklona). Osim toga je trebalo da je na instrumentu naznačeno (znakovima jednakosti, sinusoide ili jednim i drugim) da li je instrument određen za mjerenja samo s istosmjernom ili samo s izmjeničnom strujom ili je za obje vrste struje (kod izmjeničnih struja uz znak sinusoidemoglo se po potrebi naznačiti i područje dopuštenih frekvencija).

Konačno trebalo je jednom zvjezdicom u određenoj boji naznačiti: s kolikom je (izmjeničnim) ispitnim naponom, primijenjenim za vrijeme od 1 minute između kućišta (ili metalne podložne ploče) i dijelova instrumenta koji dolaze pod napon, izvršena »proba električkoga proboja«, pri čemu je *crna* zvjezdica značila ispitni napon od 500 V, *smeđa* 1000 V, *crvena* 2000 V, *plava* 3000 V, *zelena* 5000 V. U praksi su dolazile najviše zvjezdice crvena i zelena. Pri tom je na pr. crvena zvjezdica, dakle 2000 V

ispitnoga napona, značila: napon sistema instrumenta prema kućištu kod upotrebe instrumenta u pogonu smije iznositi do 650 V, a kod zelene zvjezdice s 5000 V ispitnoga napona analogno su dopuštani pogonski naponi do 1500 V; no prikladnom izolacijom i spajanjem kućišta instrumenta s jednim polom instrumenta moglo se instrumente upotrebljavati i kod viših napona.

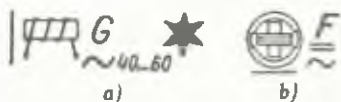
54. Granice za pogriješke podataka instrumenata prema gore i dolje (»tolerancije«) određene su za pojedine klase u prvim VDE ovako: Instrumenti mjernoga sistema M 1: 0,2% za klasu E, a 0,3% za klasu F. Instrumenti sistema M 2 do M 6, ako se radi o voltmetrima i vatmetrima: 0,3% za klasu E i 0,5% za klasu F; ako se radi o ampermetrima: 0,4% za klasu E i 0,6% za klasu F. Za instrumente klase G (svi sistemi) tolerancije su kod volt-, amper- i vatmetara 1,5%, dok su za analogne instrumente klase H dopuštene pogriješke do dvostrukog iznosa, dakle do 3%.

Treba međutim primijetiti da se svi gore označeni procenti misle od *ukupnoga* iznosa skale, pa kod mjerenja kod kojih otklon instrumenta iznosi samo dio skale, na pr. polovicu ili četvrtinu itd., procentualna pogriješka izražena u postocima po instrumentu *pokazanoga* iznosa može biti znatno veća. Ako se na pr. ampermetrom za 5 A izmjeri samo 2 A, pogriješka kod instrumenta klase E može iznositi 0,2% od iznosa 5 A, t. j. instrument može u apsolutnom iznosu griješiti do granice 0,01 A prema gore ili dolje; ali ta pogriješka od 0,01 A izražena u procentima iznosa 2 A, *pokazanoga* od instrumenta, iznosi 0,5%, jer 0,01 je 0,5% od 2,00.

Uz spomenute pogriješke predviđane su u prvim VDE dodatne pogriješke od utjecaja nastalih kod upotrebe instrumenata pod prilikama različitima od propisanih normalnih. Tako na pr. utjecaj temperature, ako se instrument ne upotrebljava kod propisane temperature 20° C nego kod temperature za 10 stupnjeva C više ili niže, smije izazvati pogriješku ampermetara klase E i F najviše do 0,5%, a kod voltmetara i vatmetara najviše do 0,3%; i tako dalje za druge klase. Slično je uzet u obzir i utjecaj eventualnih vanjskih magnetskih polja, a kod instrumenata za izmjenične struje i utjecaj frekvencije i sl., što se sve može naći detaljnije specificirano u citiranim pravilima VDE, iz kojih se također može razabrati kakove su (osim za volt-, amper- i vatmetre) predviđene još granice pogriješaka specijalnih instrumenata (poimence: cosφ-mjerila, te mjerila frekvencije).

Prema gornjim podacima iz samih oznaka na nekomu instrumentu, ako su stavljene prema pravilima VDE, dade se potpuno

očitati najbitnije o kvaliteti, sistemu i upotrebi instrumenta. Tako se na pr. kod instrumenta s oznakama »AEG«, slovom A stavljenim



Sl. 51.

uz skalu, te simbolima kao u sl. 51a) odmah razabiralo da se radi o fabri-
kату AEG, i to ampermetru klase G
sistema s pokretnim željezom, koji
se ima upotrebljavati u vertikalnom
položaju, a skala mu vrijedi kod

mjerjenja izmjeničnih struja s frekvencijama od 40 do 60 Hz. Kod zvjezdice u zelenoj boji ispitni napon instrumenta bio bi 5000 V. Naprotiv instrument sa simbolima kao u sl. 51b) bio bi elektrodinamski, i to »željezom zatvoreni«, klase F, upotrebljiv za istosmjernu i izmjeničnu struju (unutar opsega frekvencija, koji pravila VDE u slučaju nenađene frekvencije predviđahu: od 15 do 60 Hz). Instrument bi se upotrebljavao u horizontalnom položaju. Kod (u slici nenacrtane) zvjezdice crvene boje instrument bi bio izvedba s ispitnim naponom 2000 V.

55. *Britanska pravila za mjerne instrumente s direktnim očitanjem* B. S. S. No. 89—1929¹⁾, u stilizaciji iz god. 1929., koja je sada (1939.) na snazi, razlikuju se u mnogome od njemačkih. Između ostalog predviđaju se samo tri klase točnosti instrumenata. Najpreciznija klasa jest SS-klasa (»substandard« instrumenti), a zatim slijede još dvije kategorije: FG-klasa (»first grade«) i SG-klasa (»second grade«). Granice točnosti (tolerancije) SS-klase odgovaraju, grubo uzeto, onima kod njemačkih klasa E i F, a za ostale dvije klase dopuštene su veće tolerancije. U posebnim pravilima (B. S. S. No. 90—1929) predviđene su nešto šire tolerancije za »aparate za registriranje« (recording instruments).

Francuzi su predvidjeli: a) étalons industriels, b) appareils de contrôle i c) appareils indicateurs, te kao posebnu klasu: d) appareils enregistreurs (aparate za registriranje).

Od vremena do vremena javlja se potreba nadopunjivanja ili mijenjanja pravila za mjerne instrumente u skladu s novim iskustvima i s napretkom tehnike električkih mjerenja. Tako su britanska pravila nekoliko puta mijenjana od god. 1919. dalje. Kod njem. prvih pravila VDE 0410 ostala je predbježno netaknuta prva stilizacija iz 1923., koja je tek 1938. doživjela reformu. U njima na pr. uopće nema mjernih sistema instrumenata koji su se istom u kasnije vrijeme pojavili ili bar jače razvili; poimence nema sistema instrumenata s pomičnim svitkom i permanentnim magnetom u kombinaciji s metalnim suhim ispravljačima, dakle »ispravljačkih« instrumenata za izmjenične struje i napone, a isto tako su od termičkih instrumenata uzeti u obzir samo instrumenti s vrućom žicom (koji su danas već uglavnom zastarjeli), a nema

¹⁾ British Standards Institution (Specification No. 89—1929 for indicating ammeters, voltmeters, wattmeters...).

spomena o instrumentima s »termopretvaračima« za mjerenja izmjeničnih struja i napona. Kod pripremanja novih pravila VDE (koje je već u toku) uzet će se, dakako, to u obzir.

56. Međutim tokom posljednjih godina sve više se ispoljavala misao da se poteškoće u internacionalnom saobraćaju zbog nepodudaranja između različitih nacionalnih pravila za mjerne instrumente uklone međunarodnim sporazumom. Ta je misao »internacionalnih« pravila konačno dozrela u novije vrijeme. Na konferenciji god. 1935. u Bruxellesu XIII. komiteta »Internacionalne Elektrotehničke Komisije (International Electrotechnical Commission) sa sjelom u Londonu prihvaćena su *Internacionalna pravila*, po kojima se mjerni instrumenti vrlo pregledno dijele na pet klasa: 0,2; 0,5; 1,0; 1,5 i 2,5 označenih onim istim brojevima, koji označuju tolerancije tih klasa u postocima najveće vrijednosti (punoga iznosa skale) kod normalnih prilika upotrebe. Istodobno se pazilo da, zbog veće preglednosti, i dodatne tolerancije zbog temperaturnih utjecaja, utjecaja promjene frekvencije itd., budu po mogućnosti izražene isto tolikim procentnim iznosima, samo s tom razlikom da se neke od tih dodatnih tolerancija umjesto na najveću vrijednost (puni iznos skale) odnose na pokazanu vrijednost, kako je očitana na instrumentu. Ovim IEC-pravilima bila su prilagođena i nova VDE-pravila (v. VDE 0410/1938.).

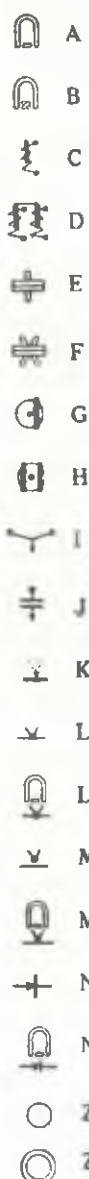
Evo tabele dopuštenih pogrješaka po internacionalnim pravilima (zanemarujući ili ispuštajući neke detaljnije odredbe):

Tabela V.

Klasa	Tolerancija pod normalnim prilikama ¹⁾ mjerenja	Temperaturni utjecaj (kod promjene temperature okoliša za 10 st. C)	Utjecaj frekvencije (kod odstupanja frekvencije za 10% od navedene)	Utjecaj stranih magnetskih polja (polja jakosti 5 EMJ, istovrsnih s mjernom veličinom)
0,2	0,2	0,2	0,2	U najnepovoljnijem slučaju za instrumente sa pomičnim svitkom i permanentnim magnetom: 1,5%; za sve ostale sisteme svih klasa: 3% (od najveće vrijednosti).
0,5	0,5	0,5	0,5	
1,0	1,0	1,0	1,0	
1,5	1,5	1,5	1,5	
2,5	2,5	2,5	2,5	
	u % najveće vrijednosti	u % pokazane vrijednosti	u % pokazane vrijednosti ²⁾	

¹⁾ T. j. kod temperature od 20° C, kod navedene frekvencije ili područja frekvencija (odnosno, ako nije ništa navedeno, u području od 15 do 60 Hz), u prostoru slobodnom od stranih magnetskih polja i slično.

²⁾ Uz to kod instrumenata klase 0,2 bez navoda frekvencije podatak instrumenta unutar područja od 15 do 60 Hz ne smije varirati više nego 0,1% od pokazane vrijednosti.



Sl. 52.

Kod *vatmetara* svih pet klasa uzet je još u obzir utjecaj faktora učina ($\cos\varphi$) na podatke vatmetra u tom obliku što je određeno da vatmetar opterećen nominalnom (punom) strujom i nominalnim (punim) naponom uz $\cos\varphi = 0$ kod čiste induktivne prazne struje ne smije dati otklon veći nego 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; odnosno 2,5% najveće vrijednosti već prema klasi instrumenta¹⁾. Povrh toga kod vatmetara klasa 0,2 i 0,5 otklon kod nominalnih (punih) vrijednosti napona i struje uz $\cos\varphi = 0,5$ ne smije odstupati za više nego 0,2%, odn. 0,5% od otklona koji se postigne s nominalnim naponom, ali samo s polovicom nominalne struje uz faktor učina $\cos\varphi = 1$; u idealnom bi naime slučaju oba otklona zapravo po relaciji $E.I.1 = E.I./2.0,5$ morala biti jednaka (v. i razmatranja u B-23).

57. Izvan citiranih Internacionalnih pravila *predloženi* su i *internacionalni simboli* za mjerne sisteme, analogni (a djelomično i jednaki) njemačkima (sl. 50.), kakovi su uzeti u pravila VDE za mjerne sprave. Oznake mjernih sistema po ovim internacionalnim simbolima sabrane su u sl. 52. Glavne razlike prema njemačkim simbolima su u načinu označivanja instrumenata s pomičnim željezom (C na sl. 52.) i indukcionih (G na sl. 52.). Oznake za sisteme s pomičnim svitkom i permanentnim magnetom te za elektrodinamske uzete su posvema iste (A i B na sl. 52.) ili su samo neznatno pojednostavljene (E i F u sl. 52.), dok su oznake za instrumente s vrućom žicom, elektrostatske i vibracione nešto znatnije pojednostavljene (I, J i K u sl. 52.). Posvema novi prema VDE-pravilima su simboli L i L₁, te M i M₁ za termopretvarače, odnosno za instrumente s termopretvaračima, različiti već prema tomu da li je spojište termopara u električkom spoju s žicom koju grije struja ili je izolirano, pri čemu se simboli L i M samo za pretvarača smiju upotrebljavati i za predočivanje cijele kombinacije pretvarača i instrumenta, ako nema pogibelji nesporazumka. Slično vrijedi i za simbole N i N₁ za suhe ispravljače i za instrumente sa suhim ispravljačima. Predviđeni su i simboli za »kvocijenta mjerila« (s mekim željezom i indukcionala); to su D i H u sl. 52. Oznaka Z₁ (da je sistem

¹⁾ U idealnom slučaju ne bi uopće bilo nikakova otklona sistema, jer uz faktor učina nula izlazi: $N = E.I.0 = 0$.

željezom zaštićen) ista je kao i ona u sl. 50., dok je oznaka Z_1 željezom zatvorenoga sistema ovdje nešto pojednostavljena prema onoj u sl. 50.

CJ APARATI ZA REGISTRIRANJE I OSCILOGRAFI

I. APARATI ZA REGISTRIRANJE

1. Dosta se često (i danas sve češće) u elektrotehničkoj praksi zahtijevaju aparati koji, osim što otklonima pokazuju iznos mjerene veličine, mogu ujedno i da *bilježe* ili *registriraju* tok polaganijih promjena vrijednosti te veličine u duljim otsječcima vremena. *Aparate za registriranje*, koji služe za ovakove svrhe i karakterizirani su relativno tromijim pomičnim sistemima, sličnima onima kod običnih mjernih instrumenata s kazalom, te malenim brzinama registracije, treba razlikovati od *oscilograma* koji doduše također bilježe vremenski tok istraživanih veličina, ali imaju mjerne sisteme posvema drukčije građene, s praktički zanemarivom tromošću, jer im je zadatak da bilježe ili pokazuju detalje toka i vanredno kratkih jednokratnih pojava ili pojedinosti variranja unutar trajanja pojedinih perioda brzo promjenljivih periodskih veličina, na pr. izmjeničnih struja, t. j. da dadu ili pokažu krivulju momentanih iznosa istraživane izmjenične veličine. Ima dakako i konstrukcija na granici između obih kategorija aparata.

2. Kod *aparata za registriranje* (schreibende Messgeräte, recording instruments), iako se u bitnosti upotrebljavaju normalni mjerni sistemi, ipak se redovno uzimlju, zbog većega trenja u aparatima ove vrsti, izvedbe s jačim momentima vrtnje nego li se traže kod običnih instrumenata s kazalom. Kao nadopunu samih mjernih sistema aparati za registriranje dobivaju jedan uređaj koji prenosi otklon pomičnoga dijela mjernoga sistema na jedno pero s tintom ili na drugu koju napravu koja markira vrijednosti mjerene veličine na pruži papira jednoliko pomicanom prikladnim mehanizmom, već prema potrebi s većom ili manjom brzinom.

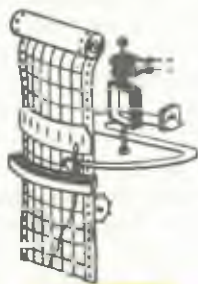
Prema mehanizmu bilježenja registracione krivulje aparati za registriranje mogu se uglavnom razdijeliti u dvije kategorije: u jednu spadaju oni s pisanjem *neprekidnih linija*, na pr. s pomoću pera snabdjevenoga s rezervoarom masne tinte (t. zv. »pisari linija«), a u drugu oni koji iznos mjerene veličine markiraju na jednoliko pomicanom papiru samo u pravilnim vremenskim razmacima pojedinim *točkicama* (»pisari točkica«). U ovom posljednjem slučaju markacije na papiru moraju se, dakako, vršiti u dovoljno blizim intervalima vremena, kako bi

točkice došle toliko gusto jedna do druge da se tok registracione krivulje daje još dobro pratiti.

3. Razmotrimo najprije *pisare linija*. U principu može se ovakov aparat izvesti na bazi ma kojega mjernoga sistema s dovoljno velikim momentom vrtnje produljivši, da se postigne da mjerena veličina bude registrirana, naprosto kazaljku instrumenta da seže do papira, jednoliko gibanoga na pr. mehanizmom ure. Pero s tintom smješteno na vrhu kazaljke piše onda klizajući po trajno gibanom papiru registracionu liniju.

Međutim kako vrh običnoga kazala kod variranja otklona vrtivoga mjernoga sistema opisuje kružni luk, a ne pravac, registraciona krivulja ne izlazi u slučaju ravnoga kazala u sistemu pravokutnih koordinata, nego izobličeno (kao i registracije barometarskih stanja u poznatim jednostavnim aparatima za tu svrhu, t. zv. »barografima«). Kako je očitavanje ovakovih krivulja manje udobno nego očitavanje krivulja u pravokutnim koordinatama, to je praksa kod savremenih pisara linija, da se na ovaj ili onaj način udesi da šiljak pera izvodi pravocrtno gibanje u smjeru okomitom na smjer gibanja papira tako da izide registraciona krivulja s pravokutnim koordinatama (apscise: vrijeme, ordinate: vrijednosti registrirane veličine).

4. Ima više načina kako se to daje praktički izvesti. Razmotrimo bliže dva primjera pripadnih konstrukcija: a) one s »kukastim« kazalom i b) one s »elipsnim upravljačem«.



Sl. 53.

Kod aparata s kukastim kazalom upotrebljeno je po shemi u sl. 50. kazalo tako postrance svinuto u obliku kuke da pero s tintom kod svakoga otklona mjernoga sistema baš tiče šiljkom papir, koji je na mjestu registriranja tako nategnut i svinut da se gublje približljivo uz cilindričku plohu koaksijalnu (istoosnu) s osi vrtnje mjernoga sistema.

Mjerni sistem aparata u sl. 53. (izvedba H&B) jest s pomičnim svitkom i permanentnim magnetom. Razabiru se i drugi detalji konstrukcije kao: magnetsko prigušenje, uzimanje tinte iz rezervoara po principu kapilariteta, jednoliko pomicanje papira mehanizmom ure posredstvom kotačića koji zahvaćaju u perforaciju s obje strane papirnatu registracionu prugu i drugo. Za očitavanje momentanih otklona mjernoga sistema predviđena je svinuta skala, ispred koje se gublje jezičac montiran na kukastom kazalu.

Na sl. 54. prikazan je vanjski izgled jednoga ovakovog linijskog pisara s konstrukcijom po sl. 53.

Brzine gibanja papira variraju prema svrsi i pogonskim prilikama kod registracije. Kod polaganih registracija mnogo se upo-

trebljavaju na pr. brzine 20 mm/h (milimetara na sat), 60 mm/h ili slične, no kod veličina koje se naglo mijenjaju dolaze i brzine gibanja od više milimetara na minutu (mm/min) ili, ekstremno, čak i nekoliko milimetara na sekundu (mm/s). Osim mehanizama ure, koji se navijaju, upotrebljavaju se za gibanje registracionoga papira i *motorni pogoni*.



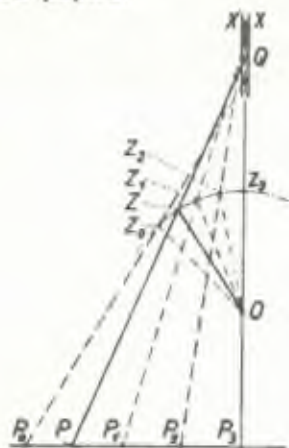
Sl. 54.

5. Kod *aparata s elipsnim upravljačem* iznudeno je »pravčasto vođenje« šiljka pera koje piše naročitim mehaničkim prenosom upotrebljavanim i u strojarstvu kod mehaničkih registracionih aparata. Svrha je elipsnoga (Evansova) upravljača da se zakreti nekoga mjernoga sistema tako prenesu na kazalo aparata da pero s tintom, smješteno na jednom kraju kazala, po mogućnosti približno izvodi gibanje u pravčastoj liniji, okomitom na smjer gibanja registracionoga papira. Neka na sl. 55. određenom zakretu mjernoga sistema odgovara položaj OZ vrtive ručke učvršćene krajem O na osovinu mjernoga sistema. Na protivnom kraju Z ručka ima zglob preko kojega se zakreti (vrtnje) ručke OZ prenose na kazalo aparata PQ, koje na jednom

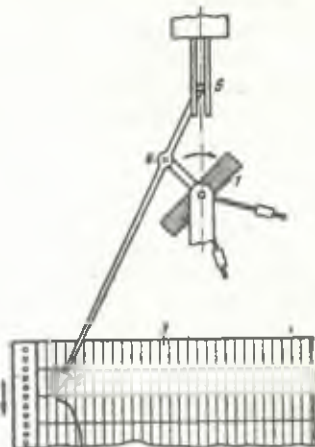
kraju P nosi pero s tintom, dok mu protivni kraj nije čvrst. nego je slobodno gore-dolje gibljiv unutar vertikalnoga provoda XX. Geometrijska razmatranja pokazuju: sada da bi, u slučaju kad bi netko prisilno pomicao pero P pravčasto u horizontalnom smjeru (lijevo-desno), točka Z morala opisivati dio elipse. Oblik, pak te elipse određen je omjerom duljina dijelova ZP i ZQ kazala, te se prikladnim izborom toga omjera može postići da se dio elipse koji opiše Z dok se P makne po raspoloživoj širini papira, praktički skoro ni ne razlikuje od kružnoga luka. Ako dakle, obrnuto, mjerni sistem instrumenta čini različite otklone, pa se zbog toga točka Z šeće po kružnom luku, onda će gibanje pera biti praktički pravocrtno i registracija na jednoliko gibanom papiru bit će u pravokutnim koordinatama. U sl. 56. detaljnije je shematizirana praktička realizacija aparata s elipsnim upravljačem.

6. Samo ordinate u ovim prilikama nisu proporcionalne otklonima mjernoga sistema. Tako duljine P_1P_2 , P_2P_1 , P_1P i PP_2 na sl. 55. postaju sve manje, makar su pripadni položaji OZ₁, OZ₂, OZ₁, OZ i OZ₂ vrtive ručke razmaknuti za jednake

kuteve. Izlazi dakle nejednolika skala registracije čak i kod onih mjernih sistema koji se otklanjaju proporcionalno mjerenoj veličini, i to ponešto stisnuta prema lijevom i desnom rubu papira.



Sl. 55



Sl. 56.

Kod mjernih sistema, koji su sami sobom označeni nejednolikom skalom, ove deformacije karaktera skale u registraciji mnogo ne smetaju, jer ako se registracioni papir i onako mora linirati prema nejednolikom karakteru skale, svejedno je da li je skala više ili manje nejednolika. Ali kod sistema kojih bi otkloni sami po sebi dali jednoliku skalu, kao što je to slučaj kod istosmjernih sistema s pomičnim svitkom, a kod izmjeničnih struja kod vatmetričkih sistema, nastoji se svakako udesiti da registracija izadje u jednolikoj skali. To se postizava naročitim dodanim elastičnim perima koja se puste da djeluju na prikladno postavljene polugice. Superpozicijom elastičnih sila tih pera momentima vrtnje samoga mjernoga sistema postizavaju se takovi rezultujući momenti vrtnje da su otkloni u srednjem dijelu skale malko stisnuti, tako da rezultira ponešto neproporcionalna vrtnja samoga zakretnog sistema aparata, ali baš zato jednolika skala registracionih otklona što ih pero bilježi na papiru. U tome se dakle slučaju može upotrebiti registracioni papir s jednolikom podjelom razmaka. Ovom se metodom može utjecati na karakter skale registracija i kod drugih registracionih aparata, a ne samo ovdje razmatranih.

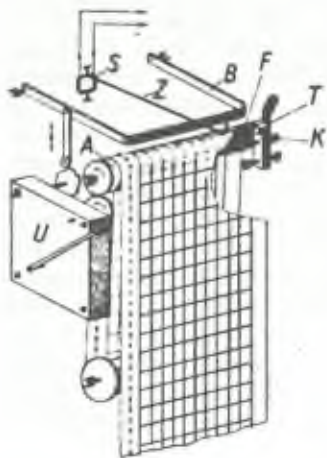
I kod aparata s elipsnim upravljačem predviđena je dakako, kao uopće kod registracionih sprava, mogućnost očitavanja momentanih podataka instrumenta uz pomoć fiksne skale i jezička ispred nje, smještenoga na kazalu PQ.

7. Posebne vrsti linijski pisari jesu aparati za bilježenje smetnja u električkim mrežama (Störungsschreiber). Oni moraju biti građeni na naročiti način: brzina gibanja papira mora im biti neznatna za vrijeme dok nema smetnja (da se ne troši previše papira), no u času kad dode do smetnje na pr. u pogonu električke mreže, ona mora automatski postati na kratko vrijeme mnogo puta veća da bi aparat mogao zabilježiti pojedinosti kratkotrajnoga pojava.

Dok nema smetnje, registriranje se na pr. obavlja uz brzinu pomicanja papira od 20 mm/h, no u momentu nastanka smetnje reagiranjem prikladnih relaisa prekopa se privremeno kroz vrijeme od 24 sekunde uređaj za pomicanje papira na brzinu, recimo, 10 ili 20 mm/s, dakle 1800 ili 3600 puta veću, tako da se u te 24 sekunde odmotatoliko papira, koliko unutar polovice, odnosno cijeloga dana uz brzinu papira od 20 mm/h.

Razumije se da za vjerno bilježenje pojedinosti kod ovako golemih brzina registracije mjerni sistemi moraju biti specijalne konstrukcije s neznatnom tromošću i prikladno udešenim prigušenjem gibanja (vrijeme namještanja na pr. samo 0,1 sekunde). A da bi mogli bilježiti smetnje u trofaznim mrežama, što je najviše slučaj kod primjene ovih aparata, moraju se ispred mjernih sistema, koji su sami po sebi oni s pomičnim svitkom i permanentnim magnetom, staviti suhi ispravljači (Graetzov spoj; B-30.).

Obično se montiraju u isti aparat odmah tri takova mjerna sistema sa suhim ispravljačem, tako da se kod trofaznog priključka ovakovoga »pisara smetnja« dobivaju istodobno registracije svih triju faza jedna do druge, svaka na svojoj trećini širine registracije pruge.



Sl. 57

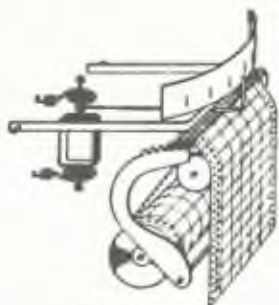
8. Kod pisara točaka redovne su konstrukcije *aparati s pomičnim stremenom* (Fallbügelschreiber). Kod njih nema pera s tintom koje sklize po papiru, pa nema ni trenja od toga za vrijeme otklanjanja mjernog sistema. Zato kod aparata s pomičnim stremenom mogu biti upotrebljeni mjerni sistemi s relativno malenim momentima vrtnje, odnosno s vrlo velikim osjetljivostima, kakove su potrebne na primjer kod registriranja neznatnih elektromotornih sila od malo milivolta kod temperaturnih registracija s pomoću termoelementa. Kod sistema s pomičnim stremenom dolazi kazalo u doticaj sa

papirom samo trenutno u pravilnim razmacima vremena. Biva to na taj način da jedan mehanizam, koji giblje i papir, stavlja

u određenim vremenskim razmacima u funkciju napravu, koja tako spusti pomični stremen smješten po sl. 57. iznad kazala, da kazalo instrumenta bude pritisnuto na papir baš na mjestu gdje papir prolazi preko podloge s oštrim bridom poprečno položenim prema kazalu. Ako se između podloge i papira nalazi bojom natopljena vrpca slična onoj kod pisacih strojeva, zabilježi se na papiru kod svakoga spuštanja streмена točkica na mjestu pritiska kazala na podlogu. Tu točkicu vrpca s bojom markira na donjoj strani papira, no kod upotrebljenoga nešto prozirnijega papira ona se dobro vidi i s gornje strane. A može se također, kao na sl. 58., vrpca s bojom staviti između papira i kazala, slično kako kod pisacih strojeva leži između tipke i papira, pa se bojadisani trag markira s gornje strane papira.

Kod polaganih registracija dovoljno je ako pritisci kazala na papir slijede i u većim razmacima vremena, na pr. svakih 40 sekunda ili još rjeđe, a da se ipak tok registracione krivulje može dovoljno točno slijediti. U međuvremenima, dok je stremen gore podignut, mjerni sistem ima prilike da se slobodno namjesti na otklon koji odgovara iznosu mjerene veličine.

9. Pisari točkica s pomičnim stremenom dolaze mnogo i u izvedbama kod kojih se istim aparatom mogu simultano izvoditi registracije od više (obično od 3 ili 6) mjerenih veličina, na primjer od 6 temperatura mjerenih termoelementima na isto toliko različitih mjesta. U tomu slučaju mjerni sistem prekapča se prikladnom preklopkom u trajno ponavljanim turnusima redom na prvi, na drugi, na treći itd. mjerni krug i za svaki se mjerni krug markira pripadni otklon spuštanjem streмена koje pritisne kazalo na papir. Nastane tako nekoliko nizova točkica koje označuju tok registracionih krivulja pojedinih mjerenih veličina. Ako su krivulje dosta razmaknute, one se dadu same po sebi razlikovati jedna od druge.



Sl. 58.

Ako se želi da i kod velike blizine ili međusobnoga preplitanja krivulja ne dođe do konfuzije, moraju se registracije različitih veličina označiti nekim razlikama. Najjednostavnije (i najobičnije u praksi) jest upotrebiti kod pisara s pomičnim stremenom *registriranje u više boja*.

Kod konstrukcija s markiranjem točkica s gornje strane papira upotrebi se u tom slučaju pomični nosilac

sa više vrpca s bojom, na pr. kukasto svinut kao onaj u sl. 58. i na prikladnim mjestima tako nazupčan, da se u udubine

između zubaca dade smjestiti potrebni broj vrpca natopljenih različitim bojama. Vrpce (u slici 58. vide se tri) položene su uzduž cijele širine registracionoga papira, pa ako se mehanizmu instrumenta koji tjera registracioni papir i vrši pogon preklapke što instrument redom ukapča u pojedine mjerne strujne krugove, još povjeri i zadatak da prikladnim mehaničkim prenosom izazivlje takove pomake nosioca raznobojnih vrpca da se kod markiranja točkica pripadnih različitim mjernim krugovima nađu između kazala pritisnutoga od pomičnoga stremena i registracionoga papira vrpce različite boje, onda je očito da će registracije pojedinih veličina izići na istom papiru svaka u drugoj boji.

Kod konstrukcija s markiranjem točkica s *donje* strane papira pomični nosilac raznobojnih vrpca kod registracija u više boja može biti naprosto vrtivi valjak, smješten prikladno kod mjesta registracije s osovinom u smjeru širine papira. Kod registracija na pr. u šest boja taj valjak ima šest uzdužnih izbočina, iznad kojih je razapeto šest vrpca u različitim bojama. Kako mehanizam koji izvodi prekapčanje instrumenta s jednoga mjernoga mjesta na drugo istodobno zakreće i vrtivi valjak s raznobojnim vrpčama, i to svaki puta za jednu šestinu punoga kuta, to pod papir dolaze redom vrpce različitih boja i svaka od šest registracija izlazi u svojoj boji.

Registracije različitih mjernih krugova mogu se različito označiti i nizom drugih načina. Na pr. kod tri krivulje može se, kraj registriranja u jednoj boji, broj i slijed prekapčanja na pojedine mjerne krugove tako udesiti da iziđe jedna krivulja s grupama od po tri guste točkice, druga s grupama od po dvije nešto više razmaknute točkice, a kod treće krivulje da točkice slijede pojedinačno u određenim razmacima vremena.

Kako se vidi, kod aparata s pomičnim stremenom registracije leže uzduž tetive kruga koji opisuje šiljak kazala mjernoga sistema. Ovo t. zv. »tetivno« pravčasto vođenje izobličuje dakako skalu registracije, izazivajući kod sistema s otklonima inače proporcionalnima mjerenoj veličini »stisnute« registracije uz rubove registracionog papira, i to tim više stisnute čim su u instrumentu predviđeni veći otkloni mjernoga sistema. Za korekciju ovako nastalih izobličenosti mogu se upotrebiti prikladna dodana pera s funkcijom, kako je već razložena u C-6.

10. Osim navedenih tipova pisara linija i pisara točkica ima još i naprava za registriranje po drugim principima. Na pr. umjesto tintom mogu se postići registracije i srebrenim šiljkom, koji ostavlja trag na baritnom papiru (kemijsko djelovanje), ili šiljkom koji bilježi linije skidajući čadu s počadenoga papira ili struže (na pr. crveno bojadisani) vosak s povoštenoga papira itd.

Bez doticaja (i trenja) kazala s registracionim papirom mogu se dobiti registracije uz pomoć električkih iskara, koje probiju papir i ostavljaju na njemu sitne rupice, dobro vidljive kad se papir okrene prema svijetlu. Potrebni (za iskre) visoki napon dobiva se iz induktora tjeranoga baterijom.

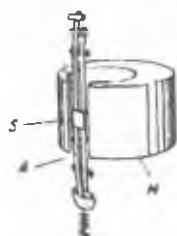
Odlične, po potrebi i najbrže registracije, također bez direktnoga kontakta mjernoga sistema s registracionom prugom, daje *fotografsko registriranje*, upotrebljavano i kod oscilografa. Ovom se metodom na pr. dadu registrirati otkloni galvanometara sa zrcalom i drugi. Postupa se u bitnosti tako da se po principu očitavanja zrcalom prikladnom optikom baci svijetlo, nakon refleksije na zrcalcu u vezi s mjernim sistemom, ne kao u sl. 4. na skalu SS za očitavanje otklona nego na jednoliko odvijani fotografski papir ili film. Moderne naprave za fotografske registracije zaštićene su od vanjskoga svijetla, te dopuštaju rad u nepotamnjanim prostorijama. Kod mnogih je konstrukcija takova da se mogu vršiti simultane registracije više pojava uz istodobno automatsko fotografsko markiranje vremenskih razmaka s pomoću tragova od pravilno ponavljanih bljeskova neonskih tinjalica, ugrađenih u napravu zajedno s prikladnim priborom za ovakovu svrhu.

II. OSCIOGRAFI

11. Kod registracija detalja toka vanredno brzih pojava potrebnu praktički nikakovu ili bar neznatnu tromost mogu dati samo specijalno za ovakove prilike građeni sistemi: oscilografski sistemi. Treba zapravo razlikovati između različitih *mehaničkih* sistema oscilografa, od kojih je najobičniji i praktički najvažniji t. zv. »petljasti oscilograf«, i oscilografa po principu *katodnih zraka* (kraće: »katodnih oscilografa«).

Kod *petljastih oscilografa* mjerni je sistem građen po shemi u sl. 59. i osniva se na djelovanju jakoga magnetskoga polja između polnih nastavaka magneta M (permanentnoga ili elektromagneta) na obje strane strujom protjecane nježne uske petlje A, lagano napete između polova magneta M, kako je predloženo u sl. 59. Po poznatim zakonima o mehaničkim silama koje djeluju na vodiče protjecane strujom ako su u magnetskom polju djelovat će kod prolaza neke određene struje sile koje će jednu stranu petlje nastojati potisnuti iz prvobitnoga položaja naprijed prema magnetu M, a drugu stranu natrag (jer struja u obje strane nužno teče protivno: u jednoj prema gore, u drugoj prema dolje). No ako se obje strane petlje otklone u smjeru spomenutih sila, sitno zrcalce S, pričvršćeno na petlju kao u

sl. 59., zakrenut će se oko vertikalne osi, i to u nekom određenom času više ili manje, te u ovom ili onomu smislu, već



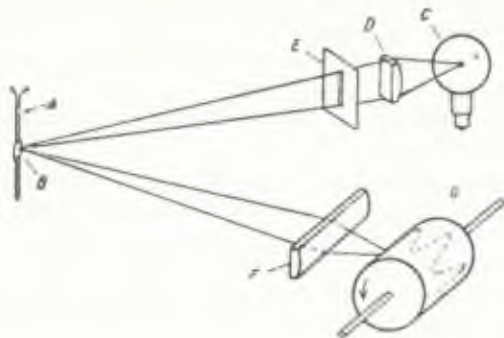
Sl. 59.

prema jakosti i smjeru struje kroz petlju. Kod promjenljive jakosti struje kroz petlju slijedit će petlja sa zrcalcem, zbog neznatne mase i neznatnoga momenta tromosti sistema, praktički vjerno svojim otklonima promjene struje kroz petlju. Da se ovim »narinutim« gibanjima petlje, koja mogu biti periodska ili neperiodska već prema tomu da li je struja kroz petlju periodska (izmjenična) ili nije, ne bi superponirali »vlastiti« titraji pomičnoga sistema, pušta se petlja sa zrcalcem da titra u prikladnom prigušnom sretstvu, na pr. u parafinskom ulju. Obično se ovo mehaničko prigušenje vlastitih titraja petlje udesi blizu aperiodskom graničnom stanju gibanja (B-10.) i u tomu slučaju petlja, ako joj je »vlastita frekvencija« (točnije: frekvencija titraja, koje bi mehanički udarena petlja izvodila da nema prigušenja) dovoljno visoka, slijedi momentano i praktički vjerno svojim otklonima i brze promjene struje kroz petlju, odnosno tok promjena izmjeničnih struja, kojih je frekvencija dovoljno malena prema vlastitoj titrajnoj frekvenciji petlje.

12. Gibanja zrcalca prenose se dalje optički s pomoću zraka svjetlosti po principu predloženom u sl. 60. na fotografski papir ili film, smješten na pr. na bubnju G, jednoliko okretanom malim motorom (ili inače kako brzo jednoliko giban). Tako se onda tok oscilografirane struje registrira krivuljom poput one crtkano naznačene u sl. 60. na bubnju G. Upotrebljeni rasvjetni uređaj sastoji se iz izvora svjetlosti C (sijalica dovoljno velike plošne svjetline ili po potrebi električki luk), iz kojega se svjetlost, koncentrirana sistemom leća (kondenzorom) D i ograničena pukotinom E, pušta na zrcalce B petlje A da bi nakon refleksije na B, koncentrirana cilindričkom lećom F, pala u obliku sitne a vrlo svijetle mrljice na registracioni film ili papir. Otkloni petlje manifestiraju se tako kao gibanja svijetle mrljice u smjeru okomitom na smjer gibanja fotografskoga papira ili filma, pa nastala registrirana krivulja, t. zv. »oscilogram«, ispadne više ili manje razvučena, već prema većoj ili manjoj brzini gibanja papira ili filma.

Ako se krivulja toka struje želi samo motriti, onda je dovoljno da se svjetlost, nakon prolaza kroz leću F u sl. 60., skrene po shemi u sl. 61. na jednoliko rotirani sistem poligonalno smještenih zrcala P s kojega ona dalje pada na ploču od mutnoga stakla, vidljivu gore u sl. 61., ili na prikladno smješteni zastor. Mjesto poligonalnoga sistema zrcala mogu se upotrebiti i druga sretstva da se oscilografirani pojav razvuče

u krivulju, koja se može motriti na mutnom staklu ili na zastoru (ili fotografirati na mlom foto-materijalu). Kod konstrukcija potpunih oscilografskih uređaja uvijek je predviđeno da se zrake što dolaze sa petlje mogu alternativno ili istodobno tako skrenuti, odnosno porazdijeliti, da se krivulja oscilografiranoga pojava može i motriti i fotografski registrirati.



Sl. 60.



Sl. 61.

Moderni oscilografski aparati imaju redovno odmah nekoliko petlja (na pr. 3 ili 6), pa se njima može istodobno istraživati u međusobnom odnosu po nekoliko različitih veličina, na pr. utjecaj kakove kratkotrajne perturbacije na tri struje i tri napona trofaznoga sistema i slično.

Gdje je potrebno, markiraju se i »nul-linije« istraživanih krivulja svjetlošću s prikladnih fiksnih zrcalca. Slično se može udesiti, i to na više načina, da se registriraju i »vremenski znakovi« (markacije pravilnih otsječaka vremena) ako registrirana struja nije sama periodična, ili ako je periodična, ali s nepoznatom frekvencijom.

Za valjano (vjerno) oscilografiranje potrebno je kod kompliciranijih krivulja da upotrebljena petlja uz valjano udešenje prigušenja ima što višu »vlastitu frekvenciju«, na pr. za pojave kod izmjeničnih struja tehničkih niskih frekvencija vlastitu frekvenciju od nekoliko hiljada ili najmanje nekoliko stotina Hz. Kod prelaza na registracije sve viših tonskih frekvencija počinju se međutim po izobličenim registracijama manifestirati posljedice ipak neke tromosti i dobro konstruiranih petlja i točna istraživanja postaju moguća samo uz pomoć »elektronskih« naprava, »katodnih oscilografa«, koji rade s elektronima umjesto s tromim masama.

13. U principu se *katodni oscilografi* osnivaju na iskorišćivanju otklona što ih pod utjecajem električkoga ili magnetskoga polja (proizvedenoga od istraživane struje ili napona) pretrpe »katodne zrake«, t. j. rojevi vrlo brzih »elektrona«, negativnih elementarnih električkih čestica.

Za proizvodjenje katodnih zraka služe posebne »cijevi za katodne zrake« (kraće: »katodne cijevi«), koje su u najstarijem obliku kao jednostavne »Braunove cijevi« poznate još od 1897., no za oscilografske svrhe i za svrhe televizije (električkoga gledanja na daljinu) vanredno su usavršene istom u posljednje vrijeme. Najbitnije u katodnim cijevima, ma kako se one inače konstruktivno razlikovale, jest dobro evakuirani balon, snabdjeven s dvije elektrode, od kojih prva, »katoda« (K na sl. 62.) služi za to da trajno emitira (izbacuje) elektrone, dok se druga, »anoda« (A na sl. 62.), drži nabijena s pomoću prikladnoga izvora električkoga napona na znatan pozitivni električki potencijal relativno prema katodi.

Pod utjecajem električkoga polja, proizvedena razlikom potencijala između anode i katode, elektroni izašli iz katode postignu u prostoru između anode i katode postepeno relativno visoku brzinu s kojom se (ako nema nikakvih drugih utjecaja) nakon prolaza kroz uski otvor u anodi A giblju prema protivnom kraju cijevi, uglavnom pravocrtno poput zraka svjetlosti, zbog čega je i nastao naziv »katodne zrake«.



Sl. 62.

14. Utjecaja koji mogu poremetiti uglavnom pravocrtno gibanje elektrona, dakle skrenuti (otkloniti) katodne zrake ima međutim, i to dvije vrste. Mogu tako djelovati električka polja, a također i magnetska polja, ako se samo (jedna ili druga) prikladnim sretstvima proizvedu na mjestu gdje prolaze katodne zrake.

Kad bismo na pr. ispriječili katodnim zrakama u toku njihove horizontalne staze u smjeru prema O na sl. 62. magnetsko polje vertikalnoga smjera, kakovo bi se na pr. dobilo puštajući u prikladnom smjeru električku struju redom kroz dva vertikalno smještena svitka (od kojih bi jedan bio smješten tik iznad, a drugi tik ispod katodne cijevi i to najbolje odmah iza anode A), nastao bi otklon katodnih zraka u smjeru okomitom na (horizontalni) smjer katodnih zraka i istodobno okomitom na (vertikalni) smjer magnetskoga polja, dakle otklon u horizontalnom smjeru, prema naprijed ili natrag obzirom na ravninu crtanja, već prema ovomu ili onomu smjeru struje kroz svitke,

a po tomu i prema ovomu ili onomu smjeru proizvedenoga magnetskoga vertikalnoga polja.

Kod *električkih* polja, okomitih na smjer katodnih zraka, odklon se zbiva naprotiv u smjeru paralelnom sa smjerom samoga polja, i to tako da, zbog negativnoga naboja elektrona, katodne zrake bivaju uvijek skretane u smjeru protivnom od smjera u kome bi polje gibalo pozitivne naboje (koji se smjer ujedno zove i smjerom električkoga polja). Tako bi na pr. (sl. 62.) kod para horizontalnih pločica 6, ako je gornja pločica električki nabijena pozitivno (na viši potencijal prema donjoj) između pločica stvoreno električko polje vertikalnoga smjera otklonilo katodne zrake prema gore (tako da idu na pr. prema M umjesto prema O), dok bi kod protivnoga polariteta pločica odklon bio prema dolje. Vertikalno pak položene pločice 5, između kojih nastaje električko polje horizontalnoga smjera, otklonile bi katodne zrake u horizontalnom smjeru, i to prema onoj između obje pločice 5 koja je električki pozitivna.

15. I evo baš ovi otkloni, kojima katodne zrake sa svojim praktički bez tromosti elektronima momentano slijede i vanredno brze promjene električkih polja, proizvedenih primjenjujući na parove pločica, kao što su 5 ili 6 u sl. 62., bilo direktno istraživane električke promjenljive napone, bilo napone na krajevima otpora protjecanih istraživanim promjenljivim strujama, prikladni su, baš kao i otkloni uzrokovani od magnetskih polja, proizvedenih s pomoću istraživanih električkih promjenljivih struja, direktno za oscilografske primjene katodnih cijevi.

Trebalo je samo još otklone katodnih zraka učiniti vidljivima, kako bi se krivulja istraživane veličine mogla motriti, te udesiti da se tok otklona može i fotografski fiksirati u obliku »katodnih oscilograma«.

Za ono prvo može se iskoristiti davno već poznato svojstvo katodnih zraka da izazivlju živahno svjetlucanje, kad na kraju svoga puta padnu na zastor (kao Z u sl. 62.) smješten unutar cijevi i prepariran prikladnim materijama, na pr. kalcijskim voframatom, cinčanim sulfidom itd. Nastaje u tomu slučaju mala svijetla mrlja na onomu mjestu, kamo katodne zrake udaraju na zastor. Kod mijenjanja istraživane električke ili magnetske veličine (napona, struje, magnetskoga polja itd.) konformno njenim promjenama variraju i otkloni katodnih zraka, pa se isto tako mijenja i mjesto svijetle mrlje na zastoru. Mrlja će se na pr. šetati gore-dolje kod primjene izmjeničnoga polja koje izvodi vertikalni odklon. Prema tomu se, motreći gibanja mrlje u brzo rotiranom poligonalnom sistemu zrcala, mogu direktno motriti krivulje toka istraživanih veličina. Čak se te krivulje mogu kod katodnih oscilografa motriti direktno na zastoru i bez

zrcala u rotaciji. Ako se na pr. par pločica 6 u sl. 62. upotrebi za vertikalne otklone mrlje, proizvedene od istraživane veličine, na drugi par pločica 5, umjesto da ostane neupotrebljen u kratkom spoju, može se primjeniti iz naročito kombinirane posebne aparature promjenljivi napon, tako variran da pod utjecajem njegovoga variranja svijetla mrlja mora na zastoru praviti takve horizontalne pomake da istodobni vertikalni pomaci mrlje zbog varijacija istraživane (oscilografirane) veličine, primijenjene na pločice 6, izidu na zastoru razvučeni u oscilografsku krivulju, direktno vidljivu na zastoru (t. zv. »vremenske osi« kod katodnih oscilografa).

Za fotografsko registriranje postoje uglavnom dvije mogućnosti. Može se naprosto, a tako se većinom i radi, zastor prikladnim fotografskim objektivom otlikati na fotografskom filmu ili papiru, pa da se gibanje mrlje, ako su vertikalna, registriraju razvučeno u oscilogram, dosta je ako se film ili papir jednoliko giblje u horizontalnom smjeru. A može se, umjesto da se giblje papir ili film, cijeli fotografski uređaj jednoliko rotirati. Kod upotrebe »vremenskih osi« dosta je pak naprosto fotografirati krivulju, kako se pojavi na zastoru.

Ne ima i jedan drugi način pravljenja katodnih oscilograma, koji se redovno primjenjuje samo kod ekstremno visokih brzina oscilografiranja. Kod toga se iskorišćuje činjenica da katodne zrake djeluju i direktno na fotografsku ploču ili film (u koju svrhu ove treba staviti u prostor unutar cijevi, koji se evakuira). Na mjestima kamo su padale katodne zrake ploča ili film pocrne nakon razvijanja običnim načinom.

16. Dakako, od ovih čisto principnih razlaganja o funkciji i mogućnostima primjena katodnih cijevi za oscilografske svrhe pa do praktičke realizacije savremene katodne oscilografije uz pomoć vanredno usavršenih katodno-oscilografskih naprava velik je razmak, koji je bilo moguće prebroditi samo postepenim razvojem. Evo samo još nekoliko detalja iz ovoga već specijalnoga područja¹⁾.

Rekli smo, da katode u katodnim cijevima moraju trajno izbacivati elektrone. Principno se katode osposobljuju za emitiranje elektrona na dva načina:

a) ugrijavanjem (usijavanjem) katode (električkom strujom iz posebnoga izvora, t. zv. »strujom grijanja«), analogno onomu, kako se postupa s nitima radio cijevi; u slučaju ovakovih usi-

¹⁾ Više o katodnim oscilografskim cijevima i katodnoj oscilografiji na našem jeziku vidi: Lončar, Iz teorije i prakse katodnih oscilografa, »Tehnički List«, Zagreb (1933), str. 177 do 182 i 235 do 240. U radnji, iz koje je i gore preuzeto nešto teksta, donesene su reprodukcije različitih katodnih »oscilograma«.

janih katoda može biti napon anode prema katodi i relativno malen, premda se, zbog što jače svjetline mrlje na zastoru, ne će upotrebiti naponi manji od nekoliko hiljada ili bar nekoliko stotina volta;

b) upotrebom *hladnih* katoda uz vanredno visoke anodne napone.

S ovoga se dakle gledišta katodne oscilografske cijevi mogu podijeliti u dvije kategorije, kategoriju onih s »usijanom« katodom i kategoriju onih s »hladnom« katodom. Tako na pr. cijev iz sl. 62. spada u prvu kategoriju: Katoda K ima oblik niti s 1 i 2 kao priključnim žicama za struju grijanja.

Nadalje je bio problem da se dobiju što sitnije i (kod danoga anodnoga napona) što svjetlije mrlje, iskorišćujući za stvaranje potrebnoga uskoga pramena katodnih zraka što više elektrona izašlih iz katode i koncentrirajući ih da padaju po mogućnosti oštro na što sitnije mjesto na zastoru, odnosno na fotografskoj ploči. U tu svrhu trebalo je prikladno utjecati na tok katodnih zraka električkim poljima s pomoću posebnih električki nabijenih elektroda (kakova je jedna na pr. i elektroda C s priključnim vodičem 3 na sl. 62.). A dadu se upotrebiti u takove svrhe i magnetska polja od prikladno (koncentrično s cijevi) smještenih svitaka protjecanih istosmjernom strujom. Razvila se upravo cijela naučna disciplina, »elektronska optika«, koja se bavi ovim utjecajima električkih i magnetskih polja na koncentraciju i tok katodnih zraka, analognima utjecajima običnih optičkih leća sabirača i rastresača na tok zraka svjetlosti u običnoj geometrijskoj optici). A mogu se, kod cijevi s manje potpunim vakuumom, za koncentraciju katodnih zraka upotrebiti i izvjesni učinci elektriziranih čestica od zaostataka plinova u katodnoj cijevi (t. zv. »van der Bijlov efekt«); takov bi se efekt upotrebio na pr. u cijevi iz sl. 62.

17. Različitim opisanim mjerama, koje se vanredno različito primjenjuju kod pojedinih konstrukcija katodnih oscilografa, uspjelo je doista konačno dobiti u katodnim oscilografima vanredno dobre i precizne naprave prikladne u različitim izvedbama za oscilografska istraživanja vrlo različitih pojava, od onih najjednostavnijih, pa do onih najtežih, s pojavima koji vanredno brzo teku i kod kojih obični petljasti oscilografi, a ni ostali mehanički i drugi (na pr. s tinjavim svijetlom) nisu više upotrebljivi zbog prevelike tromosti.

Ekstremno je modernim katodnim oscilografima (s hladnom katodom) uspjelo zabilježiti pojave kojih je trajanje bilo samo nekoliko milijardnina sekunde, te električke titraje (izmjenične struje) od mnogo milijuna ili čak desetaka milijuna Hz, a postignute brzine pisanja mrlje na filmu ili papiru već su dosegnule iznose oko stotine tisuća kilometara ili slično. Nije zato čudo da

je s pomoću katodne oscilografije uspjelo analizirati vanredno kratkotrajne pojave, na pr. pojave putujućih valova (Wanderwellen, surges) koji su se dotad dali samo teoretski ispitivati, kao što je modernim katodnim cijevima otvoreno i široko polje primjena u televiziji, gdje se također traže vanredno brza gibanja mrlje bez praktički zamjetljive tromosti.

DJ OSNOVNA MJERENJA ISTOSMJERNOM STRUJOM

I. MJERENJA OTPORA

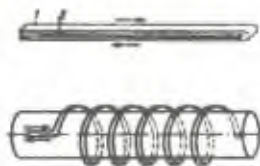
1. Većina metoda mjerenja otpora svodi se na to, da se otpor koji treba mjeriti usporedi s nekim otporom poznatoga iznosa ili s kombinacijom takovih otpora. Ovi poznati otpori, kojih je iznos u omima što preciznije ustanovljen usporedbom s normalnim otporima (sekundarnim normalima), kao što je onaj na sl. 63., ili s drugim otporima koji su bili uspoređeni s normalnima, zovu se *mjerni otpori* (Messwiderstände).

Kako mjerni otpori moraju udovoljavati izvjesnim zahtjevima obzirom na nepromjenljivost kroz mnogo godina, temperaturnu neovisnost i drugo, a uz to treba da budu i racionalno izvedeni, njihova gradnja je problem za sebe, naročito, kako ćemo kasnije vidjeti, ako treba da služe i kod mjerenja izmjeničnim strujama.

2. Za istosmjerne struje konstrukcija mjernih otpora može biti jednostavnija, pa je na pr. redovna praksa u pogledu načina namatanja da se upotrebi obično »bifilarno« (dvonitno) namatanje po shemama u sl. 64. (gornja je za male otpore, donja za veće), gdje se druga polovica namotaja vraća tijesno



Sl. 63.



Sl. 64.

priljubljeno uz prvu polovicu do ishodišnoga mjesta namatanja. Svrha je bifilarnoga namatanja da se dobiju mjerni otpori sa što manje samoinduktiviteta (površina gore u sl. 64. predložene uske petlje od metalne pruge 1 previ-

nute oko izolatora 2 je neznatna, a magnetski učinci obih polovica namotaja u sl. 64. dolje poništavaju se, jer struja kroz obje polovice teče u protivnom smislu), dok naprotiv nije paženo i na još neke momente kao što su »vlastiti kapacitet« namotaja, »kapacitet prema zemlji«, ovisnost veličine otpora o frekvenciji itd., koji mogu biti od utjecaja kod mjerenja izmje-

ničnim strujama, na pr. kod viših tonfrekvencija. Treba dakle razlikovati mjerne otpore prikladne uglavnom za mjerenja istosmjernom strujom (i ona jednostavnija s izmjeničnim strujama, osobito kod niskih tehničkih frekvencija, na pr. kod 50 Hz), kakovi će nas na ovom mjestu zanimati, od onih specijalno namatanih, da mogu služiti za precizna mjerenja sve do gornjih granica tonfrekventnoga područja izmjeničnih struja, zbog čega će o njima biti govora kod mostova izmjenične struje. Kao dalja grupa pridosti bi još otpori za visokofrekventna (radiofrekventna) mjerenja, kojih konstrukcija treba da odgovara još težim zahtjevima kakovi dolaze u visokofrekventnom području

3. Zahtjevima stalnosti, malene ovisnosti o temperaturi itd., gotovo idealno odgovara i zato se redovno upotrebljava kao materijal za mjerne otpore slitina *manganin* (84% bakra, 4% nikalja, 12% mangana), uvedena oko god. 1885. po Westonu i kasnije usavršena na današnji sastav. Od nje se, po A.-S., prave čak i sekundarni normalni, »normalni otpori«.

Manganin se, osim prilično velikim specifičkim otporom $\rho = 0,42 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ (što je zato povoljno, jer se onda uz opterećenje danom strujom određeni broj oma daje realizirati s relativno malenom duljinom žice), odlikuje naročito vrlo neznatnim temperaturnim koeficijentom $\alpha = 0,00001$ ili slično¹⁾ i vrlo neznatnim termosilama prema bakru (kod razlika temperature od 1 st. C. između oba spojišta kruga od bakra i manganina ne javlja se nego samo koji »mikrovolt« termo-elektromotorne sile). Zbog neznatnoga temperaturnoga koeficijenta manganina otpor adjustiran kod 20° C zadržava praktički istu vrijednost kod drugih sobnih temperatura ili kod umjerenih ugrijavanja Jouleovom toplinom kod opterećenja strujom mjerenja, a zbog neznatnih termo-elektromotornih sila prema bakru kod mjerenja istosmjernom strujom ne dolaze praktički do izražaja parazitne termo-elektromotorne sile koje bi inače, nastavši kod različitih temperatura spojišta priključenih bakrenih vodiča na mjerne otpore, smetale izobličujući rezultate mjerenja.

Ipak se i s manganinom postizavaju samo onda doista pouzdani i vremenski stalni mjerni otpori ako se, nakon što je otpor namotan, manganin podvrgne procesu umjetnoga »starenja«, t. j. stabiliziranju na stalnu vrijednost na pr. držanjem kroz 24 sata na temperaturi od 140° C; zatim ako se otpor montira bez vlage; te ako se u pogonu striktno pazi da se manganinski otpori ne podvrgavaju preopterećenju strujama višima od maksimalno dopuštenih, jer prejake struje mogu manganin

¹⁾ Kod bakra ρ iznosi samo 0,0175, a to je vrijednost vrlo nepovoljna za realiziranje otpora, dok α iznosi 0,0039, dakle mnogo puta više nego kod manganina, pa bi otpori od bakra bili vrlo neprikladni za mjerenja.

toliko ugrijati i time u strukturi promijeniti, da mjerni otpor prestane biti upotrebljiv za precizna mjerenja.

I slitina »konstantan« (60% bakra, 40% nikalja) ima dovoljno visok specifički otpor (0,49) uz vanredno nizak temperaturni koeficijent otpora, kakov se i traži za mjerne otpore, ali kod nje za mjerenja istosmjernom strujom smetaju termo-elektromotorne sile prema bakru, mnogo puta veće nego kod manganina.

U najnovije vrijeme preporučuju za osobito precizne mjerne otpore zlatne slitine sa nešto preko 2% kroma, koje imaju izvjesnih prednosti i pred samim manganinom¹⁾.

4. U praksi otpori za mjerenja redovno dolaze u obliku »otpornika za mjerenja«, t. j. u kombinacijama od više mjernih otpora, od kojih je svaki pojedini adjustiran na iznos cijeloga oma ili na dekadski mnogokratnik, odnosno dekadski dio oma (ili na okrugli broj takovih iznosa).

Ovakovim se otpornicima mogu onda, kombinirajući na različite načine pojedinačne otpore, realizirati vrlo različiti iznosi oma, već prema potrebama mjerenja. Mjernih reostata ima a) s čepovima, b) s ručkama.

Kod reostata s čepovima pojedini su elementi (otpори) reostata ukopčani kod izvađenoga čepa, a iskopčani kod stavljenoga čepa (jer ih čep »premosti«, t. j. kratko spoji). Otpori reostata s čepovima kombiniraju se u serijski spoj slično kao utezi kod vaganja. Kad bi na pr. bio dan reostat po shemi u sl. 65. sa 24 otpora s omskim iznosima:

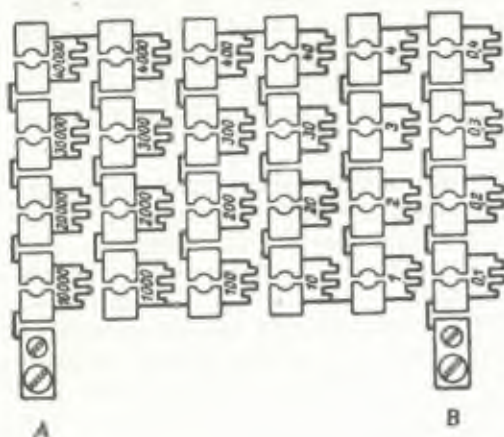
0,1	0,2	0,3	0,4
1	2	3	4
10	20	30	40
100	200	300	400
1000	2000	3000	4000
10000	20000	30000	40000

moguće bi bilo njime realizirati sve otpore od 0,1 Ω pa do 111111,0 Ω u skokovima od samo 0,1 Ω , t. j. svega 1111110 različitih iznosa otpora! Da se na pr. udesi 55458,6 Ω , trebalo bi izvaditi čepove koji odgovaraju *kurzivom* štampanim iznosima oma.

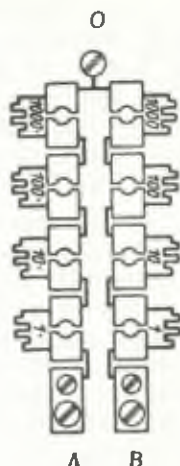
Mnogo se upotrebljavaju naročite izvedbe reostata s čepovima s dvije grupe dekadskih jedinica pod imenom t. zv. »razdjelnih otpora« (Verzweigungswiderstände, ratio boxes) po shemi kao u sl. 66. s krajnjim stezaljkama A i B te srednjom O. Ovakovim reostatima lako se proizvedu na pr. kod mjerenja u Wheatstoneovu mostu dvije različite grane kojih omski iznosi stoje u određenim dekadskim omjerima 1 : 1, 10 : 1, 1 : 10, 100 : 1, 1 : 100, i t. d.

¹⁾ Vidi na pr. ATM 49, Z 931—4.

Kod *reostata s ručkama s dekadama* (grupama od obično po 10 jednakih otpora po 0,1 om, po 1 om, po 10 oma itd. udešava se svaka dekada posebnom ručkom po shemi u sl. 67.



Sl. 65.



Sl. 66.

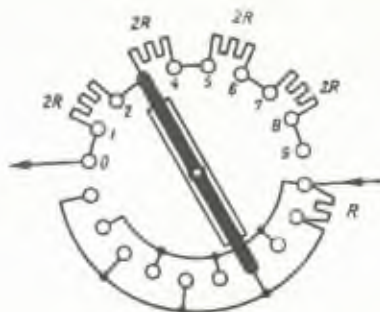
Tako se također mogu udešavati po volji odabrani omski iznosi u razmacima jedinica najniže dekada, i to brže nego kod reostata s čepovima. Ako na pr. stoji na raspolaganju kutija s ugrađene četiri dekada:

$$10 \times (100 + 10 + 1 + 0,1) \Omega$$

(ili ako se u seriju spoje četiri pojedinačne dekada od 10×100 , 10×10 , 10×1 i $10 \times 0,1 \Omega$ ugrađene u zasebne kutije), treba,



Sl. 67.



Sl. 68.

da se dobije na pr. otpor $238,6 \Omega$, staviti ručku prve dekada na 2, ručku druge na 3, treće na 8 i četvrte na 6, pa će doista izići otpor $2 \times 100 + 3 \times 10 + 8 \times 1 + 6 \times 0,1 = 238,6 \Omega$

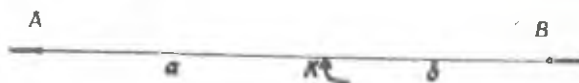
Reostati s ručkama su, kako se vidi, nešto udobniji kod upotrebe od onih s čepovima, ali traže i relativno veći broj pojedinačnih otpora, pa su i skuplji.

Ima i *štednih spojeva* (S&H), s kojima se na pr. $9 \times R$ oma dađe reostatom s ručkom realizirati, umjesto sa devet otpora po R oma, sa samo 4 otpora po $2R$ oma i još jednim otporom od R oma. Pripadni »štedni spoj« prikazan je u sl. 68., iz koje se lako vidi, kako je ovakovom kombinacijom postignuto da se okretanjem ručke od kontakta do kontakta dobivaju redom otpori R , $2R$, $3R$, ..., $9R$.

5. Naročiti oblik promjenljivoga otpora, odnosno otpora s odvojkom kakov se mnogo upotrebljava kod mjerenja u mostovima i sl., jest t. zv. »klizna žica«, na pr. od manganina. Ona treba da je po mogućnosti svagdje jednako debela i od jednoličnoga materijala (»kalibrirana«) žica. Po toj žici sklize po shemi u sl. 69. s dobrim kontaktom metalna oštrica ili metalni kotačić (»klizni kontakt«) K , koji već prema svome položaju prema kliznoj žici ovu dijeli u dva dijela kojih su otpori kod kalibrirane žice očito proporcionalni odnosnim duljinama a i b , dijelovima ukupne duljine $a+b$ klizne žice.

U praksi se katkad, zbog uštede na prostoru, klizne žice za veći broj oma namotaju helikoidalno (u ponešto razmaknutim zavojima) na valjak ovećega promjera, koji se kod mjerenja okreće, tako da klizni kontakt redom dotiče različita mjesta žice na valjku.

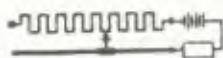
Osobita vrst kliznih otpornika jesu t. zv. gusjeničasti klizni otpori. Klizna žica namotana je u neznatno razmaknutim posve malim zavojima na (obično fleksibli) nosilac od izolatora i klizni kontakt skače kod klizanja po ovako namotanom otporu gusjeničastom otporu od zavoja na zavoj. Udešavanje otpora moguće je tako doduše samo u skokovima, no kod velikoga broja gusto namotanih zavoja to je dovoljno kod mjerenja kod kojih se ne traži krajnja preciznost.



Sl. 69.

6. Osim otpornika za mjerenja postoje (i upotrebljavaju se također kod mjerenja) i otpornici (otpori) za *reguliranje* struje ili napona, odnosno za balastne svrhe. Oni su često također s ručkama, samo što su u tomu slučaju mnogo manje precizno adjustirani. No još se više upotrebljavaju za reguliranje *klizni otpornici*, »jednostruki« (kao oni u sl. 70. i 71.) i »dvostruki« (kao oni u sl. 72. do 74. s jednakim otporima ili oni u sl. 75.

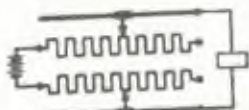
i 76. s jednim otporom od više oma za »grubo« i jednim od manje oma za »fino« reguliranje).



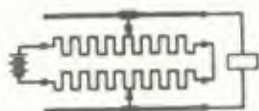
Sl. 70.



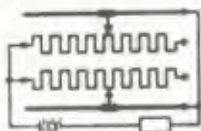
Sl. 71.



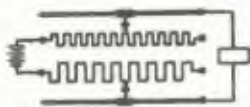
Sl. 72.



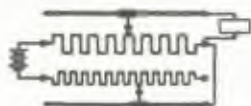
Sl. 73.



Sl. 74.



Sl. 75.



Sl. 76.

Klizni reostati mogu se upotrebljavati priključeni između izvora struje i potrošača na vrlo različite načine: jednostruki u spoju po sl. 70. »u seriji« s izvorom struje (baterijom naznačenom poznatim simbolom) i potrošačem (aparatom, simbolički naznačenim pravokutnikom) ili po shemi spajanja u sl. 71. kao »djelitelj napona«, a dvostruki po još više shema spajanja, od kojih sl. 72. do 76. predložuju nekoliko primjera.

7. Opišimo sad redom pojedine metode mjerenja otpora. Klasična metoda, praktički uvedena još od prvih decenija telegrafije, jest mjerenje *Wheatstoneovim mostom*. Bitni princip *Wheatstoneova* mosta jest da se u obje grane jednoga strujnoga razdvajanja potraže mjesta kojima odgovaraju isti električki potencijali, dakle između kojih nema nikakova napona. Ako se takova dva mjesta »premoste« vodičem koji sadrži osjetljivi galvanometar, ne će tim vodičem (mostom) teći nikakova struja, jer između njegovih krajeva nema električkoga napona (razlike potencijala). Galvanometar u tomu slučaju ne pokazuje nikakove struje: »most« je u ravnotežju.

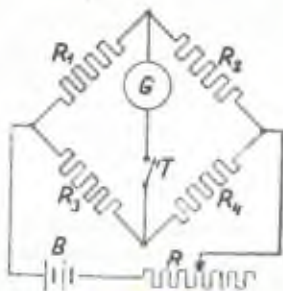
Prema shemi u sl. 77. radi se zapravo o »čelverokutu« otpora R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , u čiju jednu »diagonalu« dolazi izvor struje (baterija B s otporom za reguliranje R_0), a u drugu kao nul-instrumentat galvanometar G s tipkom T. Ravnotežje se mosta može postići samo ako su gubici napona u otporima R_1 i R_3 , a po tomu i oni u otporima R_2 i R_4 međusobno jednaki, a to vodi, kako se odmah razabire, na relaciju između četiri otpora:

$$R_1 : R_2 = R_3 : R_4 \text{ (ili: } R_1 R_4 = R_2 R_3 \text{)}$$

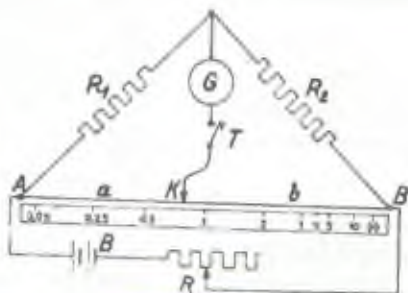
Interesantno je da se dolazi na isti uvjet ravnotežja ako se zamijene uloge izvora struje i galvanometarske grane; glavno

je da je izvor u ma kojoj od diagonalna četverokuta, a galvanometar u drugoj.

8. U praksi je redovno $R_1 = R_x$ »nepoznati« (mjereni) otpor a $R_2 = R$ *precizioni mjerni otpornik*, s čepovima ili dekadski s ručkama, koji se daje s potrebnom preciznošću udešavati da



Sl. 77.



Sl. 78

po iznosu oma postane R_x u omjeru prema R jednako omjeru otpora R_3 prema R_4 , u kome slučaju galvanometar G kod pritisnute tipke T pokazuje ravnotežje zbog ispunjene relacije:

$$R_x = R \cdot R_3 / R_4$$

Kako se vidi, treba zapravo da je točno poznata samo omska vrijednost otpora $R = R_2$, dok otpori R_3 i R_4 ne moraju biti direktno poznati, nego samo njihov omjer $R_3 : R_4$. Iz razloga jednostavnosti najbolje je ako se za omjer $R_3 : R_4$ odaberu dekadski iznosi, na pr. 1 : 1, 1 : 10, 100 : 1 itd., a za realizaciju takovih kombinacija otpora R_3 i R_4 mogu dobro poslužiti »razdijelni otpornici« s čepovima, spomenuti u D-4.

Praktički je međutim u većini slučajeva dovoljno točno, ako se Wheatstoneov most upotrebljava u nešto jednostavnijem obliku: s kliznom žicom. Po shemi u sl. 78. udešava se tu omjer otpora $R_3 : R_4$ i to omjerom duljina $a : b$ klizne žice (pomičući klizni kontakt K), dok se otporu R daje prikladna fiksna vrijednost (obično se alternativno može ukopčati koja od dekadskih jedinica: 0,1; 1; 10; 100 ili 1000 Ω). Kod ovoga jednostavnoga »Wheatstoneova mosta s kliznom žicom«, s pomicanjem kontakta K dok galvanometar G ne pokaže da je ravnotežje postignuto, uvjet ravnotežja (zbog $R_3 : R_4 = a : b$ glasi naprosto:

$$R_x = R \cdot a / b,$$

pa ako se omjeri $a : b$ napišu već gotovi izračunani, kao na sl. 78., uz pripadna mjesta klizne žice, izlazi vrijednost R_x mjerenoga otpora bez naročitoga računanja iz očitanaoga omjera $a : b$ i ukopčanaoga dekadskoga iznosa otpora R .

Teorijska razmatranja o Wheatstoneovu mostu pokazuju da je za što veću točnost mjerenja važno pripaziti da se za R odabere iznos što bliži iznosu mjerenoga otpora R_x , tako da klizni kontakt u sl. 78. kod mosta u ravnotežju padne po mogućnosti oko sredine klizne žice, gdje male nesigurnosti u određivanju točnoga položaja ravnotežja razmjerno manje utječu na rezultat. Za osjetljivost mjerenja s Wheatstoneovim mostom od važnosti je da je galvanometar dovoljno osjetljiv (kod najosjetljivijih mjerenja upotrebljava se galvanometar sa zrcalom, inače s kazalom) i, uz danu osjetljivost galvanometra, da je galvanometrov otpor prilagođen kombinacionom otporu mosta.

Točnosti koje se u najpovoljnijim prilikama mogu postići mostovima s mjernim reostatom i kutijom razdjelnih otpora vrlo su visoke, tako da su dobiveni iznosi sigurni na nekoliko pro mille od mjerene vrijednosti. No i sa Wheatstoneovim mostovima s kliznim žicama dadu se još postići rezultati pouzdani recimo do 0,3% ili slično. Sve to vrijedi za mjerenja otpora ne previsokih i ne preniskih.

Ima danas već gotovih Wheatstoneovih mostova s ugrađenim galvanometrom, poznatim otporima, kliznom žicom, tipkom itd., tako da samo treba na označene stezaljke priključiti bateriju, odn. nepoznati otpor, pa se može odmah mjeriti. Neki od ovakovih priručnih mostova imaju na oba kraja dijela AB mosta na sl. 78. prikladne fiksne otpore kao AA' i BB' na sl. 79., a klizna žica $A'B'$ čini samo sredinu dijela mosta AB, na kojoj su mjerenja najtočnija. Ako se sad isporođuju s nekim poznatim otporom R

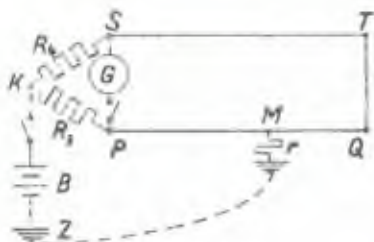


Sl. 79.

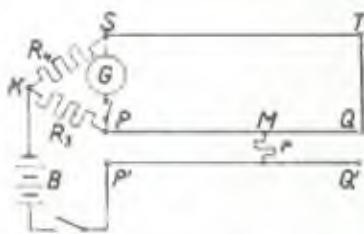
samo otpori za malo % različiti od R , može se klizna žica direktno snabdjeti umjesto skalom vrijednosti $a:b$ skalom procentnih odstupanja mjerene veličine R_x od poznate R (t. zv. »procentni mostovi«, uvedeni u praksu u novije vrijeme i vrlo prikladni za kontroliranja iznosa otpora u masama.)

9. Važna je primjena Wheatstoneova mosta *određivanje mjesta pogreške* (Fehlortsbestimmung, fault localization) kod kabela. Treba li odrediti duljinu $x = PM$ dalekoga mjesta M , gdje je po sl. 80. došlo do spoja kabela sa zemljom, ili po sl. 81. do kratkoga spoja između dva kabela vodiča koji teku jedan do drugoga, kombinira se defektni kabel poznate duljine $l = PQ$ u jednu »petlju« $PMQTS$ s jednim već raspoloživim ili privremeno povučenim »pomoćnim vodom« (zdravim kabelom, odnosno kabelskim vodičem, ili prikladnim uzdušnim vodom), koji, uz isti presjek i isti materijal vodiča i početak i svršetak na istom mjestu kao i kod istraživanoga pokvarenoga kabela, neka ima općenito duljinu $l_1 = ST$. Da se načini petlja, svršeci Q i T kabela s pogreškom i pomoćnoga voda spoje se spojem QT zanemariva otpora u kratki spoj. Ako se sad na oba po-

četka P i S istraživanoga kabla i pomoćnoga voda, dakle na krajeve spomenutim kratkim spajanjem stvorene petlje, koja se može zamisliti sastavljena od dva dijela, PM (s otporom R_1) i MQTS (s otporom R_2), priključi po shemama u sl. 80. i 81. kombinacija otpora R_3 i R_4 , kojih se omjer $R_3 : R_4$ može udešavati, nastaje četverokut otpora R_1 , R_2 , R_3 i R_4 , karakterističan za Wheatstoneov most. Dodadu li se, zajedno s potrebnim tipkama, kao »diagonale« tomu »četverokutu« u jednu ruku galvanometar G (priključen između P i S), a u drugu ruku baterija B (koja je kod spoja u sl. 80. priključena negativnim polom na mjesto sastajanja K otpora R_1 i R_4 , a pozitivnim¹⁾ na zemlju Z, dakle posredstvom zemlje i na mjesto pogriješke M, dok se u spoju po sl. 81. B stavlja između K i početka P' drugoga od oba kabela u kratkom spoju, most je potpun i može se mijenjanjem omjera



Sl. 80.



Sl. 81

otpora $R_3 : R_4$ adjustirati na ravnotežje (nulu odklona galvanometra). U tomu slučaju, budući da je uz suponirani jednaki presjek i materijal vodiča istraživanoga kabla i pomoćnoga voda i uz zanemareni otpor komadića QT očito $R_3 : R_4$ jednako omjeru duljina x i $(l-x)+l_1$ dijelova petlje PM i MQTS, vrijedi relacija:

$$x : (l + l_1 - x) = R_3 : R_4,$$

iz koje se jednostavnim računom dobiva tražena udaljenost x po formuli:

$$x = R_3 \cdot (l + l_1) / (R_3 + R_4) \quad (I)$$

Ako pomoćni vod zbog drugoga presjeka ili drugoga materijala nema isti otpor po m (ili km) duljine kao istraživani kabel, onda u formulu (I) treba kao l_1 staviti t. zv. »reduciranu« (pre-računanu) duljinu pomoćnoga voda koja se iz faktične duljine l_1 lako izračuna. Na pr. ako su oba vodiča od bakra (isti materijal), pa pomoćni ima presjek $q^* \text{ mm}^2$, dok kabelski vodič ima $q \text{ mm}^2$, onda je očito: $l_1 = l_1 \cdot q / q^*$.

Kombinacija otpora $R_3 + R_4$ može se praktički realizirati i kliznom žicom po shemi u sl. 69. s varijabilnim (kliznim) kon-

¹⁾ Kao kod mjerenja izolacije; vidi pod D-32.

taktom K. U tomu se slučaju umjesto $R_3 : R_4$ može staviti $a : b$, pa račun umjesto na formulu (I) vodi na ovaj izraz za udaljenost x :

$$x = a(l + l_1)/(a + b) \quad (I')$$

Često će pomoćni vod teći istim putem i moći će se uzeti jednake duljine kao i istraživani kabel. U tomu slučaju može se specijalnije pisati: $l_1 = l$ i formula (I) poprima onda jednostavniji oblik:

$$x = 2lR_3/(R_3 + R_4)$$

Opisanom metodom (po Murrayu) mogu se odrediti mjesta defekata samo kod »dozemnoga spoja« ili »kratkoga spoja« niskonaponskih kabela što nastaju u pogonu, dok se na pr. »prekidik« traže drukčije (polazeći od činjenice, da su kapaciteti pojedinih odlomaka kabela proporcionalni duljinama tih odlomaka, pa se mjerenje svodi na određivanje kapaciteta, na pr. s pomoću balističkoga galvanometra; v. kasnije). No i za dozemne i kratke spojeve postoje još druge metode: može se na pr. raditi po »metodi pada napona« (D-14.) ili po modificiranim mosnim metodama, kakove su na pr. ona po Varleyu i druge¹⁾.

Područje mjerenja na kabelima nije dakako ograničeno samo na određivanje »pogriješaka« već položenih kabela, nego obuhvata vrlo mnogobrojna ispitivanja, osobito kod visokonaponskih kabela, o čemu će djelomično još biti prilika da se govori.

10. Wheatstoneovim mostom najbolje se mjere otpori ni ekstremno veliki, ni ekstremno maleni. Kod otpora počevši recimo 100 000 Ω pa na više Wheatstoneov most postaje već slabo osjetljiv, pa se vrlo visoki otpori zgodnije mjere drugim metodama, o kojima će doskora biti govora. No i kod posvema malenih otpora, počevši recimo od 0,1 oma na niže, Wheatstoneov most postaje postepeno također sve više neprikladan, jer smetaju t. zv. »prelazni otpori« na priključcima preko kojih je mjereni maleni otpor R_x spojen u most. Ti prelazni otpori, kojima nije moguće posvema izbjeći a pribrajaju se u Wheatstoneovu mostu mjerenom otporu i bivaju mjereni zajedno s njime, variraju naime s veličinom i čistoćom kontaktne plohe priključnoga mjesta, s pritiskom itd., pa ako to i jesu kod dobro izvedenih priključnih mjesta samo neznatni dijelovi oma koji se mogu zanemariti prema iole većim otporima R_x , to ipak prelazni otpori zajedno s eventualnim spojnim žicama od R_x do aparature mosta (potrebnima, ako je mjereni otpor takov, ili na takovom mjestu, da se ne da priključiti direktno svojim krajevima na most) čine mjerenja Wheatstoneovim mostom tim više nepouzdanima, čim je sama vrijednost otpora R_x neznatnija. Zato se i za vanredno malene otpore upotrebljavaju drugi načini

¹⁾ Poblže o kabelskim mjerenjima uopće vidi na pr. u Golding. Electrical measurements, II. izdanje, London (1935), pogl. XII. (i XI.); te u Skirl. Elektr. Messungen, III. izdanje, Berlin (1936), pogl. N) i O).

mjerenja, poimence metoda Thomsonova dvostrukog mosta i E-I metoda, od kojih na prvu odmah prelazimo.

11. Kod *Thomsonova (Kelvinova) dvostrukoga mosta* eliminirane su poteškoće zbog prelaznih otpora i dovodnih žica. U shemi na sl. 82. nepoznati otpor R_x neka je otpor dijela AB recimo jedne probe debele bakrene žice, kojoj treba odrediti specifički otpor ρ (odnosno vodljivost κ) da bi se ustanovilo da li upotrebljeni bakar odgovara po kvaliteti zahtjevima na »bakar za vodove«. Dio AB neka otsijecaju na istraživanoj žici čvrsto pritegnute metalne oštrice, kojih je razmak točno poznat i fiksiran (u slučaju mjerenja vodljivosti na probama od žica, užeta ili pruga obično se uzme $AB = 1$ metar). Oštrice su naime fiksno montirane, zajedno sa škripcima s priključnim stezaljkama A' i B' preko kojih se istraživana žica kod A_1 i B_1 ukopča u glavni tok struje mosta, na posebnu podlogu od izolatora (dasku). Otpor R između C i D neka je točno poznati mjerni otpor s kojim se R_x ima usporediti, a P_1, P_2, Q_1, Q_2 neka su fiksni otpori priključeni kao u slici na odvojke A i B, te C i D, i na galvanometar G. Ako se sada pošalje preko komutatora (obrtčača struje) K kliznim reostatom R_n regulirana struja baterije B u Thomsonov most, kome su stezaljke (ulazna i izlazna) A' i D' , pa ako su omjeri otpora P_1 i Q_1 te P_2 i Q_2 adjustirani na isti iznos n (dakle: $P_1 : Q_1 = P_2 : Q_2 = n$, onda se po poznatim zakonima razgranjivanja električkih struja dađe pokazati (v. D-14.) da će galvanometar G priključen tipkom T pokazivati *nulu* struje ako je omjer $R_x : R$ također jednak n , kao što su i omjeri $P_1 : Q_1$ i $P_2 : Q_2$, t. j. u slučaju ravnotežja mosta bit će:

$$R_x = n R,$$

pa ako se znadu vrijednosti R i n , lako je R_x izračunati.

12. Kod jedne kategorije konstrukcija Thomsonova dvostrukog mosta omjeri $P_1 : Q_1 = n$ i $P_2 : Q_2 = n$ udeše se fiksno (nepromjenljivo) i to obično na koju dekadsku jedinicu, recimo na $n = 0,1$ ili $0,01$ ili slično (obično se čak uzme $P_1 = P_2$ i $Q_1 = Q_2$, pa onda samo po sebi izlazi $P_1 : Q_1 = P_2 : Q_2 = n$), a R se udešava klizanjem kontakta D (sl. 82.) na kliznoj žici $C'D'$, kojoj je otpor za različite duljine, računajući od čvrstoga spoja C, točno poznat i naznačen uz žicu.

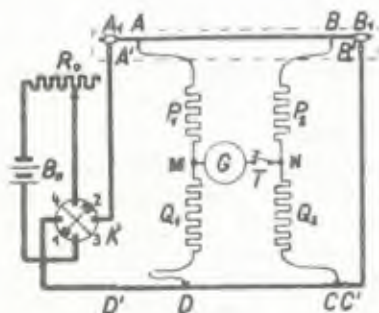
Primjer: Bakrena žica prereza 36 mm^2 daje kod 20° C uz $AB = 1 \text{ m}$ u Thomsonovu mostu sa $P_1 = P_2 = 10 \text{ oma}$ i $Q_1 = Q_2 = 100 \text{ oma}$ ravnotežje kod otpora R udešenoga na vrijednost $0,00492 \text{ oma}$. Iz $n = 10 : 100 = 0,1$ i $R = 0,00492 \text{ oma}$ izlazi:

$$R_x = n \cdot R = 0,1 \cdot 0,00492 = 0,000492 \Omega$$

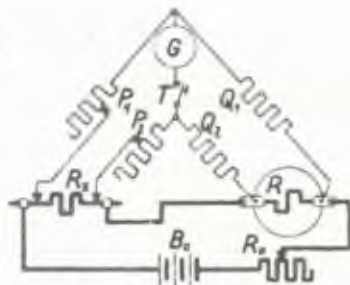
Kako je kraj $R = \rho \cdot l / q$ u promatranom slučaju $l = 1$, to izlazi za specifički otpor istraživanoga bakra: $\rho = R \cdot q = 0,000492 \times 36$

$= 0,0177$. Ova vrijednost udovoljava propisima VDE 0201/1932 za »bakar za vodove«, koji kod hladno vučenih žica s promjerom iznad 1 mm dopuštaju vrijednosti za ρ do $0,01786 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$. Vodljivost ispitivanoga bakra bila bi $\alpha = 1/\rho = 1/0,0177 = 56,5$.

13. Kod druge grupe izvedbi Thomsonova mosta R je naprotiv fiksni precizioni otpor, eventualno čak »normalni« otpor (i D onda nije varijabilni kontakt), ali se zato mijenja omjer n i s t o d o b n o na oba para otpora P_1 i Q_1 , te P_2 i Q_2 , i to mijenjajući P_1 i P_2 , odnosno Q_1 i Q_2 , uvijek istodobno tako da relacija $P_1 : P_2 = Q_1 : Q_2 = n$ ostane trajno ispunjena, a samo se n mijenja dok most ne pokaže ravnotežje. Čisto shematski ovo je naznačeno na sl. 83. Relacija $R_x = n \cdot R$ ostaje dakako u važnosti i kod ovih modernijih i preciznijih Thomsonovih mostova.



Sl. 82.



Sl. 83.

Mostovi prve kategorije (s kliznom žicom za R) jednostavniji su, ali imaju nedostatak da se kod nepouzdanoga kliznog kontakta D smanjuje sigurnost i pouzdanost mjerenja, a može stradati i osjetljivi galvanometar G . Otpor spoja kod D pribraja se naime otporu Q_1 .

Spoj D međutim smeta samo ako je loš, odnosno nesiguran; ako je dobar njegovoga se utjecaja ne treba bojati, kao ni utjecaja prelaznih otpora spojeva kod A , B i C , a slično ni utjecaja dovodnih žica do P_1 , P_2 , Q_1 i Q_2 (ako nisu dugačke, ni tanke) kraj obično prilično velikih iznosa od više oma koji se daju otporima P_1 , P_2 , Q_1 i Q_2 .

Komutator K (sl. 82.) predviđen je zato da se mjerenje zbog eliminiranja utjecaja eventualnih termo-elektromotornih sila u mostu obavi za kontrolu i s obrnutom strujom u mostu (u kome se slučaju ručka komutatora K zakrene tako da oba pera za kratki spoj kvadranta komutatora dodu iz položaja 1 i 2 u položaje 3 i 4. Dobiju li se kod mjerenja strujama jednoga i drugoga smjera neznatno različiti iznosi, uzme se kao rezultat aritmetička sredina dobivenih vrijednosti.

14. Evo još nekih detalja iz teorije Thomsonova dvostrukoga mosta. Kad je most po shemi u sl. 82. u ravnotežju, nema struje kroz (tipkom T ukopčani) galvanometar G, što znači da su potencijali točaka M i N jednaki. Zbog pomanjkanja struje kroz G očitno kroz P_1 i Q_1 teče ista struja I_1 , a isto tako kroz P_2 i Q_2 teče ista struja I_2 . I struje kroz R_x i R u tomu slučaju očitno imaju isti iznos I ; naprotiv kroz otpor S dijela mosta $BB_1B'C'C$ teče, zbog odvojka BP_2Q_1C , za I_2 manja struja nego I , dakle struja $I - I_2$. Da bi potencijali u M i u N bili jednaki, moraju gubici napona u dijelovima mosta AP_1M i ABP_2N biti međusobno jednaki, a slično moraju opet međusobno biti jednaki i gubici napona u dijelovima MQ_1D i NQ_2CD . Matematski izraženo (po formuli: gubitak napona = struja $\times$ otpor) to vodi na relacije:

$$I_1 \cdot P_1 = I \cdot R_x + I_2 \cdot P_2 \quad (a)$$

$$I_1 \cdot Q_1 = I \cdot R + I_2 \cdot Q_2 \quad (b)$$

Ali i gubitak napona u otporu S mora biti isti kao u (otporu S paralelnoj) grani BP_2Q_2C , a to daje još relaciju:

$$(I - I_2) \cdot S = I_2 \cdot (P_2 + Q_2) \quad (c)$$

Lako je vidjeti da je relacijama (a) i (b) udovoljeno uvjetom: $R_x = n \cdot R$, uz supoziciju da je doista potpuno točno ispunjen dvostruki uvjet: $P_1 : Q_1 = P_2 : Q_2 = n$. Jer ako se u (a) mjesto P_1 piše $n \cdot Q_1$, a P_2 zamijeni sa $n \cdot Q_2$, te ako se ispod tako preuđesene jednadžbe (a) napiše n puta pomnožena jednadžba (b), izlaze dvije relacije potpuno identične u svim članovima, osim što na mjestu veličine R_x u prvoj stoji veličina $n \cdot R$ u drugoj; t. j. dolazi se na uvjet $R_x = nR$, kako smo i tvrdili.

Međutim to je samo jedna od mogućnosti da uvjetu ravnotežja Thomsonova mosta bude udovoljeno. Sponira li se, naprotiv, da omjeri otpora $P_1 : Q_1 = n_1$ i $P_2 : Q_2 = n_2$ nisu adjustirani točno na isti iznos $n_1 = n_2 = n$, nego da postoji razlika između n_1 i n_2 (takove se diferencije u praksi moraju očekivati, jer se mjerni otpori dadu adjustirati uvijek samo s izvjesnom tolerancijom, a utječu i dovodi i prelazni otpori koji se pribrajaju pripadnim otporima P_1, Q_1, P_2, Q_2), onda uvjet ravnotežja Thomsonova dvostrukoga mosta postaje mnogo kompliciraniji. Da do njega dođemo, izračunajmo iz relacije (c) veličinu I i dobivenu vrijednost stavimo u relacije (a) i (b), a zatim podijelimo jednadžbe što iziđu. Nakon dijeljenja ostat će samo relacija, koja više ne sadržava nikakvih struja, nego glasi:

$$\frac{P_1}{Q_1} = \frac{R_x + \frac{P_2 \cdot S}{P_2 + Q_2 + S}}{R + \frac{Q_2 \cdot S}{P_2 + Q_2 + S}}$$

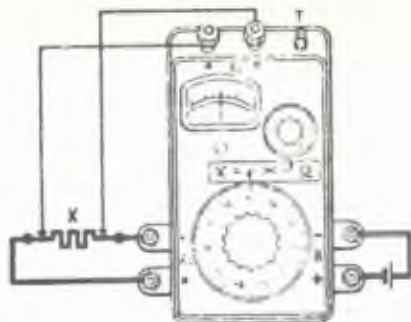
Pomnoživši recipročno ovu jednadžbu, dijeleći sa Q_1 i proširujući još faktorom Q_2 stegnuti razlomak s nazivnikom:

$$P_2 + Q_2 + S$$

dolazi se, nakon lakih transformacija, na ovaj mnogo općenitiji uvjet ravnotežja Thomsonova mosta

$$R_x = R \cdot \frac{P_1}{Q_1} + \frac{Q_2 S}{P_2 + Q_2 + S} \left(\frac{P_1}{Q_1} - \frac{P_2}{Q_2} \right) \quad (I)$$

iz kojega se razabire, da je i kod ne posve na isti iznos adjustiranih omjera otpora $P_1 : Q_1$ i $P_2 : Q_2$ moguće još točno mjeriti Thomsonovim mostom, ako je samo bar otpor S vanredno malen, jer on dolazi u uvjetu (I) kao faktor u produktu desno iza glavnoga člana $R \cdot P_1/Q_1$, pa ako zbog malih razlika između $P_1 : Q_1$ i $P_2 : Q_2$ izraz u zagradi i nije jednak nuli, cijeli produkt ipak iščezava kad S iščezava. Odatle se vidi, zašto je toliko važno da S bude doista vanredno maleno.



Sl. 84.

Naročitih poteškoća u praksi, da se S drži vanredno maleno, nema, jer je lako postići da svi dijelovi od kojih se sastoji S (zajedno s prelaznim otporima kod B, B' i C') budu skoro zanemarljivoga otpora, ako se, dakako, pripazi da spojni vodič B'C' bude što deblji i kraći. Kad bi bilo moguće trajno podržavati relaciju $P_1 : Q_1 = P_2 : Q_2 = n$ s potpunom točnošću, uvjet ravnotežja (I) bi, naravno, prešao u jednostavni oblik $R_x = R \cdot P_1/Q_1 = R \cdot n$ i bez obzira na veličinu otpora S .

Kako se daleko može ići Thomsonovim mostom prema niskim iznosima oma, neka pokaže ovaj primjer. Neka se u spoju po sl. 82. maksimalno (kod kontakta D posve nalijevo) može udesiti $R = 0,01$ oma. Najmanji pak dio toga otpora, što se daje još očitati kod pomicanja kontakta D u smjeru prema C, neka je 1% maksimalnoga iznosa otpora R . Otpori $P_1 = P_2$ neka su predloženi svaki s jednim otpornikom s čepovima, koji se dadu udesiti po volji na 10 ili 100 oma. Slično otpori $Q_1 = Q_2$ neka su realizirani otpornicima koji se dadu udesiti na 10, 100 ili 1000 oma. Najveća

vrijednost otpora R_x , koja se ovakvom aparaturom može još mjeriti, odgovara omjeru $P_1 : Q_1 = P_2 : Q_2 = 100 : 10 = 10$, a to, kombinirano sa najvećim iznosom za R , daje:

$$R_x = 10 \cdot 0,01 = 0,1 \Omega$$

Udesimo li, naprotiv, najnižu vrijednost

$$n = P_1 : Q_1 = P_2 : Q_2 = 10 : 1000 = 0,01$$

i najnižu vrijednost R , koja se još daje očitati, t. j. 1% od 0,01, dakle 0,0001 oma, izlazi kao najmanji R_x , što se još daje mjeriti:

$$R_x = 0,01 \cdot 0,0001 = 0,000001 \Omega$$

Opisani dakle most može mjeriti otpore od jedne desetine do 1 milijuntine oma!

I kod Thomsonovih mostova ima pored najpreciznijih laboratorijskih izvedbi, koje rade s najosjetljivijim galvanometrima, malih vrlo praktičnih konstrukcija s već ugrađenim svim dijelovima mosta, zajedno s galvanometrom. Primjer jedne ovakove izvedbe i njezine upotrebe skiciran je na sl. 84.

15. Druga metoda prikladna za mjerenja i najneznatnijih otpora, t. zv. *E-I-metoda (metoda ampermetra i voltmetra)* za mjerenja otpora, nije nipošto ograničena samo na takova mjerenja, nego se njome mogu jednako dobro (uz prikladne instrumente) mjeriti i srednji otpori, kao i oni viši, sve do najviših. Metoda se osniva direktno na Ohmovu zakonu: mjeri se voltmetrom napon E na krajevima otpora R_x , protjecanoga strujom I , koja se mjeri ampermetrom; nepoznati otpor R_x slijedi onda iz mjerenih vrijednosti E i I po formuli:

$$R_x = E/I \quad (I)$$

Kod mjerenja može se postupati po shemi u sl. 85. Struja iz izvora B , regulirana na željeni iznos otporom R , mjeri se ampermetrom A , dok se na voltmetru V očita pad napona na mjerenom otporu R_x . Međutim, ako ampermetar pokaže iznos I , a voltmetar E , strogo uzevši smjelo bi se pisati $R = E/I$ samo onda, kad bi voltmetar bio neizmjernoga otpora, recimo elektrostatski, pa ne bi uzimao nikakove struje. Inače relacija $R_x = E/I$ daje premalen iznos za R_x , jer kroz voltmetar konačnoga otpora R_V teče također neka struja $I_V = E/R_V$ koju ampermetar u spoju po sl. 85 izmjeri zajedno sa strujom kroz R_x . Zapravo dakle struja kroz R_x nije I , nego $I - I_V$. Treba dakle na očitanoj vrijednosti I izvesti korekturu za iznos I_V i točni izraz za R_x kod mjerenja po shemi u sl. 85. bio bi:

$$R_x = E/(I - I_V) = E/(I - E/R_V) \quad (II)$$

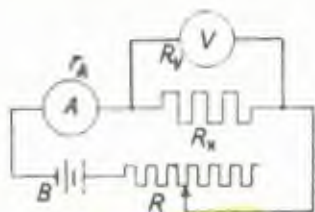
Kod nešto drukčijeg spoja po shemi po sl. 86. voltmetar se priključuje paralelno serijskoj kombinaciji mjerenoga otpora i ampermetra. Time se doduše postizava, da je struja ampermetra I ujedno i struja kroz R_x , ali sad opet voltmetar mjeri napon E , koji je veći od napona na krajevima otpora R_x za iznos

gubitka napona u ampermetru, t. j. za iznos $I r_A$, gdje je r_A otpor ampermetra. Jednostavna formula $R_x = E/I$ daje u ovakvim slučajevima prevelike iznose za R_x . Osim kad otpor ampermetra iščezava prema R_x , potrebno je dakle uvesti korekciju iznosa E i računati po formuli:

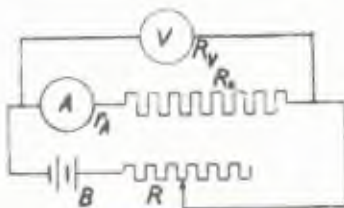
$$R_x = (E - I r_A) / I \quad (\text{III})$$

A može se naprosto i r_A odbiti od iznosa E/I .

16. Koja će se od obih shema spajanja (u sl. 85. i sl. 86.) upotrebiti u praksi i da li će se upotrebiti točne formule (II), odn. (III), ili jednostavna formula (I), ovisi o konkretnom slučaju i o zahtijevanoj točnosti mjerenja. Općenito se može reći,



Sl. 85.



Sl. 86.

da se redovno nastoji upotrebiti ona shema, kod koje korekcije po mogućnosti iščezavaju, pa se može upotrebiti jednostavna formula $R_x = E/I$. A to vodi kod malenih otpora na spoj po sl. 85., a kod velikih na spoj po sl. 86., (jer voltmetri sa svojih redovno vrlo mnogo oma troše samo neznatne struje, dok je kod ampermetara obrnuto tendencija, da im otpor bude što neznatniji). Kod postupanja po opisanom načinu redovno su onda korekcije ispod tolerancija upotrebljenih instrumenata i mogu se doista zanemariti.

Kod osrednjih otpora nastoji se raditi po onoj od obje sheme u sl. 85. i 86., koja daje više zanemarivu pogriješku, tako da se može upotrebiti jednostavna formula (I). A ako se već mora raditi s korekcijama, upotrebljava se radije shema iz sl. 85., kojoj odgovara formula (II), jer su otpori voltmetara redovno naznačeni na instrumentima, dakle poznati, dok otpori ampermetara obično nisu dani (i uz to su još ovisni o temperaturi).

Kako doista kod mjerenja vrlo malenih otpora po shemi u sl. 85. nije vrijedno uzimati korekcije, vidi se iz ovoga primjera. Neka se mjeri otpor R_x komada AB (na pr. bakrene) žice iz sl. 82., ali ovaj puta E - I -metodom. Spoj će biti kao u sl. 87., pa ako

ampermetar i milivoltmetar pokazuju $I = 4.00$ A, odnosno $E = 0.0160$ V, jednostavna formula (I) daje:

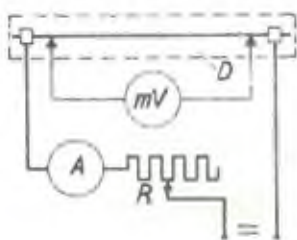
$$R_x = 0.0160/4.00 = 0.00400 \Omega.$$

Kad bi se računalo po točnoj formuli (II), trebalo bi od struje 4.00 A oduzeti struju milivoltmetra, koja u praksi već kod samo 40Ω otpora milivoltmetra ne bi bila veća od

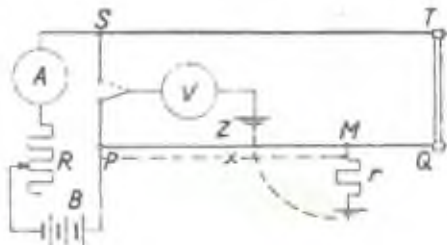
$$0.016/40 = 0.0004 \text{ A.}$$

a to je samo 0.01% od iznosa 4 A i iščezava potpuno prema tolerancijama ampermetra i milivoltmetra.

Slično se lako uvjeriti, da se i kod mjerenja velikih otpora može raditi po formuli (I), jer korekcije praktički kod upotrebe spoja iz sl. 85. ne dolaze u obzir. I kod osrednjih otpora većinom se uz savremene voltmetre s malenim vlastitim potroškom struje i ampermetre neznatnoga otpora može izići bez korekcija, osim kod iznimno nepovoljnih prilika i najpreciznijih mjerenja.



Sl. 87.



Sl. 88.

17. *E-I*-metoda mjerenja otpora ima, osim što je prikladna za otpore svih iznosa od najviših do najnižih, još i tu prednost, da dopušta mjerenja kod opterećenja mjerenih otpora povoljnim strujama, na pr. onima koje odgovaraju normalnim pogonskim prilikama, pa dobiveni iznosi otpora odgovaraju kod vodiča, kojih je otpor, na pr. zbog ugrijavanja topline od struje, strujno, odnosno naponski ovisan, kao što je to slučaj naročito kod sijalica koje u pogonski usjanom stanju imaju posve drugi otpor nego u hladnom (one s metalnom niti imaju, vruće, nekoliko puta viši otpor, a one s ugljenom niti znatno niži). Mjerenje ovakvih ovisnih otpora metodama koje ne omogućuju udešavanje unapred određenih struja, na pr. u Wheatstoneovu mostu gdje sijalica ostane neusjana, bilo bi dakako od malene praktičke vrijednosti, i tu je *E-I*-metoda pogotovo na mjestu. S druge strane primjena *E-I*-metode uvjetovana je time, da stoje na raspolaganju točno baždareni instrumenti, ampermetri i voltmetri, i to vrlo raznolikih opsega mjerenja kod mjerenja vrlo raznolikih iznosa otpora.

18. Teče li ista struja redom kroz više otpora, iznosi tih otpora bit će proporcionalni naponima na krajevima tih otpora,

koji se mogu mjeriti voltmetrom (s potroškom struje neznatnim prema struji glavnoga toka). Ako su ti otpori sastavljeni još od vodiča istoga materijala i presjeka, proporcionalne mjerenim naponima bit će duljine vodiča u pojedinim otporima. Ovo se primjenjuje kod već spomenute (D-9.) metode određivanja mjesta dozemnoga spoja po »metodi pada napona«.

Praktički se može postupati na više načina. Na pr. priključi se baterija B s otporom za reguliranje R i kontrolnim ampermetrom A po sl. 88. na krajeve P i S petlje PMQTS sastavljene (kao i u sl. 80.) kratkim spajanjem dalekih krajeva defektnoga kabla PQ (s dozemnim spojem u M) i pomoćnoga voda ST. Tako kroz cijeli kabel teče ista jaka struja, pa ako se voltmetar V, koji je jednom stezaljkom priključen na zemlju Z, a po tomu i na mjesto pogriješke M, spoji drugom stezaljkom najprije na P, a zatim na S, izmjereni padovi napona E i E_1 dijelova PM i MQTS petlje bit će proporcionalni duljinama x i $l_1 + l - x$ tih dijelova, razumijevanima u istom smislu kao i u D-9., pa se x može lako izračunati po formuli:

$$x = E(l + l_1)/(E + E_1)$$

Kod voltmetara koji nemaju nulu u sredini skale ne bi se moglo raditi s jednostavnom preklopkom, kakova je uzeta u sl. 88., nego bi kod svakoga od oba mjerenja trebalo priključiti voltmetar drugom stezaljkom na Z, da otkloni instrumenta budu u istom smislu. Otpor voltmetra V mora biti po mogućnosti visok, i to: a) da struja voltmetra bude vrlo malena prema struji kroz petlju i b) da prelazni često znatno raznoliki otpor r dozemnoga spoja, koji se kod mjerenja po shemi u sl. 88. pribraja otporu voltmetra, po mogućnosti nema praktičkog utjecaja na otklone voltmetra.

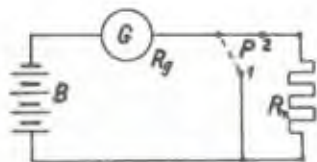
Može se mjeriti i tako, da otpor r uopće nije u voltmetarskoj grani. U tu svrhu ostaje V kod mjerenja obih napona E i E_1 priključeno između P i S, a baterija B (zajedno sa R i A) priključi se +polom na Z (a po tom i na M), a negativnim najprije na P, a iza toga na S. Kod prvog priključka strujni krug baterije jest BZMPARB i voltmetar je u grani PVSTQM paralelnom dijelu petlje PM, pa mjeri (uz zanemariv otpor dijela petlje STQM prema vrlo visokom otporu voltmetra) napon E ; kod drugoga priključka V mjeri analogno E_1 . Kod izmjerenih iznosa E i E_1 udaljenost x izračuna se kao gore.

19. Zanimljiva i mnogo upotrebljavana kod vrlo visokih otpora (no upotrebljiva i sve do prilično niskih otpora s instrumentima manjega otpora i za manje napone) jest *metoda mjerenja otpora om-metrom*. Prednost je ove metode, da se mjerenja mogu obavljati, kao i netom opisana (D-18.), s nebaždarenim instrumentima, na pr. s voltmetrom, kome je osjetljivost s vremenom popustila i uopće s galvanometrom, ako su samo otkloni instrumenta proporcionalni strujama kroz instrument, odnosno proporcionalni naponima na njegovim stezaljkama.

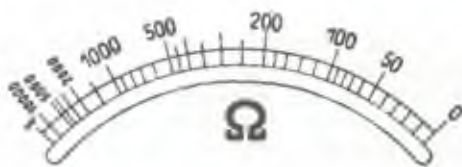
Otpor R_x instrumenta (obično mnogo hiljada oma) mora biti poznat. Po shemi u sl. 89. instrument G najprije se stavlja-
njem na 1 preklopke P priključi direktno na izvor struje B,
čiji se unutarnji otpor može zanemariti prema R_g . Pri tomu
instrument pokaže napon E ili otklon α proporcionalan tomu
naponu. Zatim se P okrene na 2, tako da su na B priključeni
u seriji nepoznati otpor R_x i otpor instrumenta R_g . Kako se sad
dio napona, što ga daje B, troši na svladavanje otpora R_x , to
na stezaljkama instrumenta G djeluje samo ostatak E_1 napona,
pa instrument pokaže taj manji napon E_1 , odnosno korespon-
dentni manji otklon α_1 . Vrlo je lako sada razabrati, da se R_x
može računati po formuli:

$$R_x = R_g(E/E_1 - 1) = R_g(\alpha/\alpha_1 - 1) \quad (I)$$

Evo zašto. Označimo sa I_1 struju kod preklopke okrenute na
2. Onda je očito: $E = E_1 + I_1 R_x$. No s druge strane je $I_1 = E_1/R_g$,
tako da izraz za E prelazi u $E = E_1 + E_1 R_x/R_g$. Odatle odmah
izlazi (I).



Sl. 89.



Sl. 90.

20. Područje otpora, koje se udobno daje obuhvatiti poje-
dinim instrumentima upotrebljavanima »om-metarski«, ovisi o
iznosu R_g i visini upotrebljenoga mjernoga napona E . Čim više
jedno i drugo, tim viši se otpori dadu metodom udobno doseg-
nuti. Na pr. kod instrumenta za $E = 220$ V sa $R_g = 100\,000\ \Omega$,
ako se uzme da se na njemu daje još dobro očitavati otklon
 $E_1 = 4$ V, pripadni otpor bio bi

$$R_x = 100000 \times (220/4 - 1) = 5,4 \times 10^6\ \Omega,$$

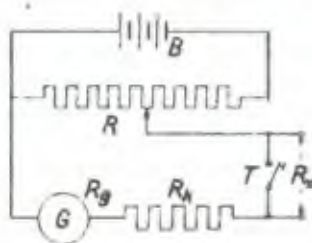
t. j. dali bi se još dobro mjeriti otpori čak do iznad 5 megoma.
Naprotiv kod instrumenta za 3 V sa $R_g = 300\ \Omega$ već vrijednost
 $10000\ \Omega$ pala bi kod neznatnoga otklona E_1 u blizini od 0,1 V.

Kod upotrebe izvora struje stalno istoga napona E kod svih
mjerenja s istim instrumentom mogu se, da ne treba svaki puta
iznos R_x računati po formuli (I), nanijeti odmah na skalu instru-
menta već izračunani iznosi u Ω (odnosno $M\Omega$). Svaki omski
iznos dolazi na ono mjesto u skali od 0 do E volta upotreblje-
noga instrumenta, koje odgovara vrijednosti E_1 , što je instru-
ment pokaže kod priključenoga mjerenog otpora, i iznosu R_g
otpota instrumenta. Svaki se voltmetar tako može snabdjeti

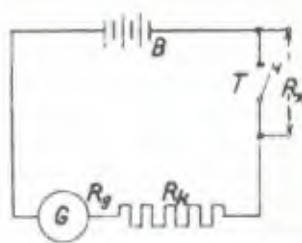
skalom za upotrebu po formuli (I), koja međutim vrijedi samo uz upotrebu onoga napona E , koji je pretpostavljan kod izračunavanja skale. Omska skala je nejednolika; ona teče obrnutim smjerom od skale volta postajući sve više i više stisnuta: počinje s iznosom $\theta \Omega$ kod mjesta, kojemu na skali volta odgovara iznos E i konvergira prema graničnom iznosu ∞ kod mjesta nule otklona instrumenta, i to tako da su najviši iznosi Ω ili $M\Omega$ smješteni sve više stisnuto blizu granice ∞ , pa se previše veliki otpori već teško očitavaju. Kod instrumenata, koji treba da služe samo za mjerenja po formuli (I), može se dakako skala volta ispustiti i nanijeti samo omska skala, kakova je ona na sl. 90.

21. Kako se vidi, za mjerenja po formuli (I) potrebno je, da je instrument s pripadnom omskom skalom kombiniran s korrespondentnim izvorom struje. Ovakove kombinacije zovu se »ommetri«, odnosno, ako su za mjerenja vanredno visokih otpora, »megommetri«. Kod megommetara potrebni visoki naponi od obično više stotina volta izvode se posebnim napravama, na pr. malim strojevima, tjeranima rukom i ugrađenima u isto kućište s mjernim instrumentom, kako ćemo to još поближе vidjeti u poglavlju o mjerenjima izolacije, kod kojih se megommetri najviše upotrebljavaju. Naprotiv kod *ommetara*, o kojima ćemo ovdje iznijeti neke detalje, dovoljni su kraj relativno niskih područja omskih iznosa, za koje su ovakovi aparati predviđeni, već baterije od neznatnog broja malih suhih elemenata, koje se smjeste na određenom mjestu u aparatu, i izmijene kad se istroše. Konstruktivni problem kod *ommetara* jest dvojak. U jednu ruku se vrlo često ni ne iskorišćuje prvi jako rastegnuti dio omske skale s najmanjim iznosima oma, nego se gleda da se ostatak skale sve do što viših iznosa oma raširi po raspoloživom području otklona instrumenta. U tu svrhu instrumentu se daje takova osjetljivost, da on pokaže puni otklon već kod ukopčanoga nekoga odabranoga otpora R_k , a onda se mogu mjeriti svi otpori počevši od R_k prema gore. U takovom, međutim, slučaju priključak cijeloga mjernoga napona E direktno na instrument ne dolazi praktički u obzir, jer bi kod takovoga napona otklon instrumenta pao daleko izvan opsega skale. Umjesto toga kontrola, da li kod opisanih *ommetara* izvor struje daje baš predviđeni mjerni napon E , vrši se time da se naročitom tipkom montiranom u aparat, ukopča već spomenuti poznati *kontrolni otpor*, također ugrađen u aparat, pa ako sad *ommetar* pokaže na skali baš onaj broj oma (ili onu markaciju na skali) koliko odgovara iznosu kontrolnoga otpora, onda izvor struje daje onaj mjerni napon E , koji je (uz veličinu R_k) služio kod izradivanja omske skale.

S druge strane trebalo je konstrukciju ommetara tako izvesti, da skala ommetra ostane u važnosti unatoč ponešto različitim napona, što ih daju baterije slabeći tokom dulje upotrebe. Dva su puta kod toga moguća, i to: a) spoj ommetra izvede se tako da se, po principu »dijeljenja napona« iz sl. 71., od varijabilnoga cijeloga napona baterije B po shemi u sl. 91. uvijek odvoji, adjustiranjem kliznoga kontakta K na potrební položaj, isti iznos napona E za upotrebu u ommetru (u koju se svrhu K dotle pomiče, dok kod pritisnute tipke T instrument ne pokazuje otklon skale, koji odgovara vrijednosti (ili markaciji) na skali, što odgovara ukopčanom kontrolnom otporu R_k); b) upotrebi se po shemi u sl. 92. kao napon E ommetra cijeli napon, kako ga baterija B baš daje (bez obzira na to, da li je on nešto viši ili niži), ali se iznos E i skala ommetra usklade mijenjajući kontinuirano osjetljivost instrumenta, sve dok se i opet pritiskom na tipku T ne dobije otklon određen ukopčanim iznosom kontrolnoga otpora R_k . Samo adjustiranje osjetljivosti vrši se uz pomoć t. zv. »magnetskoga shunta« (odvojika za magnetske



Sl. 91.



Sl. 92.

linije). To je komadić mekoga željeza, prikladno pomično montiran tik uz polne nastavke permanentnoga magneta instrumenta s pomičnim svitkom, što ga sadržava ommetarski aparat. Već prema položaju toga mekoga željeza prema permanentnom magnetu ono navodi na sebe veći ili manji dio od magneta proizvedenih magnetskih linija (magnetskoga toka), te time više ili manje slabi gustoću magnetskih linija (odnosno jakost magnetskoga polja) u uzdušnoj pukotini instrumenta, a to mijenja osjetljivost instrumenta.

Ovakovi »magnetski shuntovi« upotrebljavaju se za adjustiranje osjetljivosti instrumenata s pomičnim svitkom i permanentnim magnetom i kod balističkih galvanometara, te drugdje.

22. Komplikacija od promjenljivih napona izvora struje nestaje, ako se umjesto opisanih ommetara s običnim instrumentima s pomičnim svitkom upotrebe po B-44. ommetri s *unakrsnim svicima i permanentnim magnetom*, na pr. u spoju kao na sl. 35. i 36. Po izvodima u B-44. upotrebljeni instrumenti

daju naime otklone određene kvocijentom struja I_1 i I_2 kroz oba unakrsna svitka, a kako su ove u promatranomu spoju, uz pretpostavku ovećih otpora R_1 i R_2 prema kojima se mnogo puta manji otpori samih unakrsnih svitaka mogu zanemariti, obrnuto proporcionalne iznosima R_1 i R_2 , jer su obje paralelne grane sa R_1 i R_2 priključene na isti napon napon stezaljki baterije B (sl. 35.), to je zapravo otklon instrumenta određen kvocijentom R_2/R_1 , i to neovisno o veličini napona baterije. Ako se sad još uzme kao R_1 neki stalni otpor, trajno ugrađen u ommetar s unakrsnim svicima, a kao R_2 se priključi mjereni otpor R_x , varirat će otkloni instrumenta u zadnjoj liniji samo u ovisnosti o iznosima R_x i na skali instrumenta moći će se direktno nanijeti vrijednosti R_x , koje će instrument pokazivati neovisno o varijacijama napona izvora struje (baterije) ommetra.

Međutim upotrebljeni napon ne smije pasti toliko, da se počne gubiti sigurnost namještanja sistema unakrsnih svitaka u određeni položaj. Osim toga, ako treba da iziđu uvijek isti otkloni kod raznih napona, mora dakako sam mjereni otpor zadržavati stalan iznos kod različitih napona (što nije slučaj baš kod svih otpora, jer na pr. neki visoki otpori, realizirani izvjesnim materijama, poimence t. zv. silitni, predstavljaju manje iznose oma kod viših napona).

Za manje otpore R_x , prema kojima se otpori unakrsnih svitaka ne bi mogli zanemariti, upotrebljavaju se drugi spojevi u vezi sa sistemima unakrsnih svitaka. Može se na pr. upotrebiti mjerni sistem, kome je jedan svitak S_1 izveden za jače struje s malo zavoja deblje žice, a drugi S_2 za slabije struje s mnogo zavoja tanje žice. S_1 se priključi u tok cijele struje I , a S_2 (s danim serijskim otporom X poput onoga iz voltmetarskoga spoja u sl. 14.) na napon E na krajevima mjerenoga otpora. Dakle analogno kako se priključuju po sl. 85. ampermetar A , odnosno voltmetar V kod mjerenja manjih otpora po $E-I$ -metodi. Instrument s unakrsnim svicima daje onda otklon određen kvocijentom E/I , a taj je otklon, po razmatranjima u D-15., praktički identičan s mjerenim iznosom R_x , tako da se na skalu mogu nanijeti direktno iznosi R_x .

A može se, kod naročito malenih otpora R_x , struja pustiti redom kroz mjereni otpor R_x i neki stalni maleni otpor R , pa ako se svici S_1 i S_2 instrumenta s unakrsnim svicima priključe na napone što vladaju na krajevima otpora R_x , odnosno R , nastale struje u S_1 i S_2 bit će proporcionalne sa R_x i R , pa će otkloni instrumenta biti određeni kvocijentima R_x/R , dakle kod stalnoga R u zadnjoj liniji samo iznosima R_x , koji se na instrumentu mogu odmah i naznačiti.

23. Zanimljivo je *mjerenje otpora metodom gubitka naboja*, dobro upotrebljivo kod vanredno visokih otpora, osobito kod onih ekstremno visokih, koji se više ne dadu (ili ne dadu dobro) mjeriti ni onima od već opisanih metoda ($E-I$ -metoda,

megommetri), koje su inače prikladne za mjerenja vanredno visokih otpora.

Metoda iskorišćuje pojav opadanja napona kondenzatora, koji se izbija kroz neki određeni otpor. Napon kondenzatora mora se mjeriti elektrostatskim voltmetrom, odnosno elektrometrom, s po mogućnosti što savršenijom izolacijom. Nabijeni kondenzator gubi svoj električki naboj brzinom koja, osim o naponu kondenzatora u promatranom času, ovisi još o kapacitetu kondenzatora i o veličini otpora, kroz koji se kondenzator izbija, i to tako da se kondenzator danoga kapaciteta C uz dani napon U izbija tim sporije, čim je veći otpor R_x kojim je on premosten, dok uz stalno R_x struja izbijanja kondenzatora postaje tokom izbijanja sve slabija i slabija, tako da je krivulja, koja prikazuje napon U kondenzatora u ovisnosti od vremena t najstrmija u početku i postajući sve manje strma teži (približava se) »asimptotski« nul-liniji; pri tom procesu polaganije napreduje, čim je veći kapacitet C izbijanoga kondenzatora.

Sve ove činjenice postaju razumljive uz malo razmišljanja. A poblizim matematskim razmatranjem dolazi se i na kvantitativni zakon po kome se zbiva izbijanje kondenzatora kroz otpor. Izlazi rezultat: ako su U_1 i U_2 (u voltima) dvije vrijednosti napona kondenzatora koje odgovaraju momentima t_1 i t_2 , između kojih je protekao razmak vremena $t = t_2 - t_1$ sekunda, onda umnožak CR_x kapaciteta kondenzatora (u faradima) i otpora (u omima), kroz koji se ovaj izbija, mora biti jednak kvocijentu vremenskoga razmaka t i razlike »prirodnih« logaritama ($\ln$) ovih napona, t. j. vrijedi relacija:

$$CR_x = t / (\ln U_1 - \ln U_2) \quad (I)$$

koja se može i »drukčije pisati¹⁾:

$$CR_x = t / (\ln U_1 / U_2) = 0,434 \cdot t / (\log U_1 / U_2)$$

Kod mjerenja prema sl. 93. sastoji se C od kapaciteta C' kondenzatora koji se izbija i kapaciteta C'' paralelno priključenoga elektrometra (elektrostatskog voltmetra), koji mjeri napon kondenzatora: $C = C' + C''$; no često se iznos C'' (obično samo nekoliko pikofarada) može zanemariti kao neznatan prema C , pa se može pisati: $C = C'$. Svakako C mora kod mjerenja otpora ovom metodom biti poznato (ili se prije odredi kojom od metoda za mjerenja kapaciteta, na koje ćemo kasnije doći). Ako se sad uz zatvorenu sklopku P na sl. 93. kondenzator kapaciteta C nabije na napon baterije U , onda će, čim se P otvori, početi zbog izbijanja kondenzatora kroz otpor R_x opadanje napona U ,

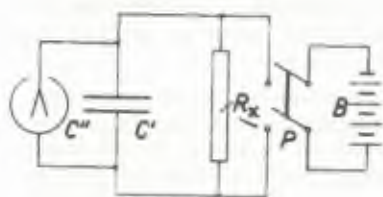
¹⁾ Kako je poznato, prirodni logaritmi ($\ln$) vezani su s običnim dekadskim logaritmima ($\log$) relacijom: $\ln x = \log x / 0,434$, a diferencija logaritama dviju veličina jednaka je logaritmu kvocijenta tih veličina.

pokazanoga elektrostatskom spravom, prema nuli. Očitaju li se u prikladnom razmaku vremena t , mjerenom na pr. stop-ujem dvije vrijednosti U_1 i U_2 , koje odgovaraju momentima t_1 i t_2 , može se iz dobivenih vrijednosti odmah izračunati R_x po formuli (I).

Primjer: Kondenzator kapaciteta $C = 6000 \text{ pF} = 0,006 \cdot 10^{-6} \text{ F}$ pokazivao je kod izbijanja u nekom momentu napon 250 V, a jednu minutu (60 s) kasnije napon 200 V. za otpor, kroz koji se kondenzator izbijao, izlazi iznos:

$$R_x = 60 / (0,006 \cdot 10^{-6} \cdot \ln 1,25) = 44\,800 \cdot 10^6 \, \Omega = 44800 \text{ M}\Omega$$

24. U gornjim razmatranjima uzeto je da je otpor, što ga sam dielektrikum kondenzatora suprotstavlja prolazu istosmjerne struje, dakle t. zv. *izolacioni otpor* kondenzatora i prema mjerenoj vanredno visokom otporu R_x ogroman. Ako su mjereni otpor R_x i izolacioni otpor kondenzatora po veličini istoga reda mora se uzeti u obzir, da dio izbijanja ide i preko ovoga posljednjega. Sama vrijednost izolacionoga otpora kondenzatora može se odrediti također metodom gubitka naboja, ako se iz sheme u sl. 93. ispusti R_x pa se kondenzator ostavi da se izbija kroz svoj vlastiti dielektrikum, kojemu se otpor R'' onda izračuna po formuli (I). Ovom se metodom



Sl. 93.

moju određivati i izolacioni otpori proba pojedinih kabela. Dobiveni iznosi reduciraju se na jedinicu duljine kabela na temelju lako razumljive činjenice, da dvostruko itd. duljini kabela odgovara dvostruki, trostruki itd. kapacitet, no polovica, trećina itd. izolacionoga otpora.

Redovno se kondenzatori umjesto iznosom R'' karakteriziraju produktom CR'' , koji se izračuna po formuli (I). To je zato, jer kod iste kvalitete dielektrikuma kondenzatori većega kapaciteta imaju površinu razmjerno veću ili razmak obloga razmjerno manji, pa prema tomu kod n -strukoga kapaciteta mora R'' biti n puta manje i obrnuto, a sam produkt CR'' ostaje stalan. Obično se produkt CR'' , t. zv. »vremenska konstanta kondenzatora«, izražava ne u »farad-omima« nego u »mikrofarad-megomima« (što je praktički prikladnije, a daje isti broj kao i farad-omi, jer jedan faktor postaje milijun puta veći, a drugi milijun puta manji). Na pr. odlični kondenzatori s tinjcem kao dielektrikumom mogu lako imati $CR'' = 30000 \, \mu\text{F} \cdot \text{M}\Omega$ ili slično.

Prema teoriji uz čvrstu vrijednost R'' ne bi smjelo na rezultat utjecati vrijeme t . No kako izolacioni otpori uopće nemaju fiksnu vrijednost, nego ovise o naponu itd., to se prilike mjerenja obično točnije propišu; na pr. vremenski razmak, u kome se očitavaju U_1 i U_2 , se fiksira (uzme se 1 minutu ili 6 minuta itd.).

Iznos R'' otpora, koji kondenzator suprotstavlja prolazu istosmjernje struje, kako se dobiva metodom gubitka naboja, ne treba zamijeniti s (redovno kudikamo manjim) iznosom oma R_0 čistoga radnoga otpora, koji se, kod kondenzatora s realnim, ne potpuno savršenim izolatorom, može zamisliti paralelno ukopčan nekom »idealnom« ili »savršenom« kondenzatoru kao reprezentant svih »gubitaka« (a ne samo onih zbog vodljivosti izolatora) kod prolaza izmjenične struje kroz kondenzator. O tomu »otporu gubitaka«, i uopće o gubicima u kondenzatorima kod izmjenične struje, bit će govora kasnije kod mjerenja s mostovima izmjenične struje.

Otpori koji se opisanom elektrostatskom metodom gubitka naboja mogu još mjeriti sežu čak do trilijun (10^{18}) oma ili slično, dok bi na pr. E - I -metodom uz upotrebu napona $E = 1000$ V i galvanometra sa zrcalom koji još dopušta mjerenje struje $I = 10^{-9}$ A granica otpora, koji bi se dali mjeriti, bila samo $E/I = 10^3/10^{-9} = 10^{12}$ (bilijun) oma.

25. Metodom gubitka naboja mogu se mjeriti, puštajući kondenzator da se izbija kroz poznati otpor, i druge veličine, koje dolaze u formuli (I). Moguće je na pr. po shemi u sl. 93. određivati *kapacitete* kondenzatora mjereći omjer napona U_1/U_2 kod izbijanja mjerenoga kapaciteta kroz poznati otpor. A također može opisana metoda služiti i za mjerenja *vremenskih razmaka*, osobito vrlo kratkih (na pr. vremena t , potrebnoga da tane iz puške prevali neki maleni komadić puta s , iz čega se onda može izračunati brzina taneta $v = s/t$).

Kod određivanja brzine taneta postupa se ovako: uz dani kapacitet odabere se tako malen otpor izbijanja, da izbijanje kondenzatora ide vanredno brzo, i udesi se da tane na svome putu uzduhom prekine najprije spoj kondenzatora s izvorom struje, a zatim na daljem mjestu svoje staze i spoj kondenzatora s otporom, tako da bude obustavljeno izbijanje kroz otpor. Iz očitanih na elektrostatskom voltmetru vrijednosti U_1 i U_2 prije i poslije pokusa može se, uz poznate iznose kapaciteta kondenzatora i otpora izbijanja, izračunati po formuli (I) vremenski razmak t , a poznavajući daljinu s , koju je tane prevalilo, od mjesta gdje je načinilo prvi prekid do mjesta drugoga prekida, dolazi se odmah i na iznos v .

26. Osim glavnih dosad opisanih postupaka ima za mjerenja otpora i drugih više specijalnih metoda, koje međutim ne ćemo opširnije tretirati. Kao primjer navedimo »metodu supstitucije«, kod koje se u strujni krug s izvorom stalne struje i prikladnim instrumentom za njezino mjerenje (te, po potrebi, otporom za reguliranje) uključuju naizmjenice s pomoću preklopke nepoznati otpor R_x i mjerni reostat, pa se iznos ovoga posljednjega dotle udešava, dok se ne postigne da instrument pokazuje posve istu struju, bio ukopčan nepoznati otpor ili reostat, u kojem slučaju je dakako nepoznati otpor jednak otporu udešenomu na reostatu. Zanimljiva je još (danas malo upotrebljavana) metoda

s »diferencijalnim galvanometrom«, t. j. galvanometrom (obično s pomičnim magnetom, odnosno magnetskom iglom), s dva posvema jednako vrijedna (ekvivalentna) svitka. Ako se ista struja pusti redom kroz nepoznati otpor R_x i kroz mjerni reostat, kome se iznos oma R daje po volji udesiti i očitati, pa ako se na napone na krajevima otpora R_x i R priključe u paralelni tok jedan, odnosno drugi svitak diferencijalnoga galvanometra, i to tako da struje kroz oba svitka izvede protivne momente vrtnje na pomični sistem galvanometra, onda će kod nule galvanometra biti $R = R_x$. Za precizna mjerenja otpora važan je više laboratorijski postupak isporodjivanja otpora metodom kompenzacije, s kojom se primarno mjere naponi, no posredno i struje i otpori, o čemu će još biti govora.

II. MJERENJA SPECIFIČKOGA OTPORA I TEMPERATURNOG KOEFICIJENTA OTPORA

27. Mjerenja specifičkoga otpora ρ i temperaturnoga koeficijenta otpora α od velikoga su praktičkoga interesa, jer karakteriziraju materije od kojih se prave vodiči. Ona se svode na mjerenja otpora kojom god od opisanih metoda. Da se odredi veličina ρ (odnosno njezin recipročni iznos $\kappa = 1/\rho$, električka vodljivost) postupa se prema materijalu i dimenzijama istraživane probe. Kod malenih otpora (probe bakra, aluminijske) radi se redovito Thomsonovim mostom ili $E-I$ -metodom, no pazeći da temperatura bude 20°C . za koju se vrijednost ρ , odnosno κ redovno navode, te da se ta temperatura ni ne povisi zamjetljivo tokom mjerenja ugrijavanjem zbog Jouleove topline od prejakog upotrebljene struje. Kod materija za otpore s visokim ρ i proba u obliku tanjih žica mogu se upotrebiti i metode prikladne za mjerenja već osrednjih otpora, na pr. Wheatstoneov most. U svakom slučaju, ako je R mjerenjem dobiveni iznos otpora u Ω , l duljina žice u m, q njezin prerez u mm^2 (kod promjera žice d mm računa se q po formuli $q = d^2\pi/4 \text{ mm}^2$), specifički otpor dobiva se po formuli: $\rho = Rq/l$.

Kod istraživanja, da li je neka bakrena proba načinjena iz »bakra za vodove«, ne određuje se po § 6. propisa VDE 0201/1932 prerez q bakra iz izmjerenoga promjera d u mm, nego time da se izvagne određena duljina vodiča, pa se na presjek q zaključi iz volumena koji odgovara dobivenoj težini (uzevši kao specifičku težinu bakra 8,99)

28. Određivanje temperaturnoga koeficijenta otpora α svodi se na mjerenje otpora kod dviju različitih temperatura. Kako α

nije ništa drugo nego prirast otpora preračunan na 1Ω i 1 stupanj C povišenja temperature, to očito vrijedi relacija:

$$R_2 = R_1(1 + \alpha\vartheta) \quad (I)$$

gdje su R_2 i R_1 otpori vodiča izmjereni kod temperatura t_2 i t_1 , kojih je diferencija ϑ .

Poznata formula $R_t = R[1 + \alpha(t - 20^\circ)]$, gdje su R_t i $R = \rho \cdot l/q$ vrijednosti otpora kod temperaturâ t° i 20° C, samo je specijalni slučaj relacije (I).

Za što preciznije određivanje veličine α povoljno je, ako se temperature t_2 i t_1 što više razlikuju. No s druge strane ove temperature moraju se držati u području koga granice ne leže pretjerano daleko od 20° C, jer je formula (I) izvedena uz pretpostavku jednolikoga (linearnoga) mijenjanja otpora s temperaturom, koja je praktički ispunjena u području umjerenih temperatura na pr. od 0° do 100° C, ali ne bi vrijedila recimo za bakar od -200° pa do $+500^\circ$ C ili za promjene otpora volframove niti u sijalicama kod prelaza od sobne temperature na usijano stanje.

Kod praktičkoga određivanja temperaturnoga koeficijenta mora se paziti da temperature t_2 i t_1 , očitane na termometru doista predstavljaju temperature vodiča. Vodič se na pr. uroni u uljnu kupku, koja se električki grije, a ulje se stalno miješa, da temperatura bude svagdje jednolična.

29. Dosad opisane metode mjerenja otpora, odnosno veličina ρ i α , vrijede kod mjerenja vodiča metalnoga karaktera (t. zv. »vodiča prve klase«). Mjerenja kod elektrolita (»vodiča druge klase«) izvode se izmjeničnom strujom, i to zbog eliminiranja utjecaja pojava »polarizacije«, koji prate pojav elektrolize i mogu kod mjerenja istosmjernom strujom izobličiti rezultate. Zato će o mjerenjima R , ρ i α kod elektrolita biti govora u vezi s mostovima izmjenične struje.

III. MJERENJA IZOLACIJE — MEGOMETRI

30. Važno područje mjerenja visokih otpora jesu *mjerenja izolacije*, na pr. mjerenja otpora izolacije vodova u električkim instalacijama. Zapravo se, zbog nesavršenosti upotrebljenih dielektričkih tvari, ne može ni kod naročito pomno izvedene izolacije očekivati, da ne će biti propuštena baš nikakova električka struja između međusobno izoliranih vodiča ili između pojedinih vodiča i zemlje. U praksi stanje izolacije zadovoljava, ako propuštene struje imaju dovoljno neznatne iznose. Čim su te struje neznatnije, tim boljom može se smatrati izolacija. Za karakterizaciju stanja izolacije ne upotrebljava se međutim veličina propuštene struje, nego se uzimlje kao mjerilo otpor koji treba pripisivati izolaciji na temelju iznosa I neznatne

propustene struje kod primijenjenoga stalnoga napona E . Kako je taj otpor, t. zv. *otpor izolacije* (izolacioni otpor) $R = E/I$ obrnuto razmjeran s propuštenom strujom, to se izolaciono stanje mora smatrati tim boljim, čim mu odgovara viši iznos izolacionoga otpora. Istom milijunski iznosi otpora R znače naročito dobru izolaciju, a da izolacija uopće zadovoljava zahtijevaju se iznosi R koji broje na stotine hiljada oma. Zbog ovako visokih iznosa pokazalo se prikladnim izražavati izolacione otpore u megomima (milijunima oma, A-7), pa se i sprave za mjerenja izolacije, t. zv. *mjerila izolacije* po principu ommetra (s jednim svitkom ili s unakrsnim svicima), zovu katkad također »megommetri«, jer te sprave zapravo mjere megomske ili uopće visoke otpore, bez obzira na to da li su to izolacioni otpori ili kakovi drugi visoki otpori (kao oni upotrebijavani u radio-aparatima).

31. Ipak kod praktičkoga izvođenja mjerenja izolacije dolaze u obzir naročiti momenti koji ne igraju ulogu kod mjerenja običnih fiksnih (naponski i inače neovisnih) otpora. Tako se traži, da se mjerenja izolacije vrše s dovoljno visokim mjernim naponima E , jer baš izolacioni otpori, sami po sebi i inače promjenljivi s vlagom, temperaturom itd., pokazuju ovisnost o veličini primijenjenoga napona, tako da otpor izolacije mjeren s naponom od malo volta može pokazivati iznose, koji su kudikamo viši, i prema tomu izgledaju znatno povoljniji, nego oni, koji se dobivaju kod mjerenja pogonskim naponom, kojemu očito treba dati prednost kod mjerenja (ako je viši).

Po § 5. njemačkih propisa VDE 0100/1930 o podizanju postrojenja jake struje s pogonskim naponima ispod 1000 V »ispitivanja izolacije treba obavljati po mogućnosti s pogonskim naponom, no najmanje sa 100 V. Izolaciono pak stanje smatra se primjerenim, ako gubitak struje zbog nepotpunosti izolacije u svakom dijelu instalacije između dva susjedna osigurača ili iza posljednjega osigurača ne prekoračuje kod pogonskoga napona 1 miliamper. Prema tomu granica, do koje smije pasti izolacioni otpor za svaki spomenuti dio postrojenja iznosi onoliko puta po hiljadu oma, koliko iznosi pogonski napon (jer takov iznos oma po Ohmovu zakonu daje struju 0.001 A). Na pr. kod 220 V pogonskoga napona donja granica izolacionoga otpora jest 220 000 oma ili 0,22 megoma. Međutim stanje izolacije, kod koga je izolacioni otpor već pao u blizinu donje granice, može se označiti kao vrlo loše. Zato u praksi treba računati i s otporima izolacije od nekoliko (ili čak mnogo) megoma, pa i mjerila izolacije moraju biti građena za takove iznose, recimo s vrijednošću 1 MΩ oko sredine skale.

Po VDE 0800/1932 § 4.a), t. 5. i 6. za signalne instalacije (električka zvonca i slično) dopušteno je ispitivanje izolacije istosmjernim naponom od 12 V. Kod telefonskih uređaja unutar jedne zgrade traži se naprotiv (kod iskopčanih aparata i izvora struje)

općenito izolacija od bar 6 megoma, i to uz mjerenje naponom od najmanje 100 V.

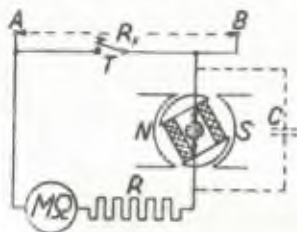
32. Potrebni prilično visoki mjerni naponi najjednostavnije se u aparatima za ispitivanje izolacije izvode s pomoću malih induktora, t. j. malih generatora istosmjerne struje s permanentnim magnetom i s armaturom »dvostruko T« (ili »trostruko T«), te s kolektorom i keficama. Izvođenje napona s pomoću malih suhih elemenata kao kod ommetara (D-26.) ne dolazi praktički u obzir kod megommetara, jer bi za potrebni broj volta trebalo toliko elemenata, da bi odnosna baterija bila teška, a kod češćega izmjenjivanja istrošene baterije novom i skupa u pogonu.

Pogon induktora ugrađenih u megommetar vrši se posredstvom zupčanika okretanjem rukom jedne ručke, i to s danom brzinom (na pr. uz jedan okretaj ručke sekundno, ili tri okretaja itd.). Naponi, što ih ti ručni induktori mogu davati, iznose na pr. 220 V, 500 V ili čak 1000 V i više (na pr. i 2000 V, ako se mjerenje izolacije želi u neku ruku kombinirati s »naponskim ispitivanjem«. Relativno znatnim naponima nije samo moguće udovoljiti propisima, koji traže mjerenja kod ne baš neznatnih pogonskih napona, nego se ujedno postizava, da se dadu još dobro očitati iznosi do nekoliko megoma po ommetarskoj formuli (I) u D-19.

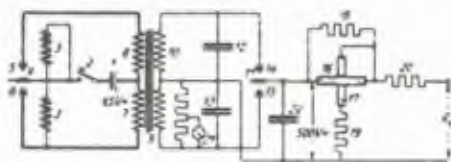
Jednostavnu shemu spajanja izolacionoga mjerila po sl. 94. bit će nakon rečenoga lako razumjeti. Spoj vodi od kefica na kolektoru armature dvostruko T (koja se zupčanim prenosom okretaja ručke brzo vrti u fiksiranom smislu između obih polova N i S permanentnoga magneta) na kombinaciju prikladnoga velikoga serijskoga otpora R i instrumenta s pomičnim svitkom i permanentnim magnetom s nacrtanom skalom u $M\Omega$. Na stezaljke A i B priključuje se nepoznati visoki otpor R_x . Na pr. kod ispitivanja otpora jednoga vodiča nekoga voda izvan pogona (s iskopčanim naponom i potrošačima) taj se vodič priključi na jednu od obih stezaljki A i B (i to, po VDE 0100/1932, na onu, koja predstavlja *negativni* pol izvora struje, dok se druga stezaljka, pozitivna¹⁾, spoji sa zemljom). Slično se odredi izolacioni otpor drugoga vodiča prema zemlji, također s pozitivnim polom izvora struje priključenim na zemlju. Kod određivanja otpora vodiča prema vodiču priključi se jedan vodič na A, a drugi na B; slično bi se ma kakov drugi mjereni otpor R_x priključio na A i B. Prije mjerenja treba se pritiskom tipke

¹⁾ To je zbog elektrolitičkih efekata. Ako je vodič negativni pol, a zemlja pozitivni, postanu zbog elektrolitičkoga izlučivanja metala zamjetljive eventualne male pogriješke izolacije, koje bi inače možda ostale nezamijećene ili zastrte slabom vodljivim solima ili oksidima izlučenima kod prolaza struje u protivnom smislu.

T uvjeriti, da je brzina vrtnje ručke približno prava, kako odgovara megomskoj skali. U tomu slučaju mora instrument pokazati na skali otklon koji odgovara iznosu predviđenoga mjernoga napona. Ako brzina okretanja ručke nije prava, ona se smanji ili poveća, dok kazalo instrumenta kod pritisnute tipke *T* ne pokazuje 0 M Ω . Kod finijih mjerenja, gdje bi smetalo, što istosmjerne struje iz ručnih induktora poput onoga na sl. 94. nisu stalne, nego »pulziraju« u jakosti, ukopča se paralelno induktoru i neki kondenzator kapaciteta *C*, koji pulzacije struje »izgladi« i struju mjerenja učini praktički stalnom.



Sl. 94.



Sl. 95.

33. Kod ispitivanja izolacionih stanja, koja i onako znatno variraju s prilikama, nije važno da izolacioni otpori budu precizno određeni; katkad se želi samo ustanoviti, da su iznad granice, do koje smije spasti izolacija. U takovim je slučajevima dovoljno, ako brzina okretanja ručke induktora samo približno odgovara. No ako se ipak ide za točnijim mjerenjima izolacije, a naročito ako se aparatom s induktorom želi mjeriti i druge velike otpore, onda se, obzirom na to da je ipak teško držati napon induktora tjeranoga rukom stalno na propisanoj visini, bolji aparati grade s instrumentima s *unakrsnim* *svucima* u stalnom magnetskom polju (B-44.). Istom ove izvedbe, za razliku od jednostavnijih i manje točnih običnih »mjerila izolacije«, zaslužuju pravo naziv »megommetri«, jer su to već relativno savršeni aparati, koji iznos »megoma« pokazuju točno i kod neizbježivih varijacija napona kod tjeranja induktora rukom.

34. Međutim proizvodnje struja s pomoću induktora tjeranih rukom nije uopće udobno kod mjerenja. Zato su u najnovije vrijeme donesena u praksu i takova mjerila izolacije, odnosno megommetri, u kojima se potrebni napon od nekoliko stotina volta proizvodi bez ikakvih mehaničkih manipulacija s pomoću struja uzetih iz samo nekoliko malih suhih elemenata. Postizava se to time, da se na pr. po shemi u sl. 95., koja prikazuje jedan takov aparat (»Isolavi«, H&B), malom baterijom (od tri suha elementa), ukopčanom s pomoću tipke 2, stavlja u funkciju naročito građeni prekidač struje s uzбудnim namo-

tajem na željeznoj jezgri 3 i s perom 4, koje naizmjenice tiče kontakte 5 i 6, tako da kroz obje polovice 7 i 8 »primarnoga« namotaja jednoga transformatora teku struje naizmjenice sad ovoga, sad onoga smjera. Transformacijom dobivaju se u »sekundarnom« transformatorskom namotaju, koji se sastoji od obje polovice 9 i 10, relativno visoki izmjenični naponi, koji se međutim puštaju da djeluju na mjerni instrument u aparaturi istom nakon ispravljanja (usmjerivanja), dakle u obliku istosmjernoga napona. Ispravljanje struje vrši se s pomoću mehaničkoga ispravljača s jednim perom 11 koje titra, stojeći u mehaničkoj vezi s perom 4, u ritmu transformiranih izmjeničnih struja, tako da na stezaljkama kondenzatora 22 djeluje napon uvijek samo istoga smjera, i to od kojih 500 V. Kondenzator 22 »izgladi« pulzacije toga napona, tako da instrument s unakrsnim svicima 16 i 17 i potrebnim pripadnim otporima 18, 19 i 20



SL 96



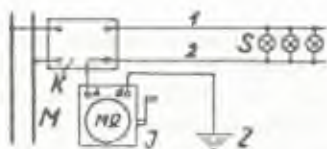
SL 97

dobiva stalan istosmjerni napon od kojih 500 V. Kazalo instrumenta pokaže dakle na skali instrumenta s unakrsnim svicima iznos otpora R_x , ako je ovaj priključen kako je naznačeno na slici, bez ikakvog drugog posluživanja aparata osim pritiska na tipku 2 (čime se opisani »baterijski transformator« stavi u pogon). Kondenzatori 12 i 13 su zbog sprječavanja iskrenja (od prekida struje) na kontaktima 14 i 15. Za kontrolu, da li aparat doista daje napon, služi svijetlo jedne male neonske tinjalice. Iznos volta, potreban za tu tinjalicu odvaja se, po principu »dijeljenja napona« poznatom iz sl. 71., s jednoga otpora priključenoga paralelno polovici 9 sekundarnoga transformatorskoga namotaja. Kod pritisnute tipke 2 »neonka« dakle svijetli i aparat mjeri onda iznos priključenoga otpora R_x .

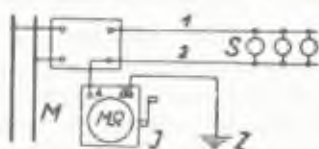
Na sl. 96. dan je primjer vanjskoga izgleda jednoga mjerila izolacije s induktorom po shemi u sl. 94., dok sl. 97. prikazuje aparat po shemi u sl. 95.

Posebna i u praksi mnogo uvedena konstrukcija mjerila izolacije s induktorom jest megger, fabrikat E&V. (ime dolazi od toga, što aparat mjeri »megome«). Uz ostale osobitosti ovaj aparat, koji ne ćemo pobliže opisivati¹⁾, ističe se time, da isti sistem permanentnih magneta proizvodi magnetska polja i za induktor i za instrument.

35. Prema gornjemu praktičko izvođenje mjerenja izolacije neke instalacije *izvan pogona* teklo bi po shemama u sl. 98. do 101. Najprije se, po shemi u sl. 98., uz iskopčan napon (t. j. uz izvađene osigurače kod K, preko kojih je instalacija priključena na mrežu M), ali ostavivši ukopčane sklopke i priključene potrošače S (sijalice, kuhala, motore itd.), mjeri izolacioni otpor cijele instalacije prema zemlji. U tu se svrhu mjerilo izolacije J priključi jednom stezaljkom A na jedan vodič instalacije (a

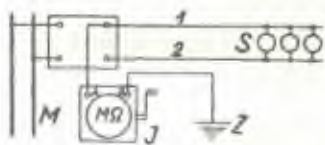


Sl. 98.

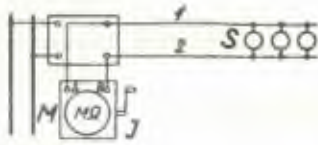


Sl. 99.

time, kod ukopčanih potrošača, i na cijelu instalaciju), a drugom stezaljkom B, onom koja je u vezi s +polom magnetskoga generatora s ručkom ili uopće izvora struje ugrađenoga u mjerilu izolacije, na zemlju Z. Ako dobiveni iznos izolacionoga otpora ispadne ispod predviđenoga minimalnoga iznosa, na pr. po propisima VDE (D-31.) ispod iznosa 0,22 megoma kod voda



Sl. 100.



Sl. 101.

za pogonski napon od 220 V, to kod instalacija koje se sastoje od više dijelova s osiguračima još ne mora značiti da izolacija ne odgovara propisima, jer propisi zahtijevaju određeni izolacioni otpor za otiske instalacije između susjednih osigurača ili između poslijednjih osigurača. Zato se u takovom slučaju ispituje da li pojedini ostsječci odgovaraju propisima, pri čemu

¹⁾ Opis »meggera« vidi na pr. u Golding, Electrical measurements, London (1935), Pitman, str. 286. do 288.

se eventualno naide na koji s lošom izolacijom, odnosno pogrješkom.

Poslije ispitivanja po sl. 98. slijedi, i opet uz iskopčani napon mreže, mjerenje otpora pojedinih vodiča prema zemlji, u koju se svrhu iskopčaju potrošači (sijalice se uklone itd.), tako da između pojedinih vodiča nema vodljive veze osim zbog nesavršenosti izolacije. Vodič kome treba odrediti izolacioni otpor prema zemlji priključi se na jedan pol A, a zemlja na drugi pol B mjerila izolacije. Tako je u sl. 99. predložen spoj za mjerenje izolacionoga otpora vodiča 2 prema zemlji, a u sl. 100. analogni spoj za istraživanje vodiča 1. Konačno se, uz iskopčani mrežni napon, još odredi izolacija vodiča jednoga prema drugomu po shemi u sl. 101., dakle kod priključenoga jednoga vodiča na stezaljku A, a drugoga na stezaljku B mjerila izolacije. Ako kod svih mjerenja izidu iznosi izolacionih otpora koji za pojedine odsječke ne leže ispod propisane donje granice, instalacija odgovara.

36. Kod određivanja izolacionoga otpora prema zemlji vodova istosmjerne struje u pogonu može se, ako nije jedan vodič priključen na zemlju, postupati po *Frischovoj metodi*. Najprije se prikladnim voltmetrom visokoga otpora R_g , priključenim između oba vodiča 1 i 2 voda (između + i — vodiča), odredi pogonski napon E , a zatim se očitavaju iznosi volta E_1 i E_2 , pokazani na istom voltmetru, priključenom najprije između vodiča 1 i zemlje, a zatim vodiča 2 i zemlje. Po zakonima razgranjivanja električkih struja dade se, s nešto računanja, pokazati da se uz spomenute prilike otpori R_1 i R_2 vodiča 1 i 2 prema zemlji mogu računati po formulama:

$$R_1 = R_g \cdot (E - E_1 - E_2) / E_2$$

$$R_2 = R_g \cdot (E - E_1 - E_2) / E_1$$

Za izolacioni pak otpor cijeloga uređaja prema zemlji

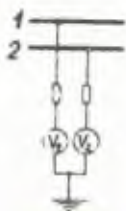
$$R = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$$

izlazi izraz:

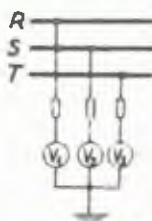
$$R = R_g \left(\frac{E}{E_1 + E_2} - 1 \right)$$

Radi li se o tomu da se uređaj istosmjerne struje nadzire u pogledu spoja sa zemljom, koji se može razviti tokom pogona, dovoljno je naprosto priključiti, po shemi u sl. 102., dva voltmetra, jedan između vodiča 1 i zemlje, a drugi između vodiča 2 i zemlje. Kod potpuno dobre izolacije obih vodiča prema zemlji oba voltmetra pokazuju jednaki iznos (polovicu pogonskoga napona). Dođe li pak do manje ili više izrazitoga spoja jednoga vodiča sa zemljom, voltmetar priključen na taj vodič pokazuje niži napon, a onaj drugi viši.

I u trofaznim mrežama upotrebljavaju se za nadziranje do-
zemnoga spoja uređaji s voltmetrima, dakako u ovom slučaju
s takovima koji reagiraju na izmjenične napone (na pr. s elektro-
statskima ili onima s mekim željezom). Shema spajanja je kao
u sl. 103. Normalno sva tri voltmetra kod trofaznoga voda s »linij-
skim« naponom E pokazuju »fazni« napon E' (kojega se iznos



Sl. 102.

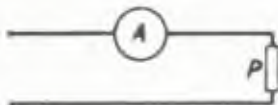


Sl. 103.

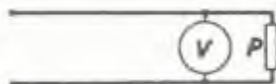
dobiva dijeleći E sa 1.73, tako da na pr. kod $E = 380$ V izlazi $E' = 220$ V). U slučaju da jedan vodič dobije spoja sa zemljom, pripadni voltmetar pokaže niži napon, a ostala dva viši. Kod visokih napona voltmetri se priključe preko »mjernih naponskih transformatora« (o tima kasnije).

IV. MJERENJA STRUJE I NAPONA

37. Mjerne sisteme instrumenata već smo opisali. Praktički najvažniji od tih sistema u bitnosti reagiraju na električke struje, a tek posredno se daje udesiti da mjere napone. U prvomu slučaju, kad mjere struje kao ampermetri A , instrumenti se bez obzira na sistem ukapčaju po shemi u sl. 104. u glavni tok struje, a u slučaju mjerenja napona, dakle kod voltmetara V , upotrebljava se poredni spoj kao u sl. 105., t. j. instrument se priključi paralelno potrošaču P . Sve je to u potpunoj analogiji s onim što je već rečeno za elektrodinamske ampermetre i voltmetre u vezi sa shemama u sl. 13. i 14.



Sl. 104.



Sl. 105.

Međutim većinom mjerni sistemi ne pokazuju sami za sebe onu osjetljivost i druga svojstva koja trebaju da imaju instrumenti kao ampermetri i voltmetri s opsegom skale (područjem mjerenja) za koji su određeni, i u tomu ih slučaju treba nadopuniti do potpunoga instrumenta za predviđenu svrhu.

38. U praksi se taj cilj postizava na različite načine, već prema mjernom sistemu i prema tomu da li instrument treba da bude ampermetar ili voltmetar. Kod *ampermetara s pomičnim svitkom* i permanentnim magnetom upotrebljavaju se »shuntovi« ili »poredni otpori«.

Mjerni sistemi s pomičnim svitkom izvode se naime redovno s »galvanometarskim« osjetljivostima, t. j. oni daju puni otklon već kod struje I_1 od nekoliko miliampera ili slično, a otpor R_1 im je nekoliko oma ili slično. Ako sad opseg skale instrumenta treba da bude veći, dakle ako je sistem sam previše osjetljiv za predviđenu svrhu, smanjuje se osjetljivost po shemi u sl. 106. stavljanjem paralelno sistemu porednoga otpora (Nebenwiderstand, shunt) malenoga omskoga iznosa Y . Shuntovi se dimenzioniraju po principu da se mjerena struja glavnoga toka prisili na takovo razgranjivanje, da kroz sam sistem instrumenta kod nominalne struje I (do koje se kao maksimalne instrument gradi, na pr. 5 A ili slično) ide samo dio I_1 koji odgovara punom opsegu mjerenja samoga sistema, a sav ostatak struje $I_2 = I - I_1$, u praksi obično daleko najveći dio, da prolazi kroz shunt Y .

Imamo dakle dvije grane s otporima R_1 i Y , protjecane strujama I_1 i I_2 , pri čemu R_1 i I_1 ne moraju biti baš otpor odnosno struja kroz sam pomični svitak nego, općenitije, znače otpor i maksimalnu struju onoga sistema uzetoga kao cjelina, na koji je paralelno priključen shunt Y (iako je taj sistem udešen redovno na neovisnost o promjenama temperature, te adjustiran na okrugli broj oma R_1 i okrugli iznos struje I_1 dodavanjem prikladnih otpora, manganinskih i bakrenih, ukopčanih prema svitku u seriju, eventualno i paralelno). Kako pad napona u shuntu očito mora biti isti kao i u sistemu kojemu je paralelno priključen, to vrijedi relacija: $I_1 R_1 = (I - I_1) Y$. Ona se može pisati i u obliku proporcije

$$Y : R_1 = I_1 : (I - I_1)$$

iz koje se odmah dobiva otpor shunta Y .

Dodavanjem shunta postizava se ujedno i to da ampermetar predstavlja vrlo malen otpor, što je vrlo povoljno kod mjerenja struja, gdje se instrument ukapča u glavni tok, pa od uklapanja ampermetra nastaju tim manje poremetnje čim mu je otpor r_A neznatniji.

Primjer: Sistemu otpora $R_g = 20 \Omega$, koji može mjeriti struje do iznosa $I_1 = 0.003$ A (čemu odgovara pad napona $0.003 \times 20 = 0.060$ V = 60 mV) treba dodati shunt da nastane ampermetar s opsegom skale od 1.5 A (= 500×0.003 A). Kroz instrument teče 0.003 A, kroz shunt ostatak, dakle 499×0.003 A. Vrijedi dakle proporcija:

$$Y : 20 = (1 \times 0.003) : (499 \times 0.003) = 1 : 499$$

iz koje izlazi: $Y = 20/499 \Omega (\approx 0,0401 \Omega)$. Po poznatoj formuli za vodljivu vrijednost kombinacije dviju paralelnih grana, kojih su otpori R_1 i Y (naime: $1/r_A = 1/R_1 + 1/Y$) izlazi za naš instrument sa shuntom:

$$1/r_A = 1/20 + 499/20 = 500/20,$$

dakle $r_A = 20/500 = 0,04 \Omega$, t. j. shuntom se otpor smanjio od 20Ω na samo $r_A = 0,04 \Omega$.

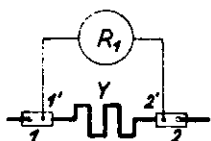
Poredni otpori se prave iz manganina, jer moraju imati stalnu vrijednost, bez obzira na promjene temperature, a manganinski vodiči (žice ili, kod jačih struja, *vrpce*) moraju biti dovoljno visokoga presjeka da se kod prolaza predviđenih maksimalnih struja samo umjereno ugriju.

39. Mnogo se upotrebljavaju i *višestruki poredni otpori*, koji dopuštaju da se s istim instrumentom obuhvati više skala mjerenja. U tu svrhu može se upotrebiti kombinacija od više različitih međusobno nezavisnih shuntova koje jedna preklopka naizmjenice ukapča prema veličini struja koje treba mjeriti, ali se u praksi većinom upotrebljavaju višestruki shuntovi sa serijskom kombinacijom otpora kao Y_1 , Y_2 i Y_3 u shemi na sl. 107. Upotrebe li se kod predloženoga spoja priključci 1 i 4, ukopčana je paralelno instrumentu cijela serijska kombinacija otpora $Y_1 + Y_2 + Y_3$ i opseg mjerenja je najmanji, na pr. 1,5 A. Za veće opsege mjerenja, na pr. 6 A i 30 A, upotrebe se priključci 1 i 3, odnosno 1 i 2, tako kao shunt služi samo dio serijske kombinacije otpora $Y_1 + Y_2$ (odn. Y_1), a ostatak se pribraja samomu otporu instrumenta, čime se doduše malo poveća veličina otpora paralelnoga shuntu (a po tomu i pad napona cijeloga ampermetra), no to biva uzeto u račun kod sastavljanja kombinacije višestrukoga shunta.

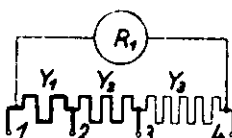
Kod upotrebe vanjskih shuntova mnogo se griješi u praksi nekritičkim spajanjem shunta s instrumentom. Korektan je spoj kao na sl. 106., a nekorektan na pr. onaj na sl. 108., gdje je iznos porednoga otpora ispada veći nego je predviđeno, tako da bi instrument pokazivao previše. Kod preciznih mjerenja treba uzeti u obzir da je i otpor dovodnih žica od shunta k instrumentu uračunan u R_1 , i ako se ne želi da ampermetar pokazuje previše, te žice ne treba skraćivati, makar cijela njihova duljina i nadvisivala prostorni razmak od instrumenta do shunta.

40. Shuntovi su uostalom prikladno sredstvo proširivanja mjernoga opsega ampermetara s pomičnim svitkom i permanentnim magnetom, kod kojih mjerni sistemi uostalom ni ne mogu biti direktno izvedeni za jače struje zbog sitnih dimenzija pomičnoga svitka, a i zbog toga što struja ulazi i izlazi na njezna elastična pera, koja ne podnose jače struje. Kod drugih sistema upotrebljavaju se *drugi načini udešavanja* mjernog opsega ampermetara. Navedimo nekoliko primjera.

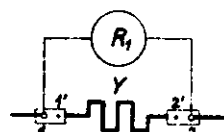
Kod ampermetara s pomičnim željezom koji treba da mjere i izmjenične struje račun shunta ne samo da ne bi bio jednostavno izvediv, nego je ampermetre za jake struje i jednostavnije direktno izvoditi polazeći od činjenice da je za određeni odklon pomičnoga sistema instrumenta odlučan broj amper-zavoja, dakle umnožak broja ampera s brojem zavoja fiksnoga svitka, u čijem se magnetskom polju željezo giblje. Svedeno je dakle da li se uzme 2 zavoja sa 100 A ili 20 (ekvivalentno smještenih) zavoja sa 10 A, itd. Zato, da se dobiju instrumenti za više ampera, treba samo uzeti manje zavoja (i to deblje žice koja podnosi više ampera), i obrnuto. Katkad se čak, kod instrumenata za ekstremne struje (do nekoliko stotina ampera), struja pusti kroz jedan jedini zavoj vrlo debeloga vodiča. Prema tomu gubitak napona kod ampermetara ovoga sistema nije stalan, nego raste kad se ide prema instrumentima za slabije struje s više zavoja tanje žice.



Sl. 106.



Sl. 107.



Sl. 108.

Kod instrumenata s *više opsega skale*, na pr. s *dva* u omjeru 1 : 2, recimo za 5 i za 10 A, može se postupati tako da se namotaj podijeli u dvije polovice sa istim brojem zavoja i električki ekvivalentno porazmještene, pa se preklopkom ukapčaju za viši opseg skale obje polovice paralelno, a za niži opseg mjerenja obje polovice u seriju (čime se dolazi na dvostruki broj zavoja, dakle na polovicu potrebne struje). Kod pune ekvivalencije obih polovica namotaja ista podjela skale vrijedi za oba mjerna područja (samo, dakako, kod višega područja očitavanja vrijede dvostruko).

Kod jednostavnijih izvedbi mogu se različita područja mjerenja postići i tako da se prema sl. 109. upotrebi serijska kombinacija od malo zavoja debele žice, zatim više zavoja nešto tanje žice, pa još više zavoja još tanje žice, i tako dalje ako je potrebno. Za najviše područje mjerenja upotrebe se stezaljke 1 i 2, dakle samo prva grupa zavoja S_1 , za iduće niže područje stezaljke 1 i 3 sa zavojima svitaka S_1 i S_2 , itd. U tomu slučaju redovno je potrebno nanijeti posebnu skalu za svako područje mjerenja.

Kod ampermetara elektrodinamskoga tipa nema nikakove zapreke da teku i jače struje kroz nepomični (fiksni) svitak;

samo kroz pomični svitak treba da teče slaba struja. Ako je sad pomični svitak ukopčan paralelno nepomičnomu, kroz njega može da teče samo maleni dio ukupne struje, a sva preostala struja može se pustiti kroz nepomični svitak. Da bi razdvajanje struje u granu s pomičnim svitkom i u onu s nepomičnim svitkom bilo neovisno o promjenama temperature, dodaju se prema sl. 110. bakrenim namotajima svitaka S_1 i S_2 nepomičnoga i pomičnoga, još u seriju prikladni manganinski otpori R_1 , odn. R_2 .



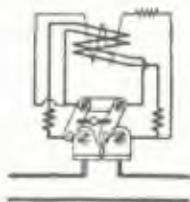
Sl. 109.



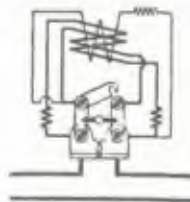
Sl. 110.

Kod elektrodinamskih ampermetara za dva opsega mjerenja može se primijeniti preklapanje iz paralelnoga u serijski spoj s pomoću naročite preklopke, montirane na instrumentu. U spoju ampermetra po sl. 111. instrument ima opseg mjerenja s polovicom broja ampera prema onomu što ga ima u spoju po sl. 112., jer su u prvom slučaju obje polovice fiksnoga namotaja elektrodinamskoga sistema spojene u seriju, a u drugomu paralelno.

Kod aparata za slabe struje nema, dakako, zapreke da se struja pusti kroz serijsku kombinaciju nepomičnoga i pomičnoga svitka kao u shemi na sl. 13.



Sl. 111.



Sl. 112.

Slično se i kod drugih mjernih sistema za istosmjerne i izmjenične struje postizavaju na različite načine željeni mjerni opsezi, upotrebljivi i kod istosmjerne i kod izmjenične struje. Za mjerenja pak samo s izmjeničnom strujom povoljni opsezi mjerenja ampermetara pogotovo se lako postizavaju upotrebom mjernih strujnih transformatora, o čemu će biti govora u posebnom poglavlju.

41. Kod *voltmetara* se udešavanje mjernoga opsega redovno postizava *dodanim* ili *serijskim* otporima (Vorwiderstände,

series resistances). U koliko naime nije specijalnoga karaktera (elektrostatski voltmetri, cijevni voltmetri i sl.), mjerenje napona u tehničkoj praksi izlazi na zaključivanje na veličinu napona, što mora vladati između krajeva nekoga fiksnoga otpora, iz struje kako je pokaže osjetljivi instrument (miliampermetar ili općenitije galvanometar). Ako je R_V iznos toga fiksnoga otpora, po formuli $E = IR_V$, čim je veća struja I , njoj proporcionalno je veći iznos napona E , pa zato sprava koja pokazuje struju I može služiti i za mjerenje napona E . Čak se kod sprava za mjerenje napona po ovom principu, kod »galvanometričkih voltmetara« različitih mjernih sistema, obično ni ne nanose na skalu vrijednosti I , nego odmah pripadne vrijednosti $E = IR_V$, t. j. skala se odmah izvede u voltima.

Kako se razabire iz relacije $E = IR_V$, uz što manje I , kako očitito treba željeti kod voltmetara, jer maleno I znači malen vlastiti potrošak struje voltmetra, treba da uz dani iznos E koji se voltmetrom još ima dosegnuti bude R_V što veće. Kako otpor R_1 samoga sistema galvanometra redovno ni izdaleka ne dosiže iznos R_V koji je potreban da se mogu mjeriti samo nešto viši naponi, to se kod voltmetara otporu R_1 sistema dodaje u seriju jedan otpor X , i taj serijski ili dodani otpor voltmetra nadopunjuje R_1 po relaciji $R_V = R_1 + X$ i shemi u sl. 113. na željeni iznos R_V . Čim je veći »dodani otpor« X , tim je veći i opseg mjerenja nekoga određenoga instrumenta kao voltmetra.

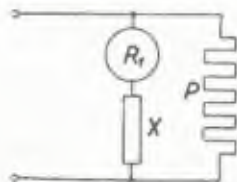
Dodani otpori X većinom se ugrade u samo kućište instrumenta kao voltmetra, ali se katkad također priključuju izvana. Račun serijskih otpora voltmetara vrlo je jednostavan. Ako sistem otpora R_1 daje maksimalni otklon kod struje I , pa ako treba konstruirati voltmetar koji mjeri maksimalno napon E , onda treba R_1 nadopuniti na R_V dodavanjem otpora X koji zadovoljava relaciju: $E = IR_V = I(R_1 + X)$. Iz ove relacije slijedi odmah traženi iznos $X = (E - IR_1)/I$.

Kako su serijski otpori (potpuno ili od česti) od manganina, njima se ujedno podaci voltmetra čine neovisnima o promjenama temperature, jer se (kod preciznih izvedbi) omjer bakra i manganina u kombinaciji $R_1 + X$ može uvijek tako složiti da ispadne temperaturna ovisnost otpora voltmetra iz koje, zajedno s drugim temperaturnim utjecajima na podatke instrumenta, na pr. kod instrumenata s pomičnim svitkom utjecajima promjena temperature na elastičnost spiralnih pera i na magnetsku permanentnoga magneta rezultira praktički potpuna neovisnost podataka voltmetra o temperaturi¹⁾.

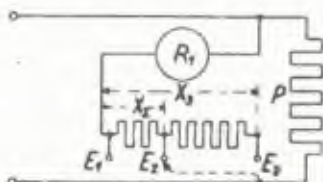
¹⁾ Kod preciznih instrumenata s pomičnim svitkom i permanentnim magnetom obično se nastoji da bude u ukupnom otporu voltmetra 1/20 iznosa oma bakra, a 19/20 manganin. Međutim kod manje preciznih izvedbi dosta je ako otpor manganina samo uglavnom znatno preteže prema otporu bakra.

Primjer: Instrument pokazuje maksimalni otklon kod 0.003 A (3 mA) i ima otpor 20Ω . Treba načiniti voltmetar za napone do 150 V. Poradi: $150 = 0.003 \cdot (20 + X)$ izlazi $20 + X = 50\,000 \Omega$, dakle $X = 49980 \Omega$.

42. Da se naznači, da li voltmetar ima relativno manji ili veći otpor, obično se navede koliko »oma po voltu« (Ω/V) ima instrument. Na pr. voltmetar do 150 V sa $R_V = 50\,000 \Omega$ jest instrument sa $333\frac{1}{3} \Omega/V$. Ima voltmetara i sa $1000 \Omega/V$, a po potrebi i više. Instrumenti s premalo Ω/V , kakov bi na pr. bio elektrodinamski voltmetar bez željeza za napone do 300 V sa R_V jed-



Sl. 113.



Sl. 114.

nako samo 3000Ω , dakle sa samo $10 \Omega/V$, neprilični su zbog relativno velikoga vlastitoga potroška struje, a mogu dati i jako izobličene rezultate mjerenja kod izvora za slabe struje kojih napon jako opada s opterećenjem.

Takov je na pr. slučaj kod anodnih aparata koji, priključeni na rasvjetnu mrežu, daju anodne struje cijevima prijemnika radija. Kad bi se mjerio voltmetrom s premalo Ω/V , napon potrošača priključena na ovakov izvor struje, onda bi se strujom što bi je iz izvora struje uzeo sam voltmetar tako znatno povećala ukupna struja anodnoga aparata da bi njegov napon znatno pao. Voltmetar bi, dakako, pokazao taj smanjeni napon, a ne onaj prvobitni koji je vladao prije priključka voltmetra i koji je trebalo mjeriti. U ovakovim slučajevima potreban je dakle naročit oprez i mogu se upotrebiti od galvanometričkih voltmetara samo oni s po mogućnosti mnogo Ω/V . S elektrostatskim voltmetrima, koji uopće ne troše istosmjerne struje, ne bi uopće bilo opisanih poremetnja.

43. Opisani princip udešavanja, odnosno proširivanja mjernoga opsega voltmetara serijskim otporima daje se primijeniti kod različitih mjernih sistema. Najviše Ω/V postizava se, dakako, kod instrumenata s pomičnim svitkom i permanentnim magnetom, jer se njima dadu proizvesti najosjetljiviji mjerni sistemi. No i kod instrumenata s pomičnim željezom, a isto tako i kod elektrodinamskih instrumenata itd., metoda serijskih otpora kod voltmetara primjenjuje se praktički, pri čemu manganin u tim otporima smanjuje utjecaj promjena temperature na podatke instrumenta, a »neinduktivni« način namatanja serijskih otpora ujedno čini i cijeli voltmetar praktički »neinduktivnim«, i prema

tomu upotrebljivim i za izmjenične struje tehničkih frekvencija bez obzira na frekvenciju.

Kod elektrodinamskih voltmetara struja se redovno pušta redom kroz serijsku kombinaciju pomičnoga svitka, nepomičnoga svitka i serijskoga otpora X (sl. 14.).

44. Vrlo se često voltmetri izvode odmah s *više mjernih opsega*. Konstruktivno je to jednostavan problem, jer je dovoljno na jednomu određenom ukupnom serijskom otporu predvidjeti odvojke s pripadnim stezaljkama za niže opsege mjerenja. Tako bi na pr. na sl. 114. instrument kod upotrebe odvojka E_1 imao najviši dodani otpor X_1 s pripadnim najvišim mjernim opsegom, dok bi s odvojkom E_2 , dakle sa serijskim otporom X_2 , bio prikladan za manje napone. Konačno sa E_3 ostao bi ukopčan samo otpor R_1 sistema samoga, pa bi instrument dobro mjerio gotovo male napone (u koliko ne bi smetalo da instrument sa samim otporom R_1 , bez dodanoga otpora, nije temperaturno kompenziran). Ovako dodavanjem vanjskih otpora X mogu se proširivati i opsezi mjerenja gotovih voltmetara otpora R_V na još više iznose.

Kod izmjeničnih struja stoje na raspolaganju, osim serijskih otpora, za proširenje opsega mjerenja još i »naponski mjerni transformatori«, baš kao što smo već rekli da se kod mjerenja izmjeničnih struja mogu upotrebljavati »strujni mjerni transformatori«, pa će o svemu tomu biti govora kod tretiranja mjernih transformatora uopće.

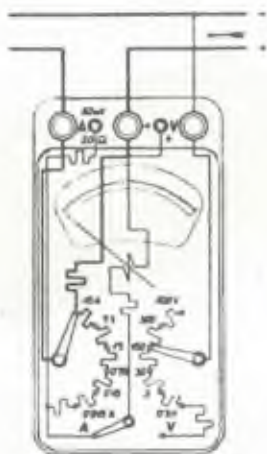
V. VIŠESTRUKI I UNIVERZALNI INSTRUMENTI

45. Pokazano je kako se osjetljivi galvanometri dadu uvijek udešavati porednim otporima u ampermetre danoga opsega mjerenja, a serijskim otporima u voltmetre danog opsega mjerenja, te da se kako ampermetri, tako i voltmetri mogu izvesti i s više opsega mjerenja. Uz to svaki voltmetar otpora R_V po ommetarskoj formuli (I) na str. 90. sa $R_d = R_V$ može služiti i za mjerenja otporâ, pa specijalno i za mjerenja izolacije, te za druge svrhe.

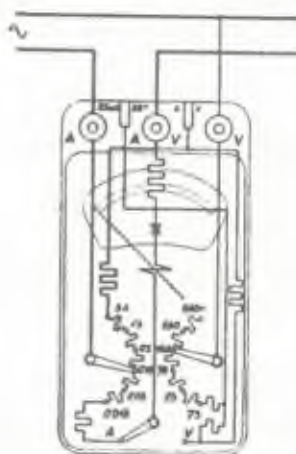
Ova spoznaja dovela je do konstrukcije »višestrukih instrumenata«, od kojih su mnogi izvedeni za univerzalnu upotrebu kod istosmjerne i izmjenične struje. Instrumenti su to, koji su u novije vrijeme postali vrlo popularni (na pr. »Multavi« H&B; »Multizett« S&H; »Normameter«, »Mavometer«, »Avometer« itd.) Pretstavljajući u isti čas sprave za mjerenje struja, napona i otpora vrlo raznovidnih iznosa ovi višestruki instrumenti nadomještaju više posebnih instrumenata. U bitnosti to su sistemi s pomičnim svitkom i permanentnim magnetom, kombinirani s višestrukim shuntovima i sa serijskim otporima s odvojcima za

više voltmetarskih opsega mjerenja, pa im je funkcija jasna na temelju dosadašnjih razlaganja. Dovoljno će zato biti ako donesemo samo dva primjera ovakvih instrumenata.

Na sl. 115. prikazana je shema spajanja Normametra G (Norma) za isto mjerne struje. Okretanjem preklopke, vidljive dolje na slici, prema A ili V vrši se prekapčanje instrumenta na mjerenje struje ili na mjerenje napona. Kao ampermetar s više mjernih opsega instrument mjeri struje od posve neznatnih do 15 A, a kao voltmetar s više mjernih opsega napone od posve niskih pa do 600 V. Pojedini ampermetarski i voltmetarski mjerni opsezi udešavaju se vrtnjom obih ručki vidljivih lijevo i desno na slici. Posebnim sporednim priključcima.



Sl. 115.

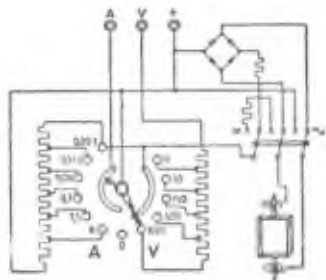


Sl. 116.

označenima sa »60 mV, 20 Ω « i »+« pružena je mogućnost da se instrument može upotrebljavati i s vanjskim shuntovima za mjerne opsege iznad 15 A, ako su samo upotrebljeni shuntovi konstruirani na bazi galvanometara 60 mV/20 Ω , što je vrlo običajna kombinacija.

Kod već davno uvedenoga »univerzalnoga galvanometra S&H« predviđeno je da se poredni otpori priključuju izmjenljivo izvana, a serijski voltmetarski otpori upotrebljavaju se ujedno i kao poznati otpori R Wheatstoneova mosta, zbog kojega je ovaj instrument snabdjeven i kliznom žicom. Ova je smještena u obliku kruga oko ruba instrumenta, na kome je odmah urezana i skala kvocijenata a/b dijelova u koje kliznu žicu dijeli klizni kontakt. Osim po omernarskoj metodi moguća su dakle i mjerenja otpora univerzalnim galvanometrom S&H i po metodi Wheatstoneova mosta, zatim određivanja mjesta pogreške u kabelima itd.

46. Višestruki instrumenti izvode se danas, osim po shemi u sl. 115. za mjerenja istosmjernom strujom, također vrlo mnogo i za mjerenja izmjeničnom strujom. U tu svrhu ugradi se u njih suhi ispravljač, koji izmjenične struje ispravi (usmjeri), tako da na mjerni sistem djeluju istosmjerne struje, kako je već opširno tretirano (B-37.). Sama konstrukcija višestrukoga instrumenta može biti sad ili po shemi u sl. 116., koja prikazuje »Normameter W«, pendant »Normametra G«, no udešen samo za mjerenja izmjeničnih strujama i napona, ili pak takova da se instrument može upotrebljavati univerzalno, da mjeri po volji bilo istosmjerne, bilo izmjenične struje i napone, kao kod instrumenta po sl. 117., u kojoj je predložena shema spajanja instrumenta »Multavi II« (H&B) kome sl. 118. predložuje vanjski izgled; a više ili manje analogni su i drugi višestruki instrumenti



Sl. 117.



Sl. 118.

za obje vrste struja, kao »Normameter GW«, konstrukcije S&H, itd. Prelaz od mjerenja istosmjernom strujom na ona izmjeničnom vrši se kod instrumenta po sl. 117. zakretom nadesno preklopke vidljive na desnoj strani sheme.

Kako se vidi, instrument po shemi u sl. 117. može mjeriti kao voltmetar do 600 V. a kao ampermetar do 6 A, no kod mjerenja izmjeničnih struja tehničkih niskih frekvencija može se upotrebom posebnoga »mjernoga strujnoga transformatora«, konstruiranoga baš za upotrebu s ovim instrumentom, opseg mjerenja proširiti i do nekoliko stotina ampera.

VI. MJERENJA UČINA KOD ISTOSMJERNE STRUJE

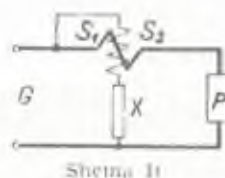
47. Budući da je kod istosmjerne struje učin N (u vatima) naprosto jednak umnošku napona E (u voltima) i struje I (u amperima), to je zapravo za određenje učina kod istosmjernih struja dovoljno izmjeriti napon voltmetrom i struju ampermetrom, pa učin izračunati po formuli $N = EI$. Tako se u praksi

kod mjerenja istosmjernih učina uglavnom i radi, tim više što je kod mjerenja redovno od interesa znati i vrijednosti E i I , pa ih i onako treba mjeriti. Naprotiv kod izmjeničnih struja učin se nužno mjeri vatmetrima.

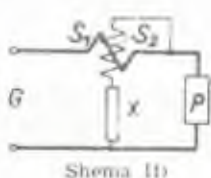
Međutim ni kod istosmjernih struja nema zapreke, ako se želi znati samo iznos N , mjerenju učina direktno vatmetrima, dakako samo onima s mjernim sistemom (elektrodinamskim) koji reagira na istosmjerne struje.

Vatmetar se priključuje bilo po shemi I) u sl. 119., bilo po shemi II) u sl. 120. Razmotrimo oba slučaja, jer ćemo tako vidjeti kako se kod točnijih mjerenja po potrebi uzimlju korekcije zbog vlastitoga potroška instrumenta.

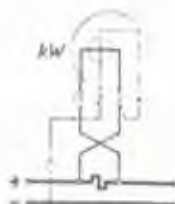
Vatmetar, ako mu je naponski svitak S_2 (zajedno sa serijskim otporom X analognim onom kod voltmetara) priključen na istosmjerni napon E i ako mu je strujni svitak S_1 protjecan istosmjernom strujom I , mora zapravo pokazivati, ako korektno mjeri, produkt EI . Međutim ispravan iznos učina N , i to bilo onoga što ga neki generator (izvor struje) G od sebe daje, bilo onoga što ga neki potrošač P (na pr. otpor, motor) prima, razlikuje se, zbog vlastitoga potroška struje u vatmetru, manje ili više od iznosa pokazanog od vatmetra. Da je tomu tako, vidi se ako se razmotre četiri mogućnosti mjerenja učina koje se nadaju na temelju shema I) i II) u sl. 119. i 120.; naime dvije su mogućnosti mjerenja učina generatora po shemi I) ili II), a dvije mjerenja učina potrošača po shemi I) ili II).



Sl. 119



Sl. 120.



Sl. 121.

48. Označimo sa R_W otpor »naponskoga svitka«, razumije vajući ovaj puta osim S_2 i serijski otpor X , pa uzmimo na pr. da treba mjeriti učin generatora u spoju vatmetra po shemi I). Vatmetar je tu očito priključen na puni napon E generatora, no kroz njegov strujni svitak ne teče puna struja generatora, nego manja za iznos $I_W = E/R_W$ struje u naponskom svitku vatmetra. Prema tomu u ovom slučaju vatmetar pokazuje premalo i, da se dobije ispravan iznos N učina što ga od sebe daje generator, treba dodati iznos $E I_W = E^2/R_W$ vata kao korekciju oči-

tanju N_0 vatmetra; drugim riječima točni iznos učina generatora kod mjerenja po shemi I bio bi:

$$N = N_0 + E^2/R_w$$

Uzmimo sad da se mjeri učin potrošača po shemi I). Ovdje je, očito, struja kroz strujni svitak vatmetra ista, odnosno ima isti iznos, nazovimo ga I , kao i struja potrošača, ali je napon što djeluje na naponski svitak vatmetra veći nego li napon potrošača, i to za iznos pada napona u strujnom svitku vatmetra, dakle prevelik za iznos $I r_w$, ako je r_w otpor strujnoga svitka vatmetra. Vatmetar pokazuje zato sada previše, pa da se dobije ispravan iznos N učina uzetoga od potrošača, treba od očitanaoga iznosa N_0 oduzeti potrošak vata u strujnom svitku vatmetra dakle iznos $I r_w$. Korekcija je dakle $-I r_w$ i pravi iznos učina potrošača kod mjerenja po shemi I) jest:

$$N = N_0 - I^2 r_w$$

Analogna razmatranja za učin generatora i potrošača kod mjerenja po shemi II) vode na rezultate: da i po shemi II u slučaju mjerenja učina generatora treba nešto dodati očitonomu iznosu, a u slučaju mjerenja učina potrošača nešto oduzeti od očitanaoga iznosa na vatmetru, tako da konačno izlazi ova tabela ispravnih učina N generatora, odnosno potrošača:

T a b e l a VII.

Spoj	Učin generatora	Učin potrošača
I)	$N_0 + E^2/R_w$	$N_0 - I^2 r_w$
II)	$N_0 + I^2 r_w$	$N_0 - E^2/R_w$

Kako se vidi, da se dobije učin generatora, treba u oba spoja očitonomu iznosu nešto dodavati, a kod učina potrošača oduzimati. Iznosi E^2/R_w , odnosno $I^2 r_w$ nisu, uostalom, ništa drugo nego vati koji se troše (i pretvaraju u Joulevu toplinu) u naponskom, odnosno strujnom svitku vatmetra, a formule gornje tabele vrijede i za mjerenja učina kod izmjeničnih struja.

49. U praksi se često korekcije po tabeli VII. mogu zanemariti kao odviše neznatne prema nesigurnostima podataka vatmetra. Međutim ima slučajeva kod mjerenja malenih učina instrumentima s nešto manjim R_w , odnosno s relativno nešto većim r_w , da se dobivaju vrlo krivi rezultati ako se ne uzmu u obzir korekcije. Inače kod mjerenja svakako treba nastojati uzeti onaj spoj kod kojega je korekcija po mogućnosti zanemariva, a ako treba da se uzme korekcija radije se upotrebljava spoj s korekcijom E^2/R_w , t. j. kod generatora spoj I), a kod potrošača spoj II), jer je iznos R_w redovno poznat i naveden na instrumentu. U sl. 121. prikazan je praktički spoj po shemi I)

vatmetra s vanjskim izmjenljivim shuntom, tako da su moguća mjerenja i kod vrlo različitih mjernih strujnih opsega.

Primjeri: Neka se mjeri po I) učin dinamama s naponom stezaljki 220 V i neka vatmetar pokaže 3200 W. Ako je $R_w = 3000 \Omega$, korekcija je:

$$220^2/3000 = 16,1 \text{ W}$$

i točni iznos učina dinamama bio bi: $N = 3200 + 16 = 3216 \text{ W}$ Korekcija je dakle samo 0.5% i redovno bi se mogla zanemariti.

Ako bismo, slično, mjerili u spoju I) učin nekoga potrošača, koji uzima struju 15 A, pa ako bi iznos, očitao na vatmetru sa $r_w = 0,04 \Omega$, bio 2800 W, korektni iznos učina potrošača bio bi:

$$2800 - 15^2 \times 0,04 = 2800 - 9 = 2791 \text{ W}$$

i korekcija bi bila samo nešto oko -0,3%, dakle i opet praktički zanemariva. Naprotiv lako se uvjeriti da bi kod mjerenja učina sijalice koja sama uz mnogo volta troši malo vata izišao kod mjerenja po II) posvema iskrivljen iznos, ako bi se propustilo uzeti korekcije za učin potrošača po shemi II).

50. U prvi mah izgleda, da bi i spojevi kao u sl. 122. i 123. morali biti jednako vrijedni i dopušteni kod praktičke upotrebe kao i korespondentni spojevi u sl. 119., odn. 120., jer izgledaju električki ekvivalentni spojevima I), odn. II). U stvari spojeve po sl. 122. i 123., kod kojih nije S_2 nego X vezano na S_1 , treba u praksi izbjegavati, jer kod njih vlada relativno velika razlika potencijala (napon) između pomičnoga (naponskoga) i nepomičnoga (strujnoga) svitka mjernoga sistema vatmetra, i to za iznos pada napona u relativno visokim serijskim otporima X , što se dodaju u seriju s pomičnim svicima već prema potrebnom naponskom opsegu mjerenja vatmetra.

Zbog razlika potencijala između obih svitaka kod elektrodinamskih vatmetričkih sistema vladaju naime nepoželjna naprezanja redovno i onako slabe električke izolacije mjernoga sistema. A mogu doći do izražaja i utjecaji na podatke vatmetra od elektrostatskih sila između pomičnoga i nepomičnoga svitka vatmetra, osobito kod nježnih sistema, kao što su elektrodinamski b e z željeza, koji sami razvijaju male momente vrtnje.

VII. MJERENJA BALISTIČKIM GALVANOMETRIMA.

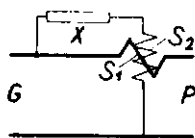
51. Već je u B-4. (str. 16.) bilo razloženo kako se galvanometrijski sistemi, ako su podesno građeni, mogu upotrebljavati »balistički«, t. j. tako da se vrlo kratkotrajnim prolazom struje zada mehanički udarac (impuls) pomičnom sistemu instrumenta, pa se iz veličine trenutnoga, t. zv. *balističkog* otklona, do koga sistem ovim udarcem bude »bačen«, zaključuje na ukupnu množinu elektricitete što je projurila kroz galvanometar za vrijeme kratkotrajnoga prolaza struje.

Balistički upotrebljavani galvanometri mjere prema tome množine elektricitete Q , i to redovno množine relativno *malene* (sve do posve neznatnih dijelova As ili C) i *trenutno protokle*, čime se razlikuju od naprava prikladnih za mjerenja većih količina elektricitete Q , sve do mnogo As odnosno Ah , koje su protjecale strujnim krugom kroz dulje vrijeme, dakle poimence od »voltametara« na elektrolitičkom principu¹⁾, te »ampersatnih brojila« na motornom principu (o kojima će biti govora kasnije).

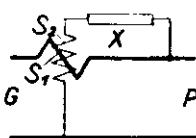
Razmotrimo poblize mjerenja balističkim galvanometrima. Svojim balističkim otklonom α , proporcionalnim ukupnoj množini elektricitete Q što je projurila kroz galvanometar još prije nego se njegov tromi pomični sistem dospio pravo maknuti, galvanometri mjere Q po formuli:

$$Q = C_B \cdot \alpha$$

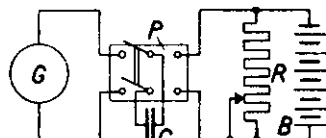
gdje je C_B t. zv. »balistička konstanta« galvanometra, t. j. veličina koja naznačuje množinu elektricitete, protekle kroz galvanometar kod otklona $\alpha=1$ balističkoga galvanometra, i čim je C_B manje, tim je veća osjetljivost galvanometra za balistička mjerenja.



Sl. 122.



Sl. 123.



Sl. 124.

52. Pitanje je sada: o čemu sve ovisi veličina C_B i kako se može odrediti za neki dani galvanometar. Teorija gibanja galvanometerskih sistema s pomičnim svitkom i permanentnim magnetom pokazuje na temelju razmatranja iz više matematike (diferencijalne jednadžbe) čime je sve vrijednost balističke konstante određena.

Ona je ovisna, uz ostalo, o t. zv. »strujnoj konstanti« C_0 , kojom po formuli $I = C_0 \alpha$ galvanometar reagira trajnim (ne

¹⁾ Osim već spomenutih (A-3.) voltametara sa srebrom uobičajeni su još voltmetri s bakrom, gdje se na protoku množinu elektricitete zaključuje po množini strujom elektrolitički oborenoga bakra, zatim voltmetri s praskavcem (smjesom od dva volumna dijela vodika i 1 volumna dijela kisika koja se, upaljena, eksplozivno spaja u vodu) i drugi. Jedna prikladna konstrukcija voltametara sa živom (koja se sakuplja u uskoj cijevi) dolazi u praksi kao elektrolitičko ampersatno »brojilo« istosmjernе struje (»Stia-brojilo«). — Pripaziti na razliku između dvaju potpuno raznoških pojmova »voltametar« i »voltmetar«!

balističkim!) otklonima na konstantne struje I , trajno puštane kroz galvanometar (tako da C_0 ima značenje one jakosti struje koja, tekući trajno kroz galvanometar, izvodi otklon $\alpha = 1$; na pr. galvanometri navedeni u B-10. imali bi strujne konstante $C_0 = 10^{-9}$ A na mm skale (udaljene 1 m), odnosno $C_0 = 10^{-8}$ A na dio skale).

No osim toga veličina C_B ovisna je i o tromosti, odnosno titrajnom vremenu, te o prigušenju gibanja pomičnoga sistema galvanometra. Kako je međutim (po B-10.) prigušenje gibanja galvanometra ovisno u velikoj mjeri o veličini vanjskoga otpora priključenoga na galvanometar, ne može se naprosto govoriti o »balističkoj konstanti« nego, kod danoga galvanometarskoga sistema, treba fiksirati za koji se vanjski otpor R_v u smislu razmatranja iz B-9. i B-10., razumijeva ta konstanta. Zato i vrijednost balističke konstante, ako je eksperimentalno određena za određeni vanjski otpor R_v , vrijedi samo kod onih mjerenja kod kojih se vanjski otpor adjustira na istu vrijednost R_v .

U praksi se balistička mjerenja redovno vrše tako da dolaze samo dva slučaja prigušenja: bilo kod galvanometarskoga kruga zatvorenoga graničnim vanjskim otporom $R_v = R_a$ (B-10.), dakle u »*aperiodskom graničnom slučaju*«, bilo opet, ako prilike zahtijevaju, uz »*otvoreni galvanometar*«, dakle s beskonačno velikim vanjskim otporom R_v u kojem slučaju galvanometar ima relativno slabo prigušenje i, kako ćemo još vidjeti, manju balističku konstantu (dakle veću balističku osjetljivost), nego u aperiodskom graničnom slučaju.

Prema tomu je za praksu redovno dosta ako se znade ili odredi balističkoj konstanti vrijednost u *aperiodskom graničnom slučaju*; u buduće rezervirajmo za tu vrijednost oznaku C_B ; te vrijednost za *otvoreni galvanometar*, koja neka bude označena sa C_B' . Obje je lako eksperimentalno odrediti, pa se na pr. C_B' određuje metodom izbijanja normalnog kondenzatora (kondenzatora točno poznatoga kapaciteta), a C_B s pomoću normalnoga (točno poznatoga) međusobnoga induktiviteta (a ima i drugih metoda).

53. Kod baždarenja otvorenoga balističkoga galvanometra izbijanjem kondenzatora, u koju svrhu mora stajati na raspolažanju precizioni kondenzator točno određenoga kapaciteta C , nabije se po shemi na sl. 124. kondenzator uz preklopku P okrenutu desno na poznati napon U , udešen na djelatelju napona R , a zatim se preklapanjem preklopke P s izvora struje na istraživani galvanometar G izazove trenutno ispražnjenje kroz galvanometar množine elektricitete $Q = CU$ koju je kondenzator kod nabijanja u sebe primio, pa se motri balistički otklon

galvanometra α_1 . Kako je s jedne strane $Q = CU$, a s druge $Q = C_B' \alpha_1$, to izlazi za balističku konstantu iznos:

$$C_B' = CU/\alpha_1 \quad (I)$$

Primjer: Normalni kondenzator kapaciteta $0,1 \mu F$, nabijen na $60 V$, dao je kod izbijanja otklon $100 mm$ na skali balističkoga galvanometra sa zrcalom, udaljenoj $1 m$. Balistička konstanta jest $0,1 \times 10^{-6} \times 60/100 = 0,06 \cdot 10^{-6}$ (dakle $0,06$ mikrokulona po mm skale udaljene $1 m$).

54. Kad je jednom na spomenuti način određen iznos C_B' mogu se otklonima balističkoga galvanometra mjeriti množine elektricitete $Q = CU$ što se oslobađaju kod izbijanja kondenzatora. Specijalno se tako, kod poznatoga U , mogu balistički mjeriti nepoznati kapaciteti C_x po jednadžbi: $C_x = C_B' \alpha_x / U$. Ovakva *balistička mjerenja kapaciteta* mogu se međutim izvoditi, kod danoga stalnoga nabijanja napona U , a da se ni ne odredi konstanta C_B' . Ako se naime izbiju kroz balistički galvanometar redom kondenzatori poznatoga kapaciteta C i nepoznatoga C_x , nabijeni na isti napon U , pa se očitaju pripadni balistički otkloni α_1 i α_x , onda očito mora vrijediti proporcija:

$$C_x : C = \alpha_x : \alpha_1$$

iz koje se odmah dobiva C_x . Ovako nabijanjem određenim naponom U i balističkim izbijanjem mogu se određivati i kapaciteti proba kabela; iz dobivenih se rezultata lako zaključiti na iznos kapaciteta po jedinici duljine kabela na temelju činjenice da je kapacitet kabela proporcionalan s duljinom kabela.

Nepriliku kod ovih mjerenja mogu činiti, kod kondenzatora s jako lošim dielektrikumom, izbijanja kondenzatora kroz vlastiti dielektrikum za vrijeme preklapanja od izvora struje na balistički galvanometar, pojavi »zaostataka naboja« u ovakovim kondenzatorima i sl. Međutim za mjerenja kapaciteta ima osim ove balističke i one s gubitkom naboja (D-25.) i drugih metoda, poimence po principu mostova za izmjenične struje, o kojima će se posebno govoriti.

55. Mjerenje kapaciteta balističkom metodom može se primijeniti i kod određivanja mjesta prekida u kabelima, za koje određivanje smo već rekli (D-9.) da izlazi na mjerenje kapaciteta otsječaka kabela. Izmjere li se balistički kod kabela duljine l , s prekidom (bez dozemnoga spoja) u udaljenosti x od početka kabela, kapaciteti obih odlomaka kabela, mjereći redom na jednom i na drugom kraju kabela, dobiveni otkloni α_1 i α_2 , bit će očito proporcionalni kapacitetima, a po tomu i duljinama x i $l - x$ obih odlomaka kabela (od početka do »mjesta prekida« i od »mjesta prekida« do dalekoga kraja kabela, i iz relacije $\alpha_1 : \alpha_2 = x : (l - x)$ izlazi odmah za traženu udaljenost: $x = \alpha_1 l / (\alpha_1 + \alpha_2)$).

56. Pri određivanju balističke konstante, uz priključen galvanometru vanjski otpor kritičkog iznosa R_a , iskorišćuje se množina elektricitete koja, po zakonima elektromagnetske indukcije, projuri kroz strujni krug sekundarnoga svitka S_2 nekog poznatog međusobnog induktiviteta M , kad se struja I u primarnom svitku S_1 tipkom T prekine ili ukopča, t. j. promijeni trenutno za iznos I , ili kad se komutira komutatorom (kao K na sl. 82.), što ima dvostruki učinak, jer se struja promijeni od $+I$ na $-I$, t. j. svega za $2I$. Po zakonima elektromagnetske indukcije i po definiciji koeficijenta međusobne indukcije M množina elektricitete kod promjene struje za iznos I jednaka je

$$Q = MI/R_2 \quad (II)$$

gdje je R_2 ukupni otpor sekundarnoga kruga struje, dakle u promatranom slučaju otpor sastavljen od otpora R_g galvanometra, otpora R' svitka S_2 i nekoga sekundarnomu krugu dodanoga otpora R'' tolike veličine, kolika je potrebna da se R' nadopuni na »vanjski granični otpor« galvanometra R_a , tako da je R_2 baš udešeno na iznos $R_g + R_a = R_g + R' + R''$ za koji se C_B određuje. Ako se sad otporom za reguliranje R (sl. 125.) udesi prikladni iznos primarne struje I kroz svitak S_1 , uzimane iz baterije B i mjerene ampermetrom A pa se tipkom T_1 (kod zatvorene tipke T_2) struja I ukopča (ili iskopča), nastat će u sekundarnom krugu strujni udar (Stromstoss) s ukupnom množinom elektricitete Q , određenom formulom (II), i galvanometar će izvesti po relaciji $Q = C_B \alpha$ balistički otklon α , koji se opažanjem odredi. Izlazi dakle jednadžba

$$C_B \alpha = MI/R_2 = MI/(R_g + R_a) \quad (III)$$

iz koje se jedina nepoznanica C_B može odmah izračunati.

57. Kad je jednom C_B na opisani način određeno, mogu se obrnuto balističkim galvanometrom mjeriti drugi nepoznati koeficijenti međusobne indukcije. Postupak je kao gore, samo što sada u relaciji (III) nije nepoznata veličina C_B , nego veličina M koeficijenta međusobne indukcije.

Tako se na pr. mogu određivati stepeni induktivnoga vezanja dvaju svitaka s poznatim samoinduktivitetima L_1 i L_2 u različitim međusobnim položajima. A mogu se, kad je jednom C_B po gore opisanoj metodi (ili kojoj drugoj, jer ima ih više) određeno za galvanometar u aperiodskom graničnom slučaju gibanja, balistički mjeriti i sve druge veličine koje direktno ili indirektno ovise o množini elektricitete Q , protekloj kroz galvanometar za vrijeme vrlo kratkoga strujnog udara. Tako se specijalno ovakova balistička mjerenja iskorišćuju za određivanje krivulje magnetske indukcije B^* (gausi) u ovisnosti od jakosti magnetskoga polja H^* (erstedi), odnosno H (A/cm), o čemu će biti govora u poglavlju o magnetskim mjerenjima.

No kod svih ovih mjerenja bitno je, da se mora sekundarni krug uvijek udesiti na iznos otpora $R_g + R_a$, uz koji je i određivanje balističke konstante obavljeno, pa kako sam potrošač redovno nema onoliko oma koliko odgovara otporu R_a graničnoga vanjskoga otpora. galvanometra, mora se uvijek dodavati potrebiti broj oma otporom R'' sa sl. 125. da ukupni vanjski otpor ispadne baš R_a .

Primjer: Galvanometar sa $R_g = 800 \Omega$ i $R_a = 200 \Omega$ baždari se normalom međusobnoga induktiviteta $0,01 \text{ H}$, kome sekundarni svitak ima otpor $R' = 5 \Omega$. Uzme se $R'' = 195 \Omega$ i ukopča se, kod zatvorene tipke T_2 , tipkom T_1 struja $I = 0,5 \text{ A}$, zbog čega balistički galvanometar načini otklon 100 dijelova skale. Izlazi, zbog $R_g + R_a = 1000$, za C_B u kulonima (ampersekundama) po dijelu skale:

$$C_B = 0,01 \times 0,5 / (1000 \times 100) = 0,05 \times 10^{-6}$$

58. Vrijednosti balističke konstante dadu se za različita prigušenja, a prema tomu i za galvanometar kad je otvoren i kad je u aperiodskom graničnom stanju gibanja, i *teoretski* izračunati uz uvjet da su poznati (ili da se eksperimentom odrede) ovi podaci o galvanometru: a) strujna konstanta C_0 ; b) puno titrajno vrijeme T_0 galvanometarskoga sistema⁴⁾ kad ne bi bilo prigušenja; c) prigušenje gibanja ili točnije »faktor prigušenja« k kod onoga vanjskoga otpora R_v galvanometra za koji se balistička konstanta određuje.

Faktor prigušenja k je omjer dvaju susjednih amplituda (otklona) na istu stranu kod galvanometarskoga sistema zanjihana i puštena da slobodno titra; na pr. ako neki galvanometar, njišući oko nule skale, ide desno 125 mm , lijevo 100 mm , desno 80 mm , lijevo 64 mm , i tako dalje uvijek u istom omjeru manje, faktor prigušenja k bio bi $125/80 = 100/64 = 1,562$. Kod potpuno neprigušenoga gibanja trebalo bi očito staviti $k = 1$, a kod postepeno sve većih prigušenja k bi rastao u beskonačnost kod približavanja prigušenju graničnoga aperiodskoga stanja.

59. Formula za proračunavanje balističke konstante kod ma kojega prigušenja dosta je komplicirana, pa je ne ćemo ovdje ni navoditi, osim za dva krajnja slučaja kad postaje jednostavna, naime za aperiodski granični slučaj, kad glasi:

$$C_B = C_0 T_0 e / 2\pi \quad (I)$$

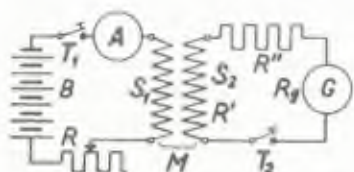
(gdje e znači broj $2,718 \dots$, »bazu prirodnih logaritama«) i za idealni slučaj potpuno neprigušenoga galvanometra, kad vrijedi relacija:

$$C_B'' = C_0 T_0 / 2\pi \quad (II)$$

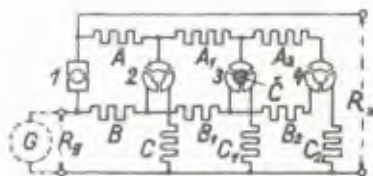
⁴⁾ Titrajno vrijeme balističkoga galvanometra treba da je relativno veliko, jer se onda očitavanje balističkoga otklona može izvesti udobnije i pouzdanije.

Vrijednosti kod različitih konačnih prigušenja galvanometra leže između obih navedenih skrajnosti. Za otvoreni galvanometar jednostavna formula $C_B'' = C_0 T_0 / 2\pi$ već se redovno ne može primijeniti, jer već i njegovo gibanje nije posve bez prigušenja. Kako se vidi, kod aperiodskog graničnog slučaja s vanjskim otporom $R_V = R_0$ balistički galvanometar ima veću balističku konstantu, dakle manju balističku osjetljivost, nego sa $R_V > R_0$, kad titra.

Međutim metode određivanja C_B i C_B' eksperimentalnim putem s pomoću normala M i C (ili drukčije) praktički su prikladnije kao direktnije i pouzdanije, pa se redovno balističke konstante najradije eksperimentalno određuju.



Sl. 125.



Sl. 126.

60. Interesantan problem predstavlja proračunavanje porednih otpora za smanjivanje osjetljivosti balističkih galvanometara. Kad je balistički galvanometar previše osjetljiv za mjerenje neke određene količine elektricitete Q , njegova se osjetljivost ne smije smanjiti naprosto time da se galvanometru doda jednostavni shunt poput onih kod ampermetara, tako da od ukupne množine elektricitete projuri kroz galvanometar tek dio, veći ili manji već prema osjetljivosti galvanometra, a sva preostala količina bude odvedena kroz shunt. To je zato neizvedivo ovako jednostavnim načinom, jer s druge strane poredni otpor prema galvanometru predstavlja samo granu paralelnu otporu R_2 , već prije priključenomu na galvanometar, pa kako je shunt redovno malenoga omskoga iznosa, a njegova kombinacija u paralelni spoj sa R_2 predstavlja još manje oma vanjskoga otpora, često malo ne kratki spoj galvanometra, to galvanometar dolazi dodavanjem shunta u posvema poremećene prilike prigušenja. On dobiva jače prigušenje kod koega ne vrijedi više konstanta C_B aperiodskoga graničnoga slučaja za koji je baždarenje galvanometra vršeno, i mjerenje, uz supoziciju da vrijedi još prvobitna balistička konstanta, ispalo bi posvema iskrivljeno.

Međutim, ako se stvar podvrgne bližemu matematskomu razmatranju, problem porednih otpora za balističke galvanometre kod kojih se balistička osjetljivost galvanometra povoljno

snizuje a da se ne mijenja vrijednost balističke konstante, izlazi ipak rješiv, samo što se moraju upotrebljavati nešto kompliciranije kombinacije otpora poznate pod imenom *poredni otpori za balističke galvanometre*.

Kod njih je postignuto s jedne strane da se struja razgranjuje tako da kroz galvanometar teče samo određeni dio, na pr. desetina, a ostatak da ide kroz shunt, a s druge strane da istodobno na stezaljke galvanometra ostaje uvijek priključena kombinacija otpora ekvivalentna u zajednici s otporom priključenoga izvora množine elektricitete stalno istom, i to baš graničnom vanjskom otporu R_a galvanometra, za koji se C_B galvanometra jednom za uvijek odredi.

Spoj ovakovih specijalnih shuntova, kojih račun ne ćemo ovdje iznositi, a koji se mogu nabaviti za određeni galvanometar sa danim R_g i R_a , jest kao u shemi na sl. 126., u kojoj su predviđena četiri stepena osjetljivosti balističkoga galvanometra na pr. 1/1, 1/10, 1/100 i 1/1000, koji se postizavaju stavljanjem čepa Č¹⁾ kod 1, 2, 3 ili 4. Otpori A , A_1 , odn. A_2 ; B , B_1 , odn. B_2 ; te C , C_1 , odn. C_2 računaju se, uz zadano R_g i R_a i dane stepene osjetljivosti, po posve određenim formulama. Lijevo se priključi galvanometar otpora R_g , a desno na pr. svitak S_2 istraživanoga međusobnoga induktiviteta, kome otpor R' mora međutim biti nadopunjen do iznosa R_a dodavanjem otpora R'' , kako smo to već prije imali. Kod čepa utaknutoga kod 1 galvanometar uopće nije shuntiran i ima najviše (1/1) osjetljivosti, dok kod čepa utaknutoga u trodjelne tuljce kod 2, 3 i 4 galvanometar postaje postepeno sve jače shuntiran i prema tomu manje osjetljiv, a da ipak ostaje u svim slučajevima isti vanjski otpor galvanometra kao i kod neshuntiranoga galvanometra.

Primjer: Za kombinaciju porednih otpora po shemi u sl. 126. sa 4 stepena osjetljivosti u omjeru 1 : 10 : 100 : 1000 izlaze računom, uz supoziciju da se radi o galvanometru sa $R_g = 1000 \Omega$ i $R_a = 480 \Omega$, ovi iznosi za pojedine otpore (u omima):

$$A = B = 352,7; A_1 = B_1 = 112,7; A_2 = B_2 = 13,2$$

$$C = 150,3; C_1 = 14,8; C_2 = 1,479$$

i sad je lako uvjeriti se na konkretnom numeričkom primjeru da kod svih osjetljivosti, udešenih čepom u različitim položajima, vanjski otpor galvanometra ostaje uvijek 480Ω .

¹⁾ Usporedi ATM J 727-1, gdje je donesena kombinacija ekvivalentna onoj u sl. 126., ali s premještanjem dvaju čepova kod prelaza s jedne osjetljivosti na drugu.

EJ OSNOVNA MJERENJA IZMJENIČNIM STRUJAMA

I. IZ TEORIJE IZMJENIČNIH STRUJA

1. Problemi i postupci mjerenja mnogo su raznoličniji kod izmjeničnih struja nego kod istosmjernih.

Jedan je tomu razlog što kod izmjeničnih struja dolazi veći broj novih veličina, jer na pr. pored mjerenja radnoga (omskoga) otpora R tu ima i mjerenja prividnoga otpora (impedancije) Z , praznoga otpora (reaktancije) X , zatim mjerenja frekvencije f , pa pomaka faza φ između napona E i struje I , onda pored mjerenja pravoga učina $N = EI \cos \varphi$ još i onih praznoga učina $N' = EI \sin \varphi$, te prividnoga $N'' = EI$.

K tomu su zakoni izmjeničnih struja kompliciraniji, pa prema tomu metode mjerenja pružaju više mogućnosti primjena, kako je to na pr. slučaj kod mostova izmjenične struje.

Napokon kod mjerenja mjernim instrumentima velik se dio mjerenja izmjeničnom strujom umjesto direktnim priključkom instrumenata izvodi indirektno, posredstvom mjernih transformatora (Messwandler, instrument transformers), kojih svojstva i upotreba zahtijevaju opširnija razmatranja.

2. Od velikoga utjecaja na metode mjerenja izmjeničnim strujama može biti *frekvencija*. Ako i ima aparata, kao što su to po B-42, na pr. mnogi instrumenti s termoprelvaračima, koji su upotrebljivi od najnižih frekvencija upotrebljavanih u tehnici pa do ekstremno visokih frekvencija radiotehnike, ipak treba uglavnom razlikovati aparate i metode mjerenja prikladne unutar područja niskih tehničkih frekvencija (na pr. 50 Hz ili slično), zatim one iz područja *tonfrekventne* (srednjofrekventne) tehnike (recimo do 10 000 ili 15 000 Hz), dok su metode mjerenja *radiofrekventne* (visokofrekventne) mjerne tehnike pogotovo područje za sebe. Ovdje će se uglavnom obraćati pažnja u bitnosti mjerenjima izmjeničnim strujama tehničkih (niskih) frekvencija i srednjih frekvencija.

3. Za *dublje* razumijevanje kasnijih izvoda bit će od koristi da se najprije po mogućnosti ukratko rekapituliraju najvažniji pojmovi i odnosi iz teorije izmjeničnih struja.

Matematski najjednostavnije i istodobno praktički najvažnije od »izmjeničnih«, t. j. periodski promjenljivih, čas pozitivnih, čas negativnih veličina, jesu one kojima se iznos vremenski mijenja po zakonu *sinusa*, ili kako se također kaže: po zakonu *jednostavnoga titranja*. Već smo kod instrumenata sa suhim

ispravljačem govorili (B-38.) o takvim *sinusoidnim* veličinama kojih se vremensko variranje dađe prikazati krivuljom sinusoidom kao na sl. 28. (str. 39.) s *momentanim* iznosima (iznosima u određeni čas) prikazane veličine kao ordinatama. A upoznali smo tamo i pojmove *tjemene* (najveće), *efektivne*, te *aritmetičke srednje* vrijednosti, kao i činjenicu da se u specijalnom slučaju sinusoidnih izmjeničnih veličina spomenute tri vrijednosti odnose kao $1,57 : 1,11 : 1$, što se može izraziti i tako da se kaže da za taj specijalni slučaj *tjemeni faktor* (po B-38. omjer tjemene i efektivne vrijednosti, dakle ovdje iznos kvocijenta $1,57 : 1,11$) ima vrijednost $\sigma = 1,414 (= \sqrt{2})$, a *faktor oblika* (omjer efektivne vrijednosti prema aritmetičkoj srednjoj) vrijednost $\xi = 1,11 = \pi/(2\sqrt{2})$.

Lako je sada, s nešto razmišljanja, razabrati da se momentani iznos sinusoidne izmjenične veličine, na pr. momentani iznos e sinusoidnoga izmjeničnoga napona tjemene vrijednosti E_m , efektivne E i aritmetičke srednje E'' , ako je T trajanje jedne periode i prema tomu $f = 1/T$ *numerička frekvencija* (broj perioda u sekundi) promatraju izmjenične veličine, može za koji god moment t izraziti sinusom kuta¹⁾ $2\pi f \times t = \omega \times t$ pomnoženim s $E_m = E\sqrt{2}$, dakle relacijom:

$$e = E_m \cdot \sin \omega t = E\sqrt{2} \cdot \sin \omega t \quad (I)$$

ako se samo početak brojenja vremena t podudara s početkom jedne periode (izvučena krivulja na sl. 127.). Kako se vidi, u ovakovim se slučajevima javlja u formulama veličina $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$, dakle 2π -kratnik *numeričke* frekvencije, koji je dobio ime: *kružna* frekvencija. Na pr. za izmjenične struje (numeričke) frekvencije 50 Hz veličina ω ima iznos $2\pi \times 50 = 314$.

4. Slično se momentani iznos i sinusoidne struje iste frekvencije može predočiti formulom:

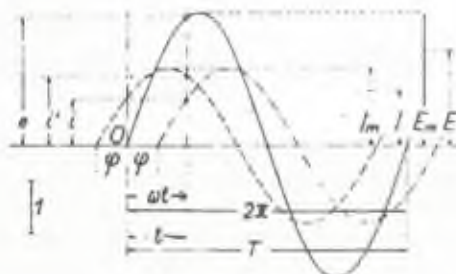
$$i = I_m \cdot \sin(\omega t - \varphi) = I\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - \varphi) \quad (II)$$

gdje su oznake uzete analogno kao u formuli (I). Pridodatkom *faznoga kuta* $-\varphi$ kutu ωt naznačeno je da je veličina prikazana formulom (II) pomaknuta *natrag u fazi* za kut φ prema veličini prikazanoj formulom (I), t. j. kod veličine (II) počeci periodâ, momenti maksimumâ itd. z a o s t a j u vremenski prema korespondentnim momentima veličina (I) za onoliki dio periode, koliki dio punoga kuta pretstavlja kut φ , odnosno za tomu kutu φ pripadni vremenski otsječak φ/ω (točka-crtkana krivulja na slici 127.).

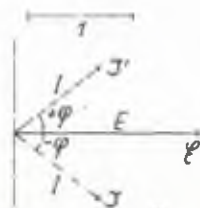
¹⁾ U »lučnoj« mjeri, gdje puni kut vrijedi 2π , ispruženi π , pravi $\pi/2$, itd.

Stavljanjem $+\varphi$ umjesto $-\varphi$ u formulu (II) naznačila bi se naprotiv struja i' , koja je pomaknuta prema naponu danom formulom (I) *naprijed u fazi* za kut φ (crtkana krivulja na sl. 127.), s istom tjemenom, a po tomu i istom efektivnom vrijednošću kao točka-crtkana, ali s protivnim pomakom faza.

5. Ovi se odnosi umjesto crtanjem cijelih sinusoida, kao na sl. 127., mogu ilustrirati i predočivanjem napona i struja *vektorkima*, t. j. veličinama određenoga iznosa i određenoga smjera, i to tako da se, u koordinatnom sustavu odabranom za bazu, nanesu iz ishodišta onolike dužine kolike odgovaraju *efektivnim* iznosima zadanih napona ili struja, i svaka pod onolikim kutom priklona prema pozitivnom smjeru osi apscisa koliko odgovara *faznom kutu* predočivane izmjenične veličine.



Sl. 127.



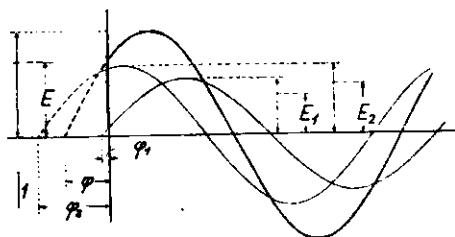
Sl. 128.

Tako bi odnosi izmjeničnih veličina prikazanih u sl. 127. trima krivuljama: izvučenom, točka-crtkanom i crtkanom bili predočeni u sl. 128. izvučenim vektorom $\mathcal{E}$ napona i točka-crtkanim, odnosno crtkanim vektorima $\mathcal{I}$ i $\mathcal{I}'$ struje (i to kvantitativno, uzevši u obzir mjerila naznačena uz svaku sliku).

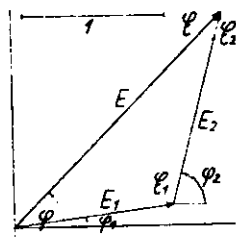
6. Uz preglednost opisanom se vektorskim predočivanjem postizava i prednost da se problem traženja efektivnoga iznosa i faznoga kuta izmjeničnih veličina koje rezultiraju iz više istovrsnih izmjeničnih veličina povoljnih efektivnih iznosa i povoljnih faznih kuteva svodi na obično konstruiranje »rezultante« po zakonu paralelograma. Ako na pr. treba sastaviti dva izmjenična napona prikazana tanko izvučenim sinusoidama u sl. 129., koji su superponirani jedan drugomu u nekom krugu struje tako da im se momentani iznosi e_1 i e_2 sumiraju u napon $e = e_1 + e_2$, onda, umjesto da se crtanjem ili računom određuje krivulja koja prikazuje vremenski tok vrijednosti e (debelo izvučena sinusoida u sl. 129.), pa da se istom iz dobivene krivulje, odnosno njezinoga matematskoga izraza, potraži efektivna vrijednost E i fazni kut φ ukupnoga napona iz efektivnih iznosa E_1 i E_2 , te faznih kutova φ_1 i φ_2 zadanih napona, mogu se naprosto, po shemi u

sl. 130. koja i kvantitativno odgovara odnosima u sl. 129. uzevši u obzir mjerila naznačena u obim slikama, nanijeti pripadni vektori $\mathcal{E}_1$ i $\mathcal{E}_2$ s iznosima E_1 i φ_1 , odnosno E_2 i φ_2 , pa se konstrukcijom rezultante $\mathcal{E}$ obih vektora dolazi odmah do E i φ .

Slično se određuje kod razgranjivanja izmjeničnih struja vektor ukupne struje $\mathcal{I}$ kombiniranjem u rezultantu vektora struja u pojedinim ograncima, na pr. vektora $\mathcal{I}_1$ i $\mathcal{I}_2$ u slučaju razgranjivanja u dvije grane.



Sl. 129.



Sl. 130.

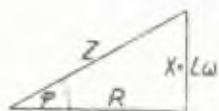
7. Ove su prethodne primjedbe bile potrebne zbog razumijevanja pojma *prividnoga otpora*, vrlo važnoga za kasnija razmatranja. Na taj pojam dolazi se prirodno na temelju poblizih razmatranja odnosâ u krugovima izmjenične struje. Ako se na pr. uzme potrošač koji osim određenoga otpora R ima i neki određeni stalni (samo)induktivitet L , opažanja pokazuju da, kod primjene sinusoidnoga izmjeničnoga napona efektivnoga iznosa E , nastala izmjenična struja, i sama sinusoidna te iste frekvencije kao i napon, ima efektivni iznos I manji nego što bi odgovaralo jednostavnoj formuli $I = E/R$, analognoj običnom Ohmovu zakonu za istosmjerne struje i upotrebljivoj kod izmjeničnih struja samo u vrlo specijalnim slučajevima računanja struja kroz »čiste« otpore R , t. j. kad praktički nema induktiviteta; osim toga nastala struja pokazuje općenito neki *pomak* (i to u promatranomu slučaju *zaostajanje*) faza φ prema primijenjenomu naponu. Tako, ako je napon zadan gore rastumačenom formulom oblika (I), nastala struja ima općenito oblik naznačen formulom (II), u kojoj su I i φ veličine koje treba odrediti.

Stvarni razlog opisanim odnosima leži u učincima elektromotornih sila samoindukcije izazvanih u potrošačima sa samoinduktivitetom neprestanim mijenjanjem jakosti struje; te su elektromotorne sile svojim iznosom u svakom momentu proporcionalne u jednu ruku samoinduktivitetu, a u drugu brzini mijenjanja jakosti struje. No čisto formalno tražene veličine I i φ mogu se dobiti jednostavno uz pomoć obih relacija:

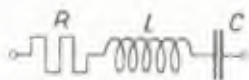
$$I = E/Z \quad \text{tg} \varphi = L\omega/R = X/R \quad (\text{III})$$

u kojima se javlja neka veličina $Z = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2}$ oma, nazvana

prividni otpor ili impedancija, odnosno komponente te veličine, naime veličina R , koju ćemo odsad točnije zvati *radni* ili *omski* otpor, i veličina $X = L\omega$ ($= 2\pi f$ -kratnik induktiviteta L), nazvana *prazni otpor* ili reaktancija. Kako se vidi, Z se iz R i iz $X = L\omega$ ne dobiva jednostavnim »algebarskim« zbrajanjem, nego na način koji odgovara »geometrijskom« sastavljanju po zakonu paralelograma (»geometrijskom« zbrajanju) dvaju okomitih duljina s iznosima R i X u rezultantu iznosa Z , tako da se R i X mogu pretstaviti katetama jednoga pravokutnoga trokuta, t. zv. »trokuta otpora« kao na sl. 131., kome je hipotenuza, po Pitagorinu poučku, »iznos« Z prividnoga otpora. Iz konstrukcije u sl. 131. slijedi onda i relacija $\operatorname{tg} \varphi = L\omega/R$ sama po sebi, ako samo φ znači kut između R i Z , t. zv. »fazni kut« prividnoga otpora, jer je tangens nekoga kuta u pravokutnom trokutu omjer suprotne i susjedne katete.



Sl. 131.



Sl. 132.



Sl. 133.

8. Ovi rezultati dadu se proširiti i na općeniti slučaj da je potrošaču s radnim otporom i induktivitetom pridodan još u seriju i kondenzator kapaciteta C , što praktički izlazi na to da bi izmjenični napon bio primijenjen na serijski spoj simbolički prikazan u sl. 132.

U tomu slučaju pored učinaka samoindukcije pridolaze (i imaju utjecaja na efektivni iznos i fazni pomak nastale struje) još i učinci izmjeničnoga nabijanja i izbijanja kondenzatora. No izrazi za I i φ ostaju i ovomu slučaju analogni onima u (III) s tom jedinom razlikom da se prazna komponenta X prividnoga otpora kod serijskoga spoja kao u sl. 132. drukčije računa, naime kao algebarska razlika »induktivnoga« otpora $L\omega$ i »kapacitivnoga« otpora $1/C\omega$ (sl. 133.), pa izlaze relacije »općega Ohmova zakona« za izmjenične struje:

$$I = E/Z \quad \operatorname{tg} \varphi = X/R \quad X = L\omega - 1/C\omega \quad Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (\text{IV})$$

Zakon predložen formulama (IV) obuhvata dakako, kao specijalne primjere, i slučajeve već promatranoga serijskoga spoja radnoga otpora i induktiviteta [dakle slučajeve gdje nema kapacitivnoga otpora, pa zbog $1/C\omega = 0$ izlaze rezultati obuhvaćeni formulama (III)]; zatim slučajeve kad u seriji s radnim otporom ima samo kapaciteta (a ne i induktiviteta), pa je struja *naprijed* u fazi prema naponu; onda granične slučajeve kad uz konačni iznos praznoga otpora X , čisto induktivnoga ($X = L\omega$) ili čisto kapacitivnoga

($X = -1/C\omega$), radni otpor konvergira prema nuli, pa pomak faza struje prema naponu teži prema graničnom iznosu $+\pi/2$, odnosno $-\pi/2$; ili obrnute slučajeve kad $X = L\omega$, odnosno $X = -1/C\omega$ iščezava prema R , pa pomak faza između struje i napona konvergira prema nuli, t. j. struja dolazi u fazu s naponom; napokon i slučajeve *rezonancije* kad kod serijske kombinacije radnoga otpora, induktiviteta i kapaciteta kod zadane kružne frekvencije ω vrijedi baš relacija $L\omega = 1/C\omega$ (»uvjet rezonancije«), pa X iščezava i vrijede (kod spomenute vrijednosti ω) naprosto formule $I = E/R$ i $\operatorname{tg}\varphi = \varphi = 0$. Konačno se na formule (IV) dadu svesti i kompliciraniji spojevi s više različitih i različito spojenih radnih otpora, induktiviteta i kapaciteta. Kako se vidi, već prema prilikama iznos X , a s njime i kut φ određen relacijom $\operatorname{tg}\varphi = X/R$, mogu izići ne samo pozitivni (ili $= 0$), nego također i negativni (ako prazna komponenta prividnoga otpora sadrži samo član $-1/C\omega$, ili ako on prevladava prema $L\omega$).

9. Ono bitno što treba iz ovih razlaganja istaknuti jest da za proračunavanje jakosti i faznih prilika struje, proizvedene zadanim izmjeničnim naponom kroz spoj u kome pored radnoga otpora može biti po volji i induktiviteta i kapaciteta stoji na raspolaganju »prividni otpor«, karakteriziran »iznosom« Z i »faznim kutom« φ , veličinama od kojih prva služi po formuli $I = E/Z$ za proračunavanje jakosti proizvedene struje, a druga direktno naznačuje pomak faza struje prema naponu (zaostatak ili napredak u fazi, već prema pozitivnomu ili negativnomu predznaku od X , koji je ujedno i predznak od φ), pri čemu je par veličina Z i φ vezan, na temelju druge i četvrte formule (IV), s »komponentama« prividnoga otpora: »radnim« otporom R i »praznim« otporom $X (=L\omega - 1/C\omega)$, dakle s jednim drugim parom veličina kojim se također može potpuno karakterizirati prividni otpor.

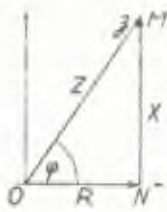
Na temelju ovih odnosa mogu se prividnim otporima (dakle fiksnim veličinama, a ne sinusoidno promjenljivima poput izmjeničnih struja, napona, magnetskih tokova itd.) također pridruživati vektori. Da se na pr. naznači prividni otpor zadan parom vrijednosti Z i φ , dovoljno je, kao na sl. 134., povući iz ishodišta O pravokutnoga koordinatnoga sistema vektor $\vec{3}$ duljine Z i priklona φ prema pozitivnom smjeru apscisne osi. Kod zadanih pak komponenata R i X vektor $\vec{3}$ određen je tim da su R i X apscisa i ordinata njegove krajnje točke M .

Ovaj način predočivanja ima prednosti. Radi li se na pr. o više prividnih otpora spojenih u seriju, nema zapreke da se ukupni prividni otpor cijele kombinacije potraži jednostavnim geometrijskim sumiranjem (traženjem rezultante) vektora pridruženih pojedinim prividnim otporima, kašto je to ilustrirano u sl. 135. na sastavljanju vektora $\vec{3}_1$ i $\vec{3}_2$ dvaju prividnih otpora određenih vrijednostima Z_1 i φ_1 , odnosno R_1 i X_1 , i vrijednostima

Z_2 i φ_2 , odnosno R_2 i X_2 , u rezultantu Z (s vrijednostima Z i φ , odnosno R i X). Kako se vidi, dolazi se na relacije:

$$R = R_1 + R_2 \quad X = X_1 + X_2 \quad (V)$$

10. Može se, međutim, u predočivanju prividnih otpora simbolima početi još za korak dalje iskorišćujući analogiju između vektora povučenih kao na sl. 134. s vektorima povučenima iz ishodišta koordinata do pojedinih točaka t. zv. »kompleksne ravnine«, naime ravnine pravokutnoga koordinatnog sustava čijim se točkama u matematici predočuju *kompleksne veličine*, t. j. veličine sastava po shemi $a + b \cdot j$ s »realnim« dijelom a i »imaginarnim« $b \cdot j$, gdje j znači imaginarnu jedinicu¹⁾ $\sqrt{-1}$. Kako



Sl. 134.



Sl. 135.



Sl. 136.

je poznato, spomenuto predočivanje vrši se tako da se veličini $a + b \cdot j$ pridijeli (sl. 136.) u kompleksnoj ravnini točka M s apscisom a , koja odgovara realnomu dijelu, i ordinatom b , koja odgovara imaginarnomu dijelu kompleksne veličine. Točke na apscisnoj (»realnoj«) osi predstavljaju prema tomu čiste realne brojeve, točke na ordinatnoj (»imaginarnoj«) osi čiste imaginarne brojeve, dok ostale točke, kao na pr. M u sl. 136., odgovaraju »kompleksnim«, t. j. od »realnoga« i »imaginarnoga« dijela sastavljenim brojevima.

Međutim po sl. 136. očito se svakoj kompleksnoj veličini oblika $a + b \cdot j$, odnosno točki M koja tu veličinu predstavlja, dade jednoznačno pridružiti *vektor* (s početkom u ishodištu koordinata O , a svršetkom u točki M), određen iznosom $OM = Z$ (koji se zove i *modul* kompleksne veličine $a + b \cdot j$) i kutom priklona φ dužine OM prema realnoj (apscisnoj) osi kompleksne ravnine (koji se kut zove i *argument* kompleksne veličine $a + b \cdot j$); pri tomu je: $Z = \sqrt{a^2 + b^2}$, $\operatorname{tg} \varphi = b/a$; resp. obrnuto: $a = Z \cdot \cos \varphi$, $b = Z \cdot \sin \varphi$.

¹⁾ Po samoj definiciji »imaginarne jedinice« j očito je: $j^2 = -1$; $j^3 = j^2 \cdot j = -j$; $j^4 = j^2 \cdot j^2 = +1$; itd. Dvije kompleksne veličine s jednakim realnim, a protivnim imaginarnim dijelovima, na pr. $a + bj$ i $a - bj$, zovu se »konjugirano kompleksne«; njihov je produkt (zbog $j^2 = -1$) realan broj $a^2 + b^2$.

Izlazi dakle interesantan rezultat da je u jednu ruku vektorom $\mathcal{Z}$ u sl. 134. moguće jednoznačno naznačiti prividni otpor iznosa Z i faznoga kuta φ , odnosno radne komponente R i prazne X , a u drugu ruku se, po sl. 136., s istim tim vektorom mogu smatrati jednoznačno pridruženi elementi a i b kompleksne veličine $a + b \cdot j$ uz jedini uvjet da je: $a = R$ i $b = X$. Vektor $\mathcal{Z}$ može se zato smatrati istodobno »pretstavnikom« i prividnoga otpora zadanog parom vrijednosti (R, X) i kompleksne veličine $R + jX$, određene istim parom vrijednosti (R, X) . Zato se umjesto vektorima, u daljoj simbolici, prividni otpori mogu reprezentirati također kompleksnim brojevima $R + jX$, jednoznačno određenima tima vektorima, tako da se simbolički može pisati $\mathcal{Z} = R + jX$. A u tomu slučaju veličine Z i φ , koje su od interesa kod prividnih otpora, identične su s modulom i argumentom kompleksne veličine $R + jX$ i računaju se iz formula:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad \operatorname{tg} \varphi = X/R \quad (\text{VI})$$

identičnih s četvrtom i drugom relacijom u (IV), dok se za obrnuti prelaz od Z i φ na R i X mogu, prema gore izloženomu, upotrebiti formule:

$$R = Z \cdot \cos \varphi \quad X = Z \cdot \sin \varphi \quad (\text{VII})$$

s pomoću kojih se $\mathcal{Z}$ umjesto sa $R + jX$ može predočiti¹⁾ također izrazom:

$$Z \cdot (\cos \varphi + j \sin \varphi) = Z \cdot e^{j\varphi} \quad (\text{VIII})$$

Primjeri: Prividni otpor pretstavljen je serijskom kombinacijom od 6Ω radnoga otpora i 8Ω praznoga induktivnog otpora. On se može izraziti kompleksnim brojem $\mathcal{Z} = 6 + 8j$. Za iznos toga prividnoga otpora izlazi iz relacije $Z^2 = 6^2 + 8^2 = 100$ vrijednost $Z = 10 \Omega$, a fazni kut φ računa se po formuli $\operatorname{tg} \varphi = 8/6 = 1,33$, čemu odgovara (u kutnim stupnjevima): $\varphi = 53,1^\circ$.

Obrnuto: U otporu zadanom vrijednostima $Z = 12 \Omega$ i $\varphi = -60^\circ$, što se kraće naznačuje i sa $12/-60^\circ$, radni otpor jest

$$R = 12 \cdot \cos (-60^\circ) = 6 \Omega,$$

a prazni $X = 12 \cdot \sin (-60^\circ) = -10,4 \Omega$ (zbog negativnoga predznaka veličine X radi se o čisto kapacitivnomu praznom otporu, ili o praznom otporu gdje prevladava član $-1/C\omega$ prema $L\omega$).

Postoje i posebne matematičke tabele za brzi prelaz od vrijednosti Z i φ na vrijednosti R i X ili obrnuto, a također brzo dadu se ove operacije izvesti logaritamskim računalom.

11. Velika je prednost simboličkoga predočivanja prividnih otpora kompleksnim veličinama da ono vodi na obične *algebarske*

¹⁾ Na temelju relacije poznate iz više matematike:

$$\cos \varphi + j \sin \varphi = e^{j\varphi}$$

gdje je $e = 2,718 \dots$ »baza prirodnih logaritama«.

operacije tamo gdje su kod upotrebe vektora potrebne *vektorske* operacije. Tako je na pr. u sl. 135. kod sastavljanja vektorâ dvaju kompleksnih otpora spojenih u seriju trebalo izvesti *vektorsku* (geometrijsku, po zakonu paralelograma) sumaciju, dok se isti rezultat uz pomoć kompleksnih veličina dobiva, analognu relaciji $R = R_1 + R_2$ za zbrajanje serijskih otpora kod istosmjernih struja, jednostavnom relacijom *algebarskog* zbrajanja:

$$R + jX = (R_1 + jX_1) + (R_2 + jX_2) = (R_1 + R_2) + (X_1 + X_2)j$$

iz koje se, izjednačivši realni dio lijevo i desno, a isto tako i imaginarni dio lijevo s onim desno, odmah dolazi na već poznate rezultate (V)

Primjer: U krugu izmjenične struje frekvencije $f = 50$ Hz upočani su u seriju: svitak radnoga otpora $R_1 = 26 \Omega$ i induktiviteta $L = 0,35$ H, čisti radni otpor $R_2 = 12 \Omega$ i kondenzator kapaciteta $22 \mu F = 22 \cdot 10^{-6}$ F. Koliki je prividni otpor cijele kombinacije i kakova će (po efektivnom iznosu i fazi) biti struja kod primijenjenoga napona 220 V? Kod frekvencije 50 Hz jest $\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 50 = 314$, pa za induktivni prazni otpor svitka izlazi vrijednost $L = 0,35 \cdot 314 = 110 \Omega$, a za kapacitivni prazni otpor kondenzatora vrijednost $-1/C\omega = -1/(22 \cdot 10^{-6} \cdot 314) = -145 \Omega$. Prema tomu svitak pretstavlja prividni otpor predöčen kompleksnim brojem $26 + 110j$, a otpor R_2 zajedno s kondenzatorom prividni otpor $12 - 145j$. Prividni otpor cijeloga spoja jest:

$$R + jX = (26 + 110j) + (12 - 145j) = 38 - 35j$$

i za njegov iznos Z i fazni kut φ dobivaju se po formulama (VI) vrijednosti:

$$Z = 51,5 \Omega \quad \text{tg} \varphi = -35/38 = -0,921; \quad \varphi = -42,6''$$

Struja proizvedena naponom 220V imat će (efektivnu) jakost $I = 220/51,5 = 4,27$ A i bit će pomaknuta *naprijed* u fazi prema naponu za kut $42,6''$ (jer kad je fazni kut φ prividnoga otpora negativan, fazni kut $-\varphi$ struje jest pozitivan. Kako je $\cos \varphi = R/Z = 38/51,5 = 0,738$, ukupni električki učin što ga cijela kombinacija troši jest:

$$N = EI \cos \varphi = 220 \times 4,27 \times 0,738 = 693 \text{ W}$$

12. U t. zv. *simboličkoj metodi* rješavanja problema izmjenične struje ide se još dalje, pa se i (sinusoidnim) izmjeničnim strujama, naponima itd., dakle periodski promjenljivim veličinama, pridjeljuju kao simboli kompleksni brojevi koji odgovaraju pripadnim vektorima tih veličina (s modulom kompleksne veličine jednakim efektivnom iznosu, a argumentom jednakim faznom kutu izmjenične veličine).

Kao rezultat ovoga načina postupanja izlaze, kako pobliža razmatranja pokazuju, *čisto formalno* zakonitosti izmjeničnih struja u relacijama potpuno analognima onima kod istosmjernih

struja. Tako se na pr. Ohmov opći zakon kod izmjeničnih struja za struju $\mathcal{I}$ što nastaje kod primjene napona $\mathcal{E}$ na kompleksni otpor $\mathcal{Z}$ može pisati po simboličkoj metodi naprosto u obliku:

$$\mathcal{I} = \mathcal{E}/\mathcal{Z} \quad (\text{IX})$$

u punoj analogiji s Ohmovim zakonom $I = E/R$ kod istosmjernih struja. Slično je i kod drugih osnovnih zakona. Na pr. kod zakona razgranjivanja struja i njihovih konsekvencija. Tako specijalno poznatoj formuli $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$ koja veže otpor R zamke sastavljene od dvije grane s otporima R_1 i R_2 obih grana odgovara u simboličkoj metodi posve jednako građena formula:

$$1/\mathcal{Z} = 1/\mathcal{Z}_1 + 1/\mathcal{Z}_2 \quad (\text{X})$$

Uvjetu pak ravnotežja običnoga Wheatstoneova mosta iz D-7. odgovara potpuno analogan uvjet ravnotežja svih Wheatstoneovih mostova za izmjenične struje:

$$\mathcal{Z}_1 : \mathcal{Z}_2 = \mathcal{Z}_3 : \mathcal{Z}_4 \quad (\text{ili: } \mathcal{Z}_1 \cdot \mathcal{Z}_4 = \mathcal{Z}_2 \cdot \mathcal{Z}_3) \quad (\text{XI})$$

gdje su $\mathcal{Z}_1$, $\mathcal{Z}_2$, $\mathcal{Z}_3$ i $\mathcal{Z}_4$ simbolički prividni otpori u četiri grane mosta; itd.

Dakako, kad se simboličke relacije detaljno razrade i uredi postupajući s kompleksnim veličinama po zakonima matematike, pa se na pr. u dobivenim izrazima izjednače moduli i argumenti lijevo i desno, ili realni i imaginarni dijelovi lijevo i desno, dobivaju se napokon, kako se to поближе pokazuje u teoriji izmjeničnih struja, iste realne relacije koje i vektorskom metodom.

Da se na pr. iz simboličke relacije (IX) dobiju formule (IV) općega Ohmova zakona za izmjenične struje, dovoljno je relaciju (IX) transkribirati u oblik

$$Ie^{i\varphi_I} = E/Z e^{i\varphi_Z} = (E/Z)e^{i\varphi} \quad (\text{XII})$$

s naponom predloženim realnim brojem E (efektivni iznos), dakle uz odabrani iznos 0 za fazni kut napona, te strujom i prividnim otporom predloženim pripadnim modulima i argumentima I i φ_1 (efektivni iznos i fazni kut struje), odnosno Z i φ (iznos i fazni kut prividnoga otpora). Odmah se, izjednačivši module lijevo i desno, dobiva relacija:

$$I = E/Z$$

u kojoj, zbog $\mathcal{Z} = R + jX = R + j(L\omega - 1/C\omega)$, treba za modul Z staviti:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (L\omega - 1/C\omega)^2}$$

Izjednačivši pak argumente lijevo i desno izlazi relacija $\varphi_1 = -\varphi$ uz:

$$\operatorname{tg} \varphi = X/R = (L\omega - 1/C\omega)/R$$

A to su sve baš relacije (IV).

13. Ono najbitnije za *električka mjerenja* što treba zadržati iz ovih kratkih razmatranja o rješavanjima problema izmjenične

struje, u koja na ovomu mjestu ne možemo i ne trebamo još dalje ulaziti, jest činjenica da se upotrebom kompleksnih veličina može i kod kompliciranijih spojeva poći od relativno jednostavnih simboličkih relacija izmjenične struje formalno jednako građenih onima kod istosmjerne struje. To često vrlo olakšava i čini — u izvjesnom smislu — preglednijim različite zadatke u vezi s razgranjivanjima, mostovima i sličnim problemima koji dolaze kod mjerenja s izmjeničnim strujama.

II. MJERNI OTPORI ZA IZMJENIČNE STRUJE. MJERNI KONDENZATORI I INDUKTIVITETI.

14. Kod mjerenja izmjeničnim strujama mjerni otpori obično moraju, kako je već u D-2. istaknuto, zadovoljavati strožim zahtjevima nego kod mjerenja istosmjernom strujom. Nije samo potrebno, kao kod istosmjernih struja, da su oni a) vremenski nepromjenljivi, b) temperaturno neovisni, nego je osim c) neovisnosti njihovoga iznosa o frekvenciji izmjenične struje još važno da su tako namotani da imaju d) što manje samoinduktiviteta, e) što manje vlastitoga kapaciteta, a konačno i f) njihov kapacitet prema zemlji, odnosno prema susjednim vodičima kod ugradnje u aparature, ima da bude što manji.

Otporima od manganina redovno je bez naročitih neprilika moguće udovoljiti sve do visokih tonskih frekvencija zahtjevima a) do c); no ako je vrijednost R mjernih otpora realizirana u protivnosti sa zahtjevima što manjega samoinduktiviteta i vlastitoga kapaciteta, oni se ne mogu dobro upotrebiti kod preciznih mjerenja, osobito u slučaju struja nešto viših frekvencija: u tonfrekventnom području.

U idealnom slučaju potpuno bi iščezavala, neovisno o frekvenciji izmjenične struje, komponenta X (prazni otpor), t. j. po sl. 131. fazni kut mjernoga otpora bio bi jednak 0, a njegov iznos Z bio bi jednak čistom radnom otporu R koji se otporom htio realizirati. No kako se, osobito kod većih iznosa otpora R , i kod najboljih načina namatanja opažaju još tragovi samoinduktiviteta L , za koji treba uzeti da je u seriji sa R , i vlastitoga kapaciteta, koji može biti predodčen kondenzatorom kapaciteta C koji treba zamišljati da je priključen paralelno serijskoj kombinaciji od R i L , to se u praksi ne ide potpuno za $L = 0$ i $C = 0$, nego se nula faznoga kuta φ postizava prikladnim *adjustiranjem* zaostalih vrijednosti L i C prema R .

Simboličkom se naime metodom dobiva da je fazni kut φ u promatranom slučaju određen relacijom:

$$\operatorname{tg} \varphi = \omega(L/R - RC - \omega^2 CL^2/R)$$

u kojoj se $\omega^2 CL^2/R$ može, kod neznatnih iznosa C i L , zanemariti prema $L/R - CR$. Prema tomu, da $\operatorname{tg} \varphi$, a s njim i φ postane jed-

nako nuli, treba da su C i L tako adjustirani prema R da izraz $L/R - CR$, nazvan »vremenska konstanta« mjernoga otpora, iščezava.

Vremenska konstanta ima dimenziju vremena (jer pomnožena sa $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$, dakle veličinom u kojoj dolazi recipročni iznos vremena T , mora dati tg kuta, t. j. veličinu bez dimenzija). Prema tomu bi jedinica vremenske konstante bila sekunda. Međutim kako se valjanim izvedbama danas dadu postići vanredno neznatne vremenske konstante, to se obično mjerni otpori za izmjenične struje karakteriziraju vremenskim konstantama izraženima u *nanosekundama* (milijardninama sekunde). Čim manji broj nanosekunda (kratica: ns), tim bolje po mjerni otpor.

15. Praktički se maleni iznosi vremenske konstante kod otpora za mjerenja izmjeničnim strujama postizavaju različitim specijalnim načinima namatanja. Kod već (u D-2.) opisanoga *bifilarnoga* namatanja (sl. 64. na str. 72.) dobivaju se otpori praktički bez samoinduktiviteta, no koji, kod većih duljina namotane žice, pokazuju kod prolaza izmjenične struje, zbog tijesne blizine dijelova namotaja između kojih vladaju velike razlike napona, relativno mnogo učinke vlastitoga kapaciteta. Ipak se za malene omske iznose mogu i kod izmjenične struje upotrebiti bifilarni namotaji.

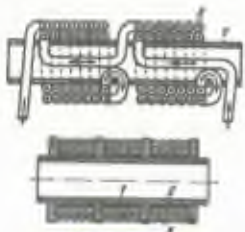
Kod većih duljina namotane žice upotrebljavaju se specijalni namotaji, kakvi su na pr. oni po *Curtisu* i *Groveru*, po *Chaperonu*, po *Wagneru* i *Wertheimeru*, itd. U principu se kod tih namotaja maleni kapaciteti postizavaju pazeći (na pr. »porazdjeljenjem« namotaja u više »sekcija«) da ne dodu u blizinu dijelovi namotaja između kojih kod prolaza struje nastaju veći naponi; pri tom se, zbog što manjega induktiviteta, namatanje zavoja izvodi po izvjesnom pravilu naizmjenice sad u ovomu, sad u onomu smislu.

Tako se na pr. po *Chaperonu* namotaj prema shemi u sl. 137. gore porazdjeli u sekcije u obliku svitaka s više slojeva, a malo zavoja po sloju. Smjer namatanja u pojedinim slojevima teče naizmjenice sad u jednom sad u drugom smislu. Kod namotaja po *Wagneru* i *Wertheimeru* po shemi u sl. 137. dolje svaki svitak (sekcija) namota se osim toga na vlastiti metalni nosilac (komadić metalne cijevi), a željeni veći iznosi mjernih otpora R dobivaju se serijskim spajanjem ovakvih svitaka, nataknutih zajedno s pripadnim metalnim nosiocima na zajednički nosilac od fibera (izolatora).

Praktički se ovakvim specijalnim namatanjima mogu postići i vremenske konstante kojih iznos (pozitivan ili negativan) unutar tonskoga područja frekvencija ne premašuje granicu od samo nekoliko nanosekunda!

16. Kod mjerenja izmjeničnim strujama dolaze mnogo kao veličine za usporedbu također induktiviteti (samoinduktiviteti L i međusobni induktiviteti M), te kapaciteti C .

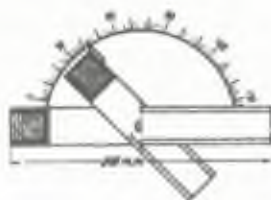
Kod *mjernih induktiviteta*, koji se realiziraju svicima ili kombinacijama svitaka, ne može se ići za tim da pored induktiviteta ne smije biti praktički ništa radnoga otpora R , jer se mjerni induktiviteti redovno izvode s pomoću svitaka bez željezne jezgre (da se izbjegne komplikacijama od nepravilnosti krivulje magnetiziranja i drugih pojava koje prate magnetiziranje željeza u izmjeničnom magnetskom polju), pa to zahtijeva već nešto veći broj zavoja, a upotrebljena žica uvijek ima neki otpor R . Traži se obično (uz vremensku konstantnost, temperaturnu i frekventnu neovisnost svitka, praktički nikakov vlastiti kapacitet namotaja i slično) da bar L bude, uz neko dozvoljeno strujno opterećenje, realizirano sa što manje otpora R žice, dakle da bude L što veće prema R , što izlazi na zahtjev da kvocijent L/R , a to je »vremenska konstanta« u promatranomu slučaju svitka sa L i R , bude ovaj puta što *veći*.



SI. 137.



SI. 138.



SI. 139.

Povoljan je na pr. iznos L/R kod svitka sa $L = 0.1$ H i $R = 20$ Ω , t. j. s vremenskom konstantom $0.1 : 20 = 0.005$ sekunda (= 5 milisekunda = 5000000 nanosekunda).

Kod »normala« samoinduktiviteta ide se za tim da se induktivitet dade izračunati iz dimenzija, rasporedaja i broja zavoja po formuli za proračunavanje induktiviteta. S ovima se onda mogu mjerenjem usporediti takovi mjerni induktiviteti kojima računanje induktiviteta ne bi bilo dovoljno pouzdano.

17. Mjerni samoinduktiviteti mogu biti po iznosu stalni (fiksni) i promjenljivi (varijabilni). *Fiksni* se za niske i tonske frekvencije realiziraju svicima namotanima na kojem prikladnom nosiocu (koji treba da je izolator koji po mogućnosti ne pokazuje gubitaka energije (ne smije imati tragova željeza), zatim mora biti dimenzija vremenski stalnih i temperaturno po mogućnosti neovisnih itd.). Takove nosioce daju na pr. porculan, serpentin, neke moderne keramičke mase (kao »kalit«) itd. Namotaj može biti u obliku cilindričkoga svitka ili u obliku prstenastoga (toro-

idnoga) svitka. Da se izbjegne utjecaju frekvencije zbog t. zv. «skin-efekta» (dobro poznatoga iz radiotehnike), upotrebljava se mjesto masivne žice za namatanje vodič porazdijeljen u veći broj međusobno izoliranih niti). Vanjski izgled jednoga ovakvoga stalnoga mjernog induktiviteta prikazuje sl. 138.

18. *Promjenljivi* samoinduktiviteti, i to kontinuirano promjenljivi, najbolje se realiziraju kombinacijom dvaju svitaka, jednoga nepomičnoga, a drugoga pomičnoga (obično vrtivoga) unutar prvoga. Svici se mogu spojiti bilo u seriju, bilo paralelno, tako da čine električki jednu cjelinu. Ako je sad na pr. upotrebljen serijski spoj, pa ako su L_1 i L_2 pojedinačni samoinduktiviteti svitaka, a M međusobni induktivitet za određeni međusobni položaj obih svitaka, ukupni samoinduktivitet cijele kombinacije jest, kako je lako pokazati:

$$L' = L_1 + L_2 + 2M \text{ ili } L'' = L_1 + L_2 - 2M$$

pri čemu treba uzeti lijevi ili desni izraz prema tomu da li se, kod protjecanja struje cijelom kombinacijom, magnetski tokovi obih svitaka podupiru ili slabe. Kako se dovadanjem pomičnoga svitka u različite položaje prema nepomičnom mogu veličini M davati različiti pozitivni i negativni iznosi, varirat će kod mijenjanja položaja pomičnoga svitka ukupni induktivitet između nekoga minimalnoga i nekoga maksimalnoga iznosa. Slično varira ukupni samoinduktivitet i kod mijenjanja međusobnoga položaja svitaka u paralelnom spoju.

19. Međusobni induktiviteti za mjerne svrhe realiziraju se slično kao i samoinduktiviteti, samo što tu oba svitka ostaju bez električke vodljive veze; jedino su vezani magnetski, međusobnim induktivitetom M . Prema tomu međusobni induktiviteti imaju dva para priključnih stezaljki. Kod međusobnih induktiviteta *stalne* vrijednosti M međusobni položaj obih svitaka je fiksni: oba su svitka u stalnom položaju na čvrstom nosiocu.

Tako bi se na pr. na nosiocu svitka u sl. 138. mogla zamisliti namotana umjesto jednoga dva svitka, svaki izveden na posebni par stezaljki. Kod vođenja zavoja jednoga svitka tijesno uz zavoje drugoga dobila bi se osobito čvrsta fiksna magnetska veza, dakle razmjerno velik fiksni iznos M .

Kod najtjesnije veze M dosegnuti maksimalno vrijednost određenu relacijom: $M^2 = L_1 \cdot L_2$, tako da na pr. uz $L_1 = L_2 = 0,01$ H izlazi i za M iznos 0,01 H.

20. Kod *promjenljivih* međusobnih induktiviteta jedan je svitak čvrst, a drugi se može vrtjeti (ili drukčije pomicati) u različite položaje prema prvomu (kao gore kod promjenljivih samoinduktiviteta), pa se tako može postići kontinuirano udešavanje različitih iznosa M .

Sl. 139. pokazuje kombinaciju dvaju svitaka kojima se magnetska veza daje mijenjati vrteći pomični svitak unutar nepomičnoga. Kombinacija daje promjenljivi samoinduktivitet, ako su oba svitka spojena u seriju ili paralelno u jednu cjelinu, ili promjenljivi međusobni induktivitet, ako su svici električki odijeljeni i svaki ima svoj par stezaljki.

21. Kapaciteti za mjerenja realiziraju se *mjernim kondenzatorima*, koji također mogu biti *stalnoga* ili *promjenljivoga* kapaciteta. Kondenzatori za mjerne svrhe moraju dakako udovoljavati uvjetima vremenske nepromjenljivosti, što manje ovisnosti o temperaturi itd. Osim toga od njih se, bili oni po iznosu kapaciteta C stalni ili promjenljivi, traži da pretstavljaju po mogućnosti čiste kapacitete, t. j. da ne pokazuju gubitaka energije kod priključka na izmjenične napone. Najbolje bi bilo uzeti kao dielektrikum između obloga uzduh; no »kondenzatorima s uzduhom« dađu se, s umjereno velikim dimenzijama, dosegnuti samo kapaciteti oko hiljadu ili najviše nekoliko hiljada pikofarada. Zato se kondenzatorima s uzduhom realiziraju samo maleni mjerni kapaciteti, i to naročito varijabilni (u obliku varijabilnih kondenzatora poznatih iz radiotehnike, sa sistemom vrtivih ploča koje zahvaćaju među čvrste). Za mjerne svrhe promjenljivi kondenzatori moraju dakako biti osobito precizno izvedeni, snabdjeveni precizionom skalom, te pomno baždareni.

Za veće kapacitete mogu se upotrebiti kondenzatori s tinjcem kao dielektrikumom. Ovi se kondenzatori također odlikuju neznatnim gubicima, a mogu se izvesti do vrlo velikih iznosa kapaciteta. Vrlo su dobri, i stalni u vrijednosti, također kondenzatori s dielektrikumom od novih specijalnih keramičkih dielektričkih masa malenih dielektričkih gubitaka, kao što su »kalit«, »tempa S« i slične.

22. Za mjerenja gdje su potrebni varijabilni veliki kapaciteti, na pr. do 1 mikrofarada, upotrebljavaju se *dekadske kombinacije* fiksnih kondenzatora, na pr. s tinjcem, kod kojih se više ili manje jedinica pojedinih dekadskih grupa ukapča pripadnim ručkama. Tako se s tri dekadске grupe po $10 \times 0,1 \mu F$, $10 \times 0,01 \mu F$ i $10 \times 0,001 \mu F$, ukapčavajući *paralelno* potrebni broj kondenzatora pojedinih dekadskih grupa, dađu realizirati (analogno postupku kod dekadskih »reostata s ručkama«, kod kojih se otpori međutim *serijski* ukapčaju) povoljni iznosi kapaciteta u skokovima po $0,001 \mu F$. Tako bi se iznos $0,854 \mu F$ dobio kombinirajući $8 \times 0,1 + 5 \times 0,01 + 4 \times 0,001$ mikrofarada.

Dakako da su ove kombinacije od mnogo precizno adjustiranih kondenzatora dosta skupe. Za potpuno kontinuirano variranje može se, po potrebi, dodati još paralelno ovakvoj dekadskoj kombinaciji s ručkama i varijabilni kondenzator s uzduhom s maksimumom kapaciteta u iznosu jedinice najniže dekade, dakle u promatranomu primjeru sa $0,001 \mu F$ ili $1000 pF$.

Osim u kombinacije s ručkama mogu se kondenzatori prikladno odabranih kapaciteta kombinirati u kutije s čepovima analogne reostatima s čepovima (D-4.), pa se čepovima potrebni veći ili manji broj kondenzatora može ukopčati u paralelni spoj, u kome se slučaju kapaciteti sumiraju. Neupotrebljeni se kondenzatori kratko spoje.

23. Osobitu pažnju zahtijeva gradnja precizionih kondenzatora neznatnih gubitaka za visokonaponska mjerenja, na pr. u »visokonaponskom Scheringovu mostu« o kome će kasnije biti govora. U tomu slučaju potrebna otpornost kondenzatora protiv električkoga proboja postizava se time da se kondenzator gradi s jako komprimiranim plinom kao dielektrikumom. Obično se uzima dušik stisnut na 15 atmosfera ili slično. Vrlo stisnuti plinovi mogu naime izdržati električka polja skoro jednako kao isto toliko debeli slojevi porculana i drugih dielektrika velike električke čvrstoće. A uz to su dielektrički gubici u stisnutim plinovima maleni. Kod dovoljne debljine sloja dielektrikuma između obloga visokonaponski mjerni kondenzatori s komprimiranim plinom prikladni su dakle i za mjerenja kod vanredno visokih napona. Dimenzije ovih kondenzatora nisu uostalom, unatoč relativno malenih iznosa njihovih kapaciteta, nipošto neznatne.

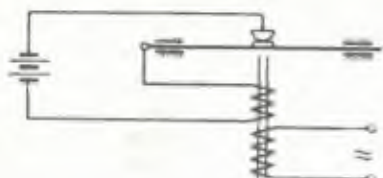
III. IZVORI STRUJE I NULINSTRUMENTI KOD MJERENJA IZMJENIČNIM STRUJAMA

24. Po naravi same stvari veliki dio mjerenja izmjeničnim strujama obavljat će se sa (ili na) već raspoloživim pogonskim izvorima izmjeničnih struja, na pr. sa strujama iz rasvjetne mreže, eventualno po potrebi stabiliziranim na po mogućnosti konstantnu vrijednost usprkos varijaciji napona mreže. (Takova stabilizacija može se postići recimo serijskim otporima od željeznih vodiča usjanih strujom u vodikovoj atmosferi ili drugim metodama).

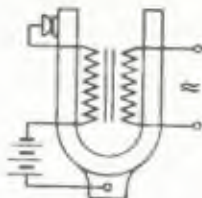
No ima slučajeva, naročito kod mjerenja s »mostovima« izmjenične struje, kad se želi raditi s višima, pa katkad još i kontinuirano promjenljivima frekvencijama tonfrekventnoga područja. Izvori (generatori) struje u tomu slučaju, t. zv. »zujala« (Summer, hummer) mogu biti vrlo različitih tipova. Mi ćemo ovdje o njima reći samo najbitnije.

25. Najjednostavnije zujalo jest obični prekidač struje na principu poznatoga Wagnerova batića (kao i kod električkoga zvonca). Razlika je samo u tomu, što su zujala za mjerne svrhe po principu prekidača snabdjevena perom koje se daje resonantno adjustirati na česte brze prekide, tako da nastale struje

izvode udobno visoke tonove (obično oko više stotina do hiljadu Hz) u priključenim telefonskim slušalicama. Još je razlika i u tomu, što se struje mjerenja uzimlju iz posebnoga, »sekundarnoga« namotaja, namotanoga na istu željeznu jezgru prekidača na kojoj je smješten i »primarni« namotaj (onaj kojim teče struja iz baterije ili akumulatora od malo volta koja se djelovanjem prekidača u brzom ritmu prekida i spaja). A mogu se struje prenositi na mjernu aparaturu i posebnim transformatorom.



Sl. 140.



Sl. 141.

Bolje izvedbe zujala s mehaničkim prekidanjem struje građene su po (samo na najbitnije ograničenoj) shemi u sl. 140. s obostrano učvršćenim perom s kontaktom u sredini (»magnetsko zujalo«). Još je bolje ako se iskoriste prekidi kontakta proizvedeni titrajima jedne glazbene viljuške po shemi u sl. 141. (»zujalo » glazbenom viljuškom«). Titraji pera na sl. 140., kao i titraji viljuške na sl. 141., podržavaju se djelovanjem magnetizma željezne jezgre transformatora, s čijega se sekundarnoga namotaja kod : uzimlje tonfrekventna struja. Kod zujala s glazbenom viljuškom frekvencija je fiksirana vlastitom frekvencijom (na pr. 800 Hz) upotrebljene glazbene viljuške, pa ako se traži druga frekvencija, mora se izmijeniti viljuška.

26. Nasuprot prednosti da su više ili manje jednostavni, svi tipovi zujala s mehaničkim prekidanjima struje pokazuju nedostatak da su dobivene tonfrekventne struje relativno dosta znatno »nesinusoidne«, t. j. da zapravo predstavljaju s mjesu »osnovnoga« člana, dakle sinusoidne struje »osnovne« frekvencije f (na koju je zujalo adjustirano) sa više ili manje istaknutim »višim harmoničkim« članovima koji, općenito, mogu biti frekvencija $2f$, $3f$, $4f$, itd.

Kod mjerenja neovisnih o frekvenciji to redovno ne smeta, ali kod mjerenja kod kojih frekvencija utječe na rezultat, kao što je slučaj kod mnogih mosnih spojeva, ovakove su struje neprikladne za mjerenja ili barem nepoželjne. Jer, ako se na pr. ravnotežje mosta konstatira nulinstrumentom koji reagira na sve članove u koje možemo zamisliti rastavljenu nesinusoidnu struju, nulinstrument ne će uopće moći pokazati ravnotežje (budući da će na pr. kod postignutoga ravnotežja za osnovni član

kroz nulinstrument još uvijek teći struja od viših harmoničkih članova).

Međutim ima sredstava da se može mjeriti i u ovakovim slučajevima, bilo da se upotrebi nulinstrument koji se može udesiti da resonantno reagira uglavnom samo na određenu frekvenciju (frekvenciju osnovnoga člana), bilo da se nesinusoidna struja iz zujala propusti kroz naročito »sito« ili »filar« sastavljen od prikladno kombiniranih induktiviteta i kapaciteta (»čistilac struje«, Stromreiniger, wawe filter) koji je građen na pr. tako da uglavnom lako propušta struje samo do određene frekvencije, tako odabrane, da član osnovne frekvencije može kroz sito proći, ali harmonički članovi više ne bivaју propuštani.

Učini što ih jednostavnija zujala mogu dati su relativno neznatni, katkad samo nekoliko milivata. No najbolja magnetska zujala po shemi u sl. 140. mogu dati već i nekoliko stotina mW, a ona s viljuškom po shemi u sl. 141. i više. A to je za obična mjerenja redovno obilno dovoljno.

Veći ili manji stepen nesinusoidnosti karakterizira se u ton-frekventnoj tehnici tako da se navede t. zv. *faktor distorzije* (izobličenja) D . Pod tim se razumijeva omjer drugoga korijena iz sume kvadrata efektivnih iznosa gornjih članova (frekvencija $2f$, $3f$ itd.) prema efektivnom iznosu osnovnoga člana s frekvencijom f . Za sinusoidu je $D = 0$; inače $D > 0$ daje mjerilo za odstupanje krivulje izmjenične veličine od sinusoide. Na pr. struja koja bi se sastojala od članova frekvencije f , $3f$, $5f$ i $7f$ s efektivnim iznosima 10; 0,8; 0,4 i 0,1 A imala bi faktor distorzije:

$$D = \sqrt{0,64 + 0,16 + 0,01}/10 = \sqrt{0,81}/10 = 0,09 \quad (\text{ili: } D\% = 9\%).$$

Struje iz magnetskih zujala imaju prilično visok D ; a i kod zujala s viljuškom, kad daju jače učine, D još nije neznatno.

27. Za proizvođenje struja bližih sinusoidi, za veće učine, te u slučajevima kad frekvencije mjernih struja treba da su lako kontinuirano promjenljive u širokim granicama, upotrebljavani su prije mnogo mali *mašinski* tonfrekventni generatori s valovito nazupčanim kotačem od željeznih limova kao rotorom. Uz rub ovakvoga kotača ovi mali generatori imaju potkovasti elektromagnet kroz čiji se uzбудni namotaj pušta istosmjerna struja iz prikladnoga izvora (akumulatori). Polovi toga elektromagneta stoje »radijalno«, i toliko razmaknuto jedan od drugoga, da kod pogona kotača malim elektromotorom dolaze pred polove naizmjenice istodobno čas jedan određen par izbočina rotora, čas idući par udubina rotora, pa dalji par izbočina itd. Kako se na taj način uzdušna pukotina između polova elektromagneta i rotora periodski mijenja, što znači da je elektromagnet čas bolje čas lošije premošten željezom rotora, to se periodski mijenja i magnetski tok Φ proizveden određenim uzbuđenjem elektromagneta. Varijacije pak magnetskoga toka moraju proizvesti, po

zakonima elektromagnetske indukcije, periodski promjenljive elektromotorne sile u zavojima zasebnoga sekundarnoga namotaja na elektromagnetu (na koji se priključi aparat koji treba snabdijevati tonfrekventnom strujom).

Kod ovih malih tonfrekventnih strojeva očito je frekvencija proizvedene izmjenične struje određena brojem zubaca rotora i brzinom kojom motor tjera rotor, pa ju je lako po volji mijenjati. A nije teško njima proizvesti i relativno velike učine.

28. Međutim u novije vrijeme spomenuti mašinski generatori potisnuti su dolaskom praktički prikladnijih *cijevnih zujala*, tonfrekventnih izvora struje koji se osnivaju na električkim titrajima elektronskih cijevi (radio cijevi).

Ima vrlo različitih izvedbi cijevnih zujala. Uglavnom se mogu rasporediti u tri kategorije: a) »reakciona« (u užem smislu) cijevna zujala; b) »glazbenom viljuškom upravljana« cijevna zujala i c) »treptajna« ili »heterodina« zujala. Ova je klasifikacija izvršena prema načinu kako se cijev prisili da izvodi električke oscilacije.

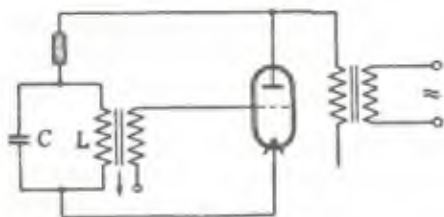
Kako se u radiotehnici pokazuje, svaka elektronska cijev, dakle u najobičnijem slučaju cijev s tri elektrode ili trioda (s »niti«, odnosno »katodom« iz koje, usjane strujom iz »izvora struje grijanja«, izlaze elektroni; s »mrežicom« ili »rešetkom«; te s »anodom« prema kojoj, kad je pozitivno nabijena iz »izvora anodne struje«, uglavnom struje elektroni izašli iz katode), može se prisiliti da »oscilira«, t. j. da izvodi periodske električke struje koje se same podržavaju na račun energije iz izvora anodne struje. Potrebno je samo da između anodnoga i mrežnoga strujnoga kruga cijevi postoji dovoljno jaka (i pravoga smjera) djelovanje, dovoljno jaka veza, t. zv. »reakcija«, preko koje se jedan dio energije oscilacija anodnoga strujnoga kruga prenosi na mrežni krug.

Ta je veza kod reakcionih zujala, spomenutih gore pod a), čisto električke, odnosno magnetske prirode. Takova na pr. induktivna veza jest ona preko transformatora sa željeznom jezgrom kod spoja zujala po shemi u sl. 142. (ograničenoj samo na najbitnije, dakle s ispuštenim izvorima struje itd.). Kako se vidi, transformatoru lijevo u slici jedan namotaj induktiviteta L (premosten kondenzatorom kapaciteta C), nadopunjen još jednim serijskim otporom, ukopčan je u anodni krug triode, a drugi mu je namotaj priključen na mrežicu.

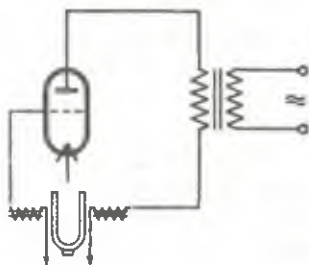
Kod zujala tipa b), dakle kod viljuškom upravljanih cijevnih oscilatora, kao posrednik kod prenošenja djelovanja (reakcije) anodnoga kruga na mrežni upotrebljavaju se mehanički titraji glazbene viljuške. Viljuška, vidljiva dolje u sl. 143., jest u energetičkoj vezi s elektromagnetima smještenima s obje nje-

zine strane; od njih je desni u anodnom, a lijevi u mrežnom krugu triode.

U oba slučaja proizvedene električke oscilacije uzimlju se kod $\approx$ (priključkom na sekundarne stezaljke »izlaznoga transformatora« desno u sl. 142. i 143.), direktno ili nakon pojačavanja na veći učin posredstvom pojačala s elektronskim cijevima na način poznat iz radiotehnike.



Sl. 142.



Sl. 143.

29. Frekvencija proizvedenih struja kod zujala po shemi u sl. 143. određena je »vlastitom« frekvencijom upotrebljene glazbene viljuške i ne može se mijenjati osim izmjenom viljuške, dok je kod zujala tipa a), poput onoga iz sl. 142., frekvencija električkih oscilacija određena u bitnosti time da odgovara (u prvoj aproksimaciji) »resonantnoj« ili »vlastitoj« frekvenciji »titrajnoga kruga« zujala, t. j. paralelne kombinacije induktiviteta L i kapaciteta C kakovu vidimo u spoju na slici 142. Za vlastitu pak frekvenciju f kruga sa L i C vrijedi uvjet resonancije (E-8.) $L\omega = 1/C\omega$ (uz $\omega = 2\pi f$), koji se može pisati i u obliku:

$$f = 1/(2\pi \sqrt{LC}) \quad (I)$$

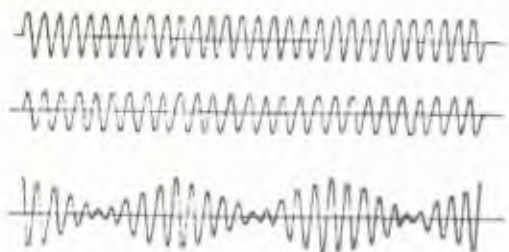
Čim se dakle traže niže frekvencije, produkti LC treba da su veći. Radiofrekventni (na pr. za $f = 10^6$ Hz) cijevni oscilatori mogu se dakle realizirati već s malo induktiviteta i kapaciteta, dok su za relativno mnogo niže tonske frekvencije (na pr. za $f = 10^4$) potrebni kudikamo veći iznosi LC , a po tomu i veći pojedinačni iznosi L i C (jer u praksi treba paziti da i omjer C/L ne pređe neku granicu, ako cijev treba da oscilira). Na pr. za $f = 10^3 = 1000$ formula (I) uz $L = 0.2$ H vodi na iznos:

$$C = 0.127 \cdot 10^{-6} \text{ F} = 0.127 \text{ } \mu\text{F}$$

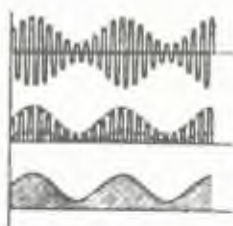
Za ovako velike iznose dolaze u obzir samo fiksni kondenzatori ili njihove kombinacije, dok kao induktiviteti redovno služe namotaji transformatora sa željeznom jezgrom kao u sl. 142., a rjeđe svici bez željeza. Prema tomu je udešavanje frekvencije kod zujala ovoga tipa redovno moguće samo promjenama »na skokove« kapaciteta C i induktiviteta L (suponirajući da pripadni namotaj ima više odvojaka).

Kontinuirano variranje frekvencije može se u ograničenom opsegu doduše također postići, na pr. uvlačenjem i izvlačenjem željezne jezgre transformatora (koje ima da naznači strijelica ispod jezgre transformatora lijevo u sl. 142.); no problem udobnoga udešavanja povoljnih tonских frekvencija od najviših do najnižih ipak pravo rješavaju istom »treptajna« zujala. Naprotiv kao izvori radiofrekventnih titraja, kontinuirano promjenljivih unutar širokih područja radio valova, dakle za svrhe visokofrekventnih mjerenja, obični reakcioni spojevi vrlo su prikladni, jer su tu dovoljni svici bez željeza u kombinaciji s neprekidno varijabilnim uzdušnim kondenzatorima malenoga maksimalnog kapaciteta.

30. Kod *treptajnih cijevnih zujala* (Schwebungssummer, beat frequency oscillators) uopće se odustaje od toga da se direktno pojedinom cijevi izvode tražene tonfrekventne oscilacije, nego se s pomoću titrajnih spojeva dviju elektronskih cijevi proizvedu dvije vrste visokofrekventnih titraja s frekvencijama f_1 i f_2 , recimo u području oko 50 000 Hz ili 50 kHz, dakle visoko iznad tonских frekvencija. Jedna od proizvedenih visokih frekvencija f_1 jest stalna, a druga f_2 mora biti kontinuirano promjenljiva u okolici iznosa prve, što nije teško postići, jer se može u pripadnom titrajnom krugu upotrebiti uzdušni promjenljivi kondenzator.



Sl. 144.

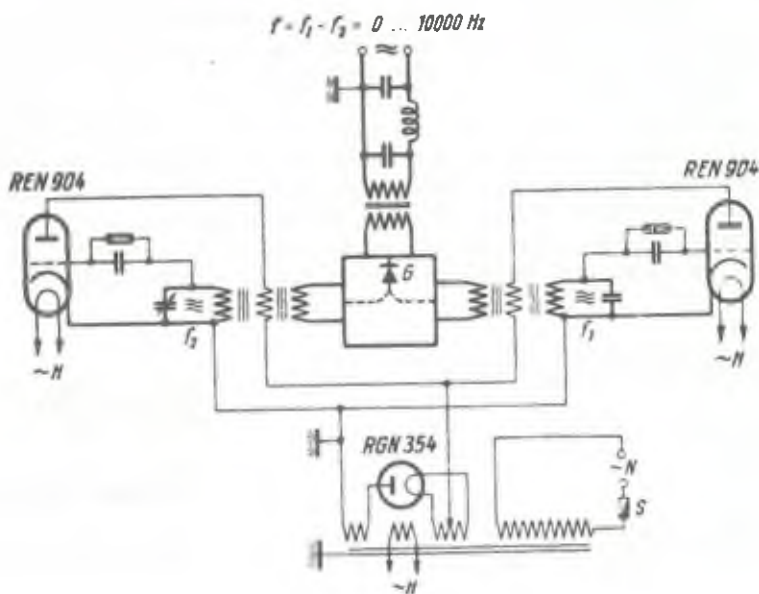


Sl. 145.

Sama tonfrekventna struja proizvodi se sad interferencijom (sastavljanjem) visokofrekventnih titraja frekvencija f_1 i f_2 . Nauka o titrajinama uči da se sastavljanjem dvaju titraja različitih frekvencija f_1 i f_2 dobiva pojav *treptaja* (Schwebungen, beats) kod koga se jakost (amplituda) kombinacionoga titraja periodski mijenja, t. j. čas pada, čas raste, po shemi u sl. 144., gdje su gore prikazani titraji neke frekvencije f_1 , u sredini titraji neke druge (u promatranom primjeru niže) frekvencije f_2 , a dolje se vide treptaji nastali kombinacijom titraja obih frekvencija. I treptaji imaju svoju frekvenciju, t. j. slijede u određenom ritmu. Ta je frekvencija $f = f_1 - f_2$, t. j. ona je naprosto jednaka diferenciji frekvencija titraja koji interferiraju, i prema tomu, da se uz stalno $f_1 = 50$ kHz izvedu treptaji s tonским frekven-

cijama od 0 do 10000, ne treba drugo nego pustiti da f_1 varira od 50 do 40 (ili od 50 do 60) kHz.

Puste li se sada dalje nastali titraji s treptajima (na pr. oni u sl. 145. gore) kroz ispravljač struje, na pr. metalni suhi (B-37.), nastat će ispravljena struja s čas jačima, čas slabijima, ali uvijek i s t o g a smjera impulsa u visokofrekventnom ritmu (sl. 145. u sredini), koji kumulativno (sabirno) daju struju uvijek istoga smjera, no koja t o n f r e k v e n t n o *pulzira* (periodski raste i pada) s frekvencijom f treptaja (sl. 145. dolje). Na priključenomu izlaznom transformatoru dobit će se dakle konačno



Sl. 146.

sekundarno *tonfrekventne* struje frekvencije $f = f_1 - f_2$ koje se eventualno nakon prolaza kroz prikladno građeni »čistilac struje« (E-26.), upotrebe za mjerenja, i to bilo direktno, bilo (što je redovan slučaj) nakon pojačavanja na potrebni učin u tonfrekventnom pojačalu s elektronskim cijevima. Ovo treba da je tako konstruirano da po mogućnosti jednoliko pojačava na željeni učin tonfrekventne struje od posve niskih do najviših frekvencija.

U sl. 146. detaljno je prikazan spoj treptajnoga zujala (konstrukcija (S&H) po opisanomu principu. Desna prijemna radio cijev (REN 904), s indirektno grijanom katodom, izvodi visokofrekventne titraje stalne frekvencije f_1 , a jednaka cijev lijevo u slici titraje promjenljive visoke frekvencije f_2 (u titrajnim krugovima obih visokofrekventnih oscilatora, koji su u ovom slučaju u mrežnom krugu pripadnih cijevi, kondenzator prvoga oscilatora nacrtan je

kao fiksna, a kod drugoga je strjelicom naznačena varijabilnost). Transformatori lijevo i desno u sl. 146. imaju, pored namotaja za mrežni i za anodni krug pripadne cijevi, svaki još i treći (tercijarni) namotaj, koji služi da se nastale visokofrekventne struje prenesu na ispravljač G. Kroz izlazni transformator toga ispravljača, gore iznad G u sl. 146., teče primarno struja koja tonfrekventno pulzira, dok je sekundarna struja uglavnom već čista tonkventna struja, koja je, nakon čišćenja nadovezanim »čistiocem struje« od dva kondenzatora i jednoga induktiviteta, također ucrtanim u sl. 146., praktički sinusoidna, te se može upotrebiti za mjerenja direktno ili nakon pojačavanja.

Dolje u sl. 146. dodan je još uređaj za pogon zujala običnom izmjeničnom strujom, s transformatorom s potrebnim namotajima i s ispravljačkom cijevi (RGN 354). Ovaj uređaj daje oscilatorskim cijevima struje grijanja (v. oznake H u sl. 146.) i anodne struje. Tako cijeli aparat funkcionira bez baterija, samim priključkom (preko osigurača S) na rasvjetnu mrežu kod N. U području od 50 do 10000 Hz struje iz opisanoga cijevnoga zujala imaju faktor distorzije D ispod 0,04 (4%). Izlazni napon: oko 0,2 V. Pripadno pojačalo bit će na pr. za 1 W učina u otporu od 600 Ω (ili slično).

31. Gornjim prikazom dan je samo općeniti pregled praktički najvažnijih tipova izvora tonfrekventnih mjernih struja i nisu uzimane u obzir brojne, više specijalne naprave kojima se također dadu proizvesti struje za mjerne svrhe. Među takove spadale bi na pr. »svjetlosne tonske sirene« s fotoelektričkim stanicama, t. j. napravama koje na svjetlost reagiraju električkim strujama (tu se svjetlost pušta da intermitirano pada na fotoelektričku stanicu kroz rupice raspoređene oko naokolo na kotaču koji rotira ispred fotoelektričke stanice); zatim mikrofonska zujala itd. Najkompliciranija (i prema tomu razmjerno skupa) zujala za mjerne svrhe, naime treptajna zujala u kombinaciji s prikladnim pojačalima, nisu međutim neophodno potrebna osim kod specijalnih mjerenja, kad druga zujala ne udovoljavaju postavljenim uvjetima. Za vrlo mnoga mjerenja, na pr. za velik dio mjerenja s mostovima izmjenične struje, dostaju pak i jednostavnije izvedbe zujala između kojih je, već prema specijalnim prilikama mjerenja i traženoj preciznosti, moguć izbor od najjednostavnijih mehaničkih do običnih cijevnih reakcionih i onih s glazbenom viljuškom.

32. Kao *nulinstrumenti* kod mostova i drugih nulmetoda s izmjeničnom strujom ne mogu se, kako je već u B-5. istaknuto, direktno upotrebiti galvanometri s pomičnim svitkom, jer ovi sami po sebi ne reagiraju na izmjenične struje. A i različiti drugi sistemi, direktno upotrebljivi i za mjerenja izmjeničnih struja, kako su opširno opisani u B-II., nisu prikladni za *nulinstrumente*, jer im je skala, barem oko početka, kvadratičnoga karaktera, pa na pr. 10 puta slabija struja daje 100-put manji

otklon, što sprječava da se mogu izvesti sistemi koji reagiraju na vanredno slabe struje, o čemu se kod nulmetoda upravo radi.

Zato se kod nulmetoda izmjeničnih struja kao indikatori nule struje upotrebljavaju specijalne naprave, svaka sa svojim osobitostima koje treba uzeti u račun kod izbora nulinstrumenta u danim prilikama mjerenja.

Najjednostavniji nulinstrument, već davno uveden i općenito upotrebljavan kod jednostavnijih mjerenja s mostovima izmjeničnih struja ne preniskih i ne previsokih tonskih frekvencija, jesu telefonske *slušalice*. Konstatiranjem nule struje po iščeznuću zvuka u slušalici prislonjenoj na uho moguće je dosegnuti vanredno velike osjetljivosti, što je svakako velika prednost. Osjetljivost je međutim vrlo ovisna o frekvenciji struje kojom se mjeri, jer s jedne strane same slušalice različito osjetljivo reagiraju na struje različite frekvencije, većinom najosjetljivije na struje u području oko 1000 Hz ili slično, a s druge strane prema tonovima proizvedenima slušalicom i uho pokazuje najviše osjetljivosti ako nisu duboki, ni pretjerano visoki. Prema tomu su slušalice najbolje upotrebljive kao nulinstrumenti kod srednje visokih frekvencija, pa se i pripadna zujala kod upotrebe slušalica uzimlju s ovakovim frekvencijama. Naprotiv za mjerenja kod niskih frekvencija, na pr. sa strujom iz rasvjetne mreže od 50 Hz, slušalice nisu prikladne kao nulinstrumenti jer im membrane slabo reagiraju i uho je slabije osjetljivo za duboke tonove.

Kod frekvencija na pr. oko 800 ili 1000 Hz, koje se rado upotrebljavaju kod mjerenja s mostovima izmjenične struje, mogu se tonovi u slušalici još zamjetiti kod struja u slušalici od samo 10^{-5} ili čak 10^{-6} A, što je vanredna osjetljivost.

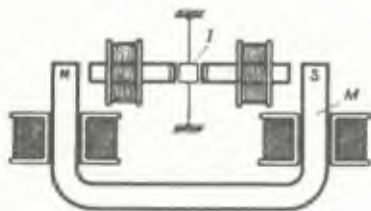
Ako osjetljivost cijele mjerne aparature, na pr. mosta, treba da bude što veća, mora se pripaziti da se odabere slušalica kojoj je prividni otpor (impedancija) kod mjerne frekvencije prilagođena na najpovoljniji iznos prividnim otporima u samom mosnom spoju. Inače treba slušalicu priključiti na most preko prikladnoga transformatora.

33. Kompliciranije građeni, ali kod mnogih mjerenja i bolje upotrebljivi, jesu *vibracioni galvanometri*. Kod njih se djelovanjem izmjeničnih struja stavlja u mehaničke resonantne titraje (vibracije) pomični sistem galvanometra komu je vlastita mehanička titrajna frekvencija udešena na frekvenciju izmjenične struje. Titranja se redovno učine vidljivima s pomoću zrcalca montiranoga na pomičnomu sistemu i prikladne optike po metodi «očitanja zrcalom» (B-8.), i to tako da se na zastoru sa skalom za očitavanje vidi, već prema amplitudi titrajnoga sistema vibracionoga galvanometra, šira ili uža svijetla (ili tamna) pruga, koja se kod postignute nule struje, dakle kad nestane titranja sistema, suzi u oštru usku liniju.

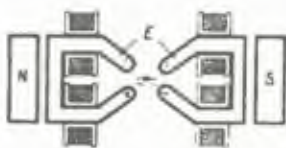
Prema načinu kojim se postizava da vibracioni galvanometri titraju, oni se mogu rasporediti uglavnom u dvije kategorije: a) u one s iglom, i b) u tipove sa svitkom (koji može preći i u petlju).

Kod vibracionih galvanometara prve kategorije iskorišćuje se magnetsko polje izmjenične struje da podržava u titranju sitnu magnetiziranu iglicu, dok kod onih drugih dolazi do titraja zbog djelovanja stalnoga magnetskoga polja (elektromagneta ili permanentnoga magneta) na izmjeničnom strujom protjecani sistem (svitak ili petlju; uspor. razmatranja u C-11.).

Bitno je međutim kod svih kategorija da pomični sistem vibracionih galvanometara mora biti resonantno udešen na frekvenciju izmjenične struje, tako da izvodi »vlastite« ili »slobodne« titraje, a ne »narinute« ili »iznudene« kao (po C-11. približno do aperiodskoga graničnoga stanja uljem prigušene) oscilografske petlje.



Sl. 147.



Sl. 148

34. Kao primjer vibracionih galvanometara s iglom opišimo praktički već dugo uvedeni *vibracioni galvanometar po Scheringu i Schmidtu*. Po shemama sl. 147. i sl. 148., koje predložuju konstrukciju sprijeda i odozgo, iglica I, od mekoga željeza ili koje magnetički što bolje slitine, obješena je u stalnom magnetskom polju vertikalnog elektromagneta M s polovima N i S, uzbudnoga istosmjernom strujom (na pr. iz akumulatora). Osim toga na iglicu djeluje i magnetsko polje obih malih horizontalnih elektromagneta E, tako uzbudjenih mjernom izmjeničnom strujom da su uvijek unakrsno položeni polovi istoimeni, t. j. već prema variranju smjera izmjenične struje čas su polovi 1 i 4 sjeverno (pozitivno) magnetički, a polovi 2 i 3 južno (negativno), a čas je obrnuto slučaj. Iglica I, i sama magnetizirana, i to u danim prilikama s južnim polom lijevo (—), a sjevernim desno (+). doći će međutim u jače (resonantne) mehaničke vibracije pod utjecajem promjenljivoga polja elektromagneta E samo onda, ako se variranjem istosmjernoga uzbudjenja elektromagneta s polovima N i S, dakle reguliranjem pripadne istosmjerne uzbudne struje, jakost magnetskoga polja u kome se nalazi igla I tako udesi da vlastita frekvencija titraja igle postane baš

jednaka frekvenciji izmjenične struje kroz svitke elektromagneta E. Pobliza naime razmatranja pokazuju da vlastita frekvencija titraja igle u stalnom magnetskom polju mora rasti kad se jakost toga polja povećava.

Kod galvanometara opisanoga tipa treba dakle prije mjerenja pomno udesiti istosmjernu »pomoćnu« struju da galvanometar dođe u resonanciju s frekvencijom struje mjerenja; onda on reagira praktički samo na struje te frekvencije i, donekle, frekvencija tijesno oko nje, odnosno samo na osnovni član nesinusoidnih struja, ako je udešen na njihovu osnovnu frekvenciju.

U praksi se mjerni sistemi vibracionih galvanometara s iglom moraju zaštititi jakim željeznim oklopom od djelovanja stranih magnetskih polja, na pr. od djelovanja polja svitaka ili drugih dijelova istraživane aparature protjecanih strujom mjerenja. Na oklopu se ostavi samo prozorčić za prolaz svijetla k zrcalcu i natrag. I smještaj galvanometra mora biti takov da ne dolazi do trešnja (upotrebi se na pr. gumena podloga).

U novije vrijeme velik je napredak postignut modificiranom konstrukcijom vibracionoga galvanometra s iglom po *Rumpu*. Magnetska je igla ovdje permanentni magnet od visoko vrijednoga magnetskoga čelika, a rasporedaj magnetskoga kruga i dvostrukoga željeznoga magnetskoga oklopa jest takov da je postignuta relativno vrlo dobra zaštita igle od stranih magnetskih polja uz nekoliko puta veću osjetljivost galvanometra. Galvanometri (u izvedbi H&B) dolaze u dva tipa: a) s elektromagnetom uzbuđenim istosmjernom strujom, u kome se slučaju resonancija galvanometra na frekvenciju struje mjerenja udešava reguliranjem te struje, i b) s permanentnim magnetom, s postizavanjem resonancije pomoću pomicanja magnetna na veću ili manju blizinu k igli.

Potrebni iznos prigušenja titraja postizava se kod ovih galvanometara vrtložnim strujama koje se kod titraja igle induciraju u blizoj bakrenoj ploči. Imu i kompletnih prenosivih uređaja gdje je galvanometar montiran u zajedničku kutiju s pripadnim rasvjetnim uređajem i skalom za očitavanje.

Osjetljivosti galvanometara po *Rumpu* su tolike da se opažaju kod udaljenosti skale 1 m proširenja svijetle pruge na pr. na 100 mm ili slično kod prolaza izmjenične struje jakosti 1 mikroamper.

35. Kod vibracionih galvanometara sa svitkom ili petljom princip djelovanja jest utjecaj magnetskoga polja na vodiče protjecane strujom, samo što ovdje svici i petlje moraju biti tako malenoga momenta tromosti i elastično tako namješteni u polju magnetna da titraju resonantno u ritmu struje koja njima teče. Tako na pr. »petljasti« vibracioni galvanometar u bitnosti može biti slične konstrukcije kao oscilografska petlja u sl. 59. (str. 66.), no bez onako silnoga prigušenja kakovo se postizava uljem, te s udešenjem titrajnoga broja sistema na frekvenciju struje mjerenja prikladnom napetošću pera koje nateže petlju

i reguliranjem razmaka obih oštrobridnih prečki iznad i ispod magneta u sl. 59.

Kod ovih mjernih sistema, također osjetljivih samo na struje one frekvencije na koju su sami udešeni, odnosno kod nesinusoidnih struja samo na osnovni član struje ako su na njegovu frekvenciju udešeni, utjecaji stranih magnetskih polja ne dolaze toliko do izražaja. A lako je izvesti vibracione galvanometre ove kategorije za područja relativno već nešto viših frekvencija, od nekoliko stotina pa do nekoliko hiljada Hz. U području nižih frekvencija redovno su prikladniji vibracioni sistemi s iglom.

36. Zajednički s vibracionim galvanometrima pokazuju i obični galvanometri u vezi sa *suhim ispravljačima* (B-37.) prednost da su dobro upotrebljivi i kod niskih frekvencija. Uz to se i kod njih nula struje prosuđuje vizualno (okom) po nuli otklona, a ne auralno (uhom) kao kod slusalice. Upotrebu im međutim kod nulmetoda izmjeničnih struja s ovisnošću o frekvenciji ograničuje to što, uz nesinusoidne struje, reagiraju osim na osnovni val i na harmoničke više članove. To kod mnogih mjerenja zahtijeva čistiće struje ili izvore sinusoidnih struja. K tomu je, kako je već u B-40. istaknuto, kod galvanometara u vezi sa suhim ispravljačem samo donekle moguće postići naročito osjetljivo reagiranje na nulu struje zbog stisnutosti početka skale ovakovih kombinacija (B-39.).

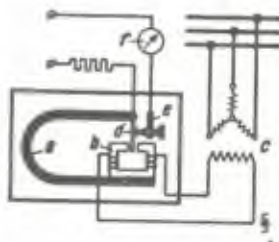
37. Zanimljive se mogućnosti otvaraju ako se, umjesto sa suhim ispravljačima, galvanometri za istosmjerne struje kombiniraju s mehanički tjeranim prekidačima koji titraju u taktu (sinhrono) s izmjeničnom strujom koja ih tjera, i to tako da naizmjenice drže krug struje zatvorenim i otvorenim kroz polovicu periode izmjenične struje. Kombinacije galvanometara i ovakovih *titrajnih kontaktnih ispravljača* u novijim usavršenim izvedbama mogu se upotrebiti za različite svrhe. One na pr. mogu služiti kao detektori (nulinstrumenti) izmjeničnih struja ako se pripadni ispravljač tako adjustira da momenti ukapčanja, odn. iskapčanja započinju baš početkom svake pozitivne, odn. svake negativne polovice periode izmjenične struje, jer u tomu slučaju kroz galvanometar teku samo pozitivne polovice vala izmjenične struje. Prednosti velike osjetljivosti galvanometra ostaju u ovom slučaju sačuvane i kod konstatiranja nule vanredno slabih struja. Ipak se kao nulinstrumenti u mostovima kombinacije sa titrajnim ispravljačima upotrebljavaju većinom samo u specijalnim prilikama.

U sl. 149. prikazan je vanjski izgled (otvorenoga) titrajnoga ispravljača (S&H), a u sl. 150. dana je shema spajanja. Aparat djeluje kao t. zv. «polarizirani relais» s permanentnim magnetom a. Elektromagnet b, uzbuđen izmjeničnom strujom, naizmjenice pritište jezičac d na kontakte i drži ga odmaknutim od kontakta. Uzbudnu struju elektromagnet b dobiva priključkom na sekundarni

namotaj »zakretnoga transformatora« c, primarno u sl. 150. trofazno priključenoga na izmjeničnu mrežu. Kako je iz elektrotehnike poznato, »zakretni« transformatori građeni su na način indukcionih motora sa statorom i rotorom kao nosiocima obih namotaja, primarnoga i sekundarnoga, koji se prema tomu mogu fiksirati u različite međusobne položaje. Kako struje u sekundarnom namotaju inducira Teslino »zakretno magnetsko polje«, to se većim ili manjim zakretanjem rotora u prikladni položaj prema statoru dade udesiti da izidju povoljni »fazni kutevi« (E-4.) sekundarne struje, a prema tomu i to da momenti ukapčanja i iskapčanja struje padnu kako se želi. Zbog toga transformator c i zovu također »pomica- teljem faza« (Phasenschieber, phase shifter ili phase shifting transformer). Specijalno kod upotrebe za poluvalno ispravljanje (B-37.)



Sl. 149.



Sl. 150.

pomicatelj faza mora biti tako udešen da, kako je već rečeno, ukapčanja, odnosno iskapčanja, počinju baš s početkom svake pozitivne, odnosno negativne, polovice vala izmjenične struje koju galvanometrom f treba konstatirati. Pravo udešenje prepoznaje se po tomu što f pokaže, kod određenoga napona primijenjenoga na stezaljke gore lijevo u sl. 150., maksimum ispravljene struje.

Postoje i mehanički prekidači s udešavanjem faze prekapčanja koji rade bez pomicatelja faza; Arch. f. Elektrotechn., XXXII (1938), str. 209. do 221. Kao nulindikatori u mostovima izmjenične struje mogu poslužiti i naročite naprave s katodnim zrakama (više u E-72.).

IV. TEORIJA WHEATSTONEOVA MOSTA KOD IZMJENIČNIH STRUJA

38. Mnogo važnih mjerenja s izmjeničnim strujama dade se svesti na posveopćeni spoj Wheatstoneova mosta po shemi u sl. 151. sa četverokutom od četiri općenito ma kakova kompleksna otpora, te izvorom izmjenične struje $\sim$ u jednoj i korespondentnim nulinstrumentom N u drugoj dijagonali. Uvjet ravno- težja ovoga mosta, t. j. uvjet da u grani s nulinstrumentom ne bude nikakove struje, može se simbolički izraziti relacijom (XI)

u E-12. Ta relacija, ako se vrijednosti pojedinih kompleksnih otpora izraze onim što oni prema sl. 151. sadrže, dakle ako se postavi za prvi kompleksni otpor:

$$Z_1 = R_1 + jX_1 = R_1 + j(L_1\omega - 1/C_1\omega)$$

i analogno za ostale, dade se dalje pisati u obliku:

$$(R_1 + jX_1) : (R_2 + jX_2) = (R_3 + jX_3) : (R_4 + jX_4) \quad (I)$$

Razrađivanjem naznačenih matematskih operacija s kompleksnim brojevima (pazeći kod toga na to da je: $j^2 = -1$), te izjednačivanjem konačno dobivenih realnih dijelova lijevo i desno, a isto tako i imaginarnih dijelova lijevo i desno, dolazi se na realne relacije za Wheatstoneov most u sl. 151. koje se još daju za pojedine posebne slučajeve specijalizirati u jednostavnije.

Konačni rezultat, uz supoziciju da su radni otpori R_1 do R_4 takovi da bi sami za sebe ispunjali relaciju $R_1 : R_2 = R_3 : R_4$, Wheatstoneova mosta kod istosmjerne struje, veli da u slučaju ravnotežja Wheatstoneova mosta za izmjenične struje mora biti udovoljeno višestrukoj proporciji:

$$R_1 : R_2 = R_3 : R_4 = X_1 : X_2 = X_3 : X_4 \quad (II)$$

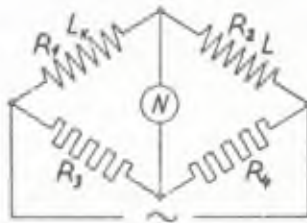
u kojoj su X_1 do X_4 prazni otpori četiriju grana mosta; dakle u općenitoj shemi sl. 151. znači

$$X_1 = L_1\omega - 1/C_1\omega$$

i analogno X_2 , X_3 i X_4 . Drugim riječima: ne samo da omjeri radnih otpora $R_1 : R_2$ i $R_3 : R_4$ imaju jednaki iznos, nego i što u tom iznosu moraju biti jednaki također omjeri praznih otpora $X_1 : X_2$ i $X_3 : X_4$, ma kakovi po sastavu svi ti radni i prazni otpori u pojedinim granama bili.



Sl. 151.



Sl. 152.

39. Kako u uvjetima (II) za nulu struje u mostu mogu, općenito, doći do izražaja utjecaji velikoga broja različitih veličina (dolaze tu veličine R_1 do R_4 , pa L_1 do L_4 , te C_1 do C_4 , a povrhu toga zastupana je veličinom $\omega = 2\pi f$ i frekvencija upotrebijene izmjenične struje), to se za praktičke primjene kod

mjerenja upotrebljavaju specijalizirani spojevi, tako odabrani da ispadnu u relacijama (II) pojedine od nabrojanih veličina, pa rezultat postane određeniji i pregledniji.

Budući da je ovakvih specijalnih spojeva moguće zamisliti vrlo mnogo, to ima cijeli niz mostova izmjenične struje na bazi Wheatstoneova mosta (a ima i mostova po ponešto drugoj shemi). Ti su mostovi prikladni kao nulmetode za mjerenja vrlo različitih veličina, osobito kapaciteta, samoinduktiviteta, međusobnog induktiviteta, frekvencije, zatim za ispitivanje gubitaka kod izmjenične struje u dielektrikumima kondenzatora, kabela itd. Uzmimo iz ovoga opirnoga područja nekoliko najjednostavnijih i praktički najvažnijih primjera.

40. Kao prvu primjenu razmotrimo *mjerenja samoinduktiviteta*. U tu svrhu zamislimo, po shemi u sl. 152., u prvoj grani mosta iz slike 151. sam svitak nepoznatoga (samo)induktiviteta L_x (i radnoga otpora R_1), u drugoj grani mosta sam svitak poznatoga induktiviteta L , na pr. normalni samoinduktivitet (radni otpor neka mu je R_2). U trećoj i četvrtoj pak grani neka su čisti radni mjerni otpori R_3 i R_4 . Kapacitivnih dakle otpora nema uopće ni u kojoj grani. Uvjet (II) pojednostavljuje se sada znatno i glasi:

$$R_1 : R_2 = R_3 : R_4 = L_x : L \quad (III)$$

jer u omjeru $X_1 : X_2 = [L_x \omega] : (L \omega)$ veličina ω skraćivanjem ispada. Udešavanjem mosta dok nulinstrument ne pokaže nulu struje može se dakle L_x izmjeriti poznatim L , ako je samo još poznat omjer $R_3 : R_4$ (koji je ujedno i omjer $R_1 : R_2$).

U (III) nema uopće veličine ω ; to znači da će udešenje na nulu struje kod jedne frekvencije vrijediti i kod drugih frekvencija. Zato se za mjerenja mogu upotrebiti struje povoljnih frekvencija, na pr. takovih da kao nulinstrument bude prikladna jednostavna slušalica. A u daljoj konsekvenciji to znači da se kao izvori mjerne struje mogu uzeti i najjednostavnija zujala, unatoč toga što ona daju jako nesinusoidne struje. Most naime, ako je udešen na nulu struje osnovnoga člana, samim tim udešen je i za više harmoničke članove, pa je prema tomu u mostu moguće i u tim prilikama postići praktički nulu struje (ili bar, kod zaostalih vlastitih kapaciteta i sl., vrlo oštar minimum).

Kojim se metodama postizava da se kod udešavanja mosta udovolji uvjetima ravnotežja (III), bit će opisano kod tumačenja praktičkih mjerenja samoinduktiviteta.

41. Ako se ispituje kondenzator koji predstavlja čisti kapacitet C_x , treba zamisliti u shemi sl. 151. taj C_x sam u prvoj grani, a čisti poznati kapacitet C sam u drugoj grani mosta. Tako je onda $R_1 = R_2 = 0$. U trećoj i četvrtoj grani neka su

čisti radni mjerni otpori R_3 i R_4 . Uvjet ravnotežja (II) pojednostavljuje se ovdje u jednu jedinu relaciju:

$$R_3 : R_4 = (-1/C_x \omega) : (-1/C \omega)$$

koja se u konačnom obliku može pisati:

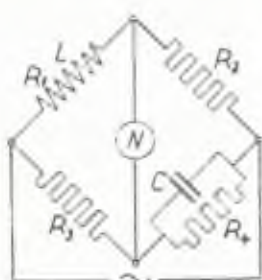
$$C_x : C = R_4 : R_3 \text{ ili: } C_x = C \cdot R_4/R_3 \quad (\text{IV})$$

I ovaj je uvjet ravnotežja neovisan o frekvenciji, što ima iste konsekvencije kao gore kod mjerenja samoinduktiviteta. O praktičkom izvođenju udešavanja mosta po formuli (IV), i o kompliciranijim mostovima za mjerenja na kondenzatorima s dielektrikumom koji kod priključka na izmjeničnu mrežu pokazuje gubitke, bit će govora kasnije u posebnom poglavlju.

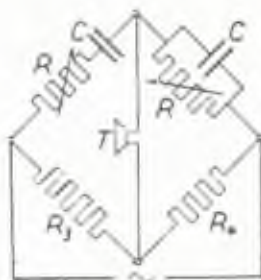
42. Mogu se također uspoređivati u mostu L i C , t. j. mogu se induktiviteti mjeriti poznatim kapacitetom ili obrnuto kapaciteti poznatim induktivitetom. Specijalni spoj po shemi u sl. 153. Wheatstoneova mosta za izmjenične struje u tomu slučaju zove se *Maxwellov most*. Kako se vidi, u drugoj i trećoj grani su čisti radni otpori R_2 i R_3 ; u prvoj je grani svitak radnoga otpora R_1 i induktiviteta L , a u četvrtoj paralelna kombinacija kapaciteta C i radnoga otpora R_4 . Detaljnije razradivanje relacija (II) za ovaj specijalni slučaj daje kao uvjet ravnotežja relacije:

$$L/C = R_2 R_3 = R_1 R_4 \quad (\text{V})$$

također neovisne o frekvenciji struje mjerenja.



Sl. 153.



Sl. 154.

Evo dokaza: Očito je $Z_1 = R_1 + j\omega L$; $Z_2 = R_2$; $Z_3 = R_3$. Po formuli pak (X) iz E-12. kombinaciona prividna vodljiva vrijednost $1/Z_4$ četvrte grane mosta jednaka je u simboličkoj metodi sumi vodljive vrijednosti $1/R_4$ njezina ogranka s radnim otporom R_4 i vodljive vrijednosti $j\omega C$) ogranka s kapacitetom

¹⁾ Zbog $j^2 = -1$ prelazi $1/(-j/\omega C)$ proširenjem sa j u $j\omega C$.

C. Recipročni iznos te sume jednak je prividnom otporu Z_4 promatrane grane mosta:

$$Z_4 = \frac{1}{1/R_4 + j\omega C} = \frac{R_4}{1 + j\omega CR_4} \quad (\text{VI})$$

Uvjet (XI) iz E-12. glasi prema tomu ovdje:

$$(R_1 + j\omega L) \times R_4 / (1 + j\omega CR_4) = R_2 \times R_3$$

Iz toga odmah slijedi:

$$R_1 R_4 + j\omega R_4 \times L = R_2 R_3 + j\omega R_4 \times CR_4 R_3$$

Izjednačenjem realnih dijelova lijevo i desno dobiva se relacija:

$$R_1 R_4 = R_2 R_3$$

a izjednačenjem imaginarnih dijelova (iza kraćenja sa $j\omega R_4$) relacija:

$$L = CR_4 R_3$$

Obje dobivene relacije sadržane su u (V).

43. Frekvencija f struje mjerenja *ne ispada* u uvjetu ravnotežja za specijalni slučaj Wheatstoneova mosta u spoju po sl. 154. (t. zv. *Robinsonov* most). Zato se ovakov spoj može upotrebiti za mjerenje veličine f .

Kako se vidi, treću i četvrtu granu promatranoga mosta za mjerenje frekvencija sačinjavaju čisti radni otpori R_3 i R_4 , pri čemu treba R_3 uzeti dvostruko toliko kao R_4 ($R_3 = 2R_4$). Naprotiv u prvoj i drugoj grani nalaze se međusobno jednaki radni otpori R i jednaki kapaciteti C , samo s tom razlikom da su u prvoj grani R i C spojeni u seriju, a u drugoj paralelno. Uvjet ravnotežja ovdje glasi:

$$\omega = 1/CR \quad (\text{VII})$$

pa ako se na pr. C uzme fiksno, a R varijabilno (povezavši na pr. mehanički gibanja ručki za udešavanje obih otpora R , tako da ovi nužno i kod variranja ostaju međusobno jednaki), onda se udešavanjem iznosa R , dok nulinstrument N ne pokaže nulu, može dobiti veličina $\omega = 1/RC$, a iz nje i numerička frekvencija struje mjerenja $f = \omega/2\pi$. Relacija $\omega = 1/RC$ dokazuje se računom sličnim onomu kod Maxwelllova mosta.

Primjer: Neka je $R_3 = 2000 \Omega$; $R_4 = 1000 \Omega$; $R = 800 \Omega$; $C = 0,5 \mu\text{F} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ F}$. Za ω izlazi vrijednost $1/RC = 2500$, čemu odgovara $f = \omega/2\pi = 398 \text{ Hz}$.

V. MJERENJA INDUKTIVITETA

44. Za mjerenja *samoinduktiviteta* upotrebljavaju se praktički različite metode, od kojih su najpoznatije: a) metoda Wheatstoneova mosta s izmjeničnom strujom po shemi u sl. 152., b)

metoda voltmetra i ampermetra (E-I-metoda) osnovana na Ohmovu zakonu za izmjenične struje, te c) različite metode »resonancije« s titrajnim krugovima sastavljenima od mjerenaog induktiviteta L_x i poznatoga kapaciteta C .

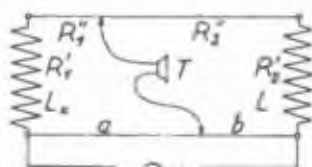
Kod Wheatstoneova mosta za mjerenje induktiviteta uvjet je ravnotežja dvojak, jer su u (III) u E-40. sadržane zapravo dvije relacije. A dvjema neovisnim relacijama zadovoljava se pomoću dva neovisna udešavanja, a ne jednim udešavanjem kao kod Wheatstoneova mosta istosmjerne struje.

Jedno od oba potrebna udešavanja lako se izvodi mijenjanjem omjera $R_3 : R_4$, koje je izvedivo prikladnim mjernim reostatima ili jednostavnije, kao u sl. 155. i 156., udešavanjem omjera $a : b$ na »kliznoj žici« (D-5.). Prema tomu pak kakovo se udešavanje uzme kao drugo, postoje praktički dvije podvrste mostova za mjerenje induktiviteta tipa sheme u sl. 152.

Kod prve podvrste most je, po sl. 155., sastavljen s poznatim induktivitetom L varijabilnoga tipa (E-18.), što je u slici 155. naznačeno strjelicom preko svitka sa L , pa se s jedne strane pomičući kontakt na kliznoj žici može udesiti $a : b$, dakle zapravo $R_3 : R_4$, na omjer $R_1 : R_2$, a s druge strane varirajući L može se udesiti omjer $L_x : L$ također na jednakost sa $R_1 : R_2$. Oba se udešavanja naizmjenice postepeno dotjeravaju dok nulinstrument, na pr. slušalica T , ne pokaže praktički nulu struje kao znak postignutoga punoga ravnotežja mosta.



Sl. 155.



Sl. 156.

Kod druge podvrste, po sl. 156., upotrebljava se (praktički prikladniji) fiksn i poznati samoinduktivitet L . Onda se dakako omjer $L_x : L$ ne da varirati, nego se po njegovom iznosu moraju udešavati omjeri $R_3 : R_4$ i $R_1 : R_2$ radnih otpora R , do R_4 u četiri grane mosta. Omjer $R_3 : R_4$ udešava se, kao i kod mosta iz sl. 155., omjerom $a : b$ na kliznoj žici. No za udešavanje omjera $R_1 : R_2$ sami vlastiti radni otpori R_1' i R_2' svitaka mjerenaog i poznatoga induktiviteta nisu dovoljni, jer je njihov omjer stalan i samo se posve slučajno može dogoditi da baš odgovara omjeru $L_x : L$ njihovih induktiviteta. Zato je kod promatranoga mosta, povrhu »mjerne« klizne žice, na kojoj se udešava i očitava omjer $a : b$, još predviđeno i sredstvo za udešavanje omjera $R_1 : R_2$ koje se sastoji u tomu da se stalni radni otpori R_1' i R_2' svitaka mjere-

noga i poznatoga induktiviteta nadopune dodatkom iznosa R_1'' i R_2'' kojih se omjer dade mijenjati. Praktički se to izvodi s pomoću prikladnih mjernih reostata ili, jednostavnije, upotrebom jedne nove klizne žice, vidljive gore u sl. 156. Kako se time dade ujedno i omjer $R_1 : R_2$ ukupnih otpora $R_1 = R_1' + R_1''$ i $R_2 = R_2' + R_2''$ prve i druge grane mosta udešavati prema omjeru $L_x : L$, nema zapreke da se i u ovom slučaju ne postigne potpuno ravnotežje mosta. Ako se na pr. klizni kontakt gore u sl. 156. pomiče nadesno, rasti će R_1'' , i smanjivat će se ujedno R_2'' , pa će se time i $R_1 : R_2$ povećavati.

Kod postignutoga punoga ravnotežja s mostovima po sl. 155. i 156. mjereni iznos L dobiva se iz relacije:

$$L_x = L R_2 / R_1 = L a / b \quad (I)$$

Kod ispitivanja svitaka sa R_1 i L_x realiziranih na pr. nešto debljim masivnim bakrenim vodičima mogu već kod tonskih frekvencija postati zamjetljivi učinci »skin-efekta«, koji se manifestiraju iznosom R_1 radnoga otpora većim nego odgovara otporu R_0 svitka mjerenom istosmjernom strujom, i ovisnim o frekvenciji f struje mjerenja u tomu smislu da kod povećavanja frekvencije R_1 raste (a L_x se ponešto smanjuje). Kod svitaka sa željeznom jezgrom, kojih induktivitet uostalom nije stalnoga iznosa nego ovisi o jakosti struje, utječu (i uglavnom se manifestiraju povećavajući R_1) također gubici od induciranih u željezu »vrtložnih struja«, i gubici zbog pojava t. zv. »magnetske histereze« što se javljaju kod izmjeničnoga magnetiziranja željeza.¹⁾

45. Kod mjerenja samoinduktiviteta *ampermetrom i voltmetrom* očitaju se na ampermetru A i voltmetru V u spoju sl. 157. efektivni iznosi I i E struje, odnosno napona kod priključenoga na 1 i 2 izvora izmjenične struje frekvencije f . Uz zanemariv radni otpor (i samoinduktivitet, u koliko ga ima) ampermetra A prema radnomu otporu R i samoinduktivitetu L istraživanoga svitka S kvocijent E/I pretstavlja iznos Z prividnoga otpora svitka. Ako se sad radi o svitku kome se radni otpor R kod upotrebljene izmjenične struje može uzeti jednakim otporu kod istosmjerne struje, onda se iz dobivenoga iznosa Z i istosmjernom strujom (kojim god načinom) izmjerenoga iznosa R može na temelju relacija predočenih u sl. 131. (str. 129.) lako izračunati $X = L\omega = 2\pi fL$, a prema tome i L .

Primjer: Ampermetar pokazao je 2 A, a voltmetar 200 V kod struje frekvencije $f = 50$ Hz. Otpor R , određen na pr. Wheatstone-ovim mostom za istosmjernu struju, neka je 8 Ω . Ona je:

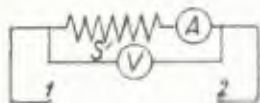
$$Z = 200/2 = 100 \Omega \quad X^2 = 100^2 - 8^2 = 9936 \quad X = 99,7 \Omega$$

¹⁾ Maleni »gubici u željezu« postizavaju se, kako je poznato, jezgrama s »porazdjeljenjem« u (medjusobno izolirane) tanke limove, žice ili sitne čestice od materijala malene histereze.

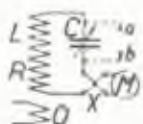
i prema tomu izlazi: $L = X/\omega = 99,7/314 = 0,318 \text{ H} = 318 \text{ mH}$. Za fazni kut φ prividnoga otpora svitka izlazi, na temelju relacije $\cos\varphi = R/Z = 8/99,7 = 0,0803$, vrijednost: $\varphi = 88,3^\circ$.

Upotrebljena izmjenična struja treba da je kod ovih mjerenja praktički sinusoidna, jer kod nesinusoidnih struja utječe na rezultat što induktivitet L predstavlja induktivni otpor $L \times \omega$ samo za član osnovne frekvencije $f = \omega/2\pi$, dok bi na pr. za harmonički član frekvencije $3f$ induktivni otpor bio $L \times 3\omega$, za član frekvencije $5f$ $L \times 5\omega$, itd.

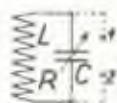
46. Pojav *resonancije* da se iskoristiti za mjerenje samo-induktiviteta (i kapaciteta) na više načina. Kod »resonantnoga mosta« uzme se na pr. u spoju posl. 151. (str. 153.) kao prva grana mosta kombinacija svitka mjenjenog induktiviteta L_1 (i radnog otpora R_1) u seriji sa poznatim kapacitetom C_1 , dok se u drugu, treću i četvrtu granu slave čisti radni otpori R_2 do R_4 . Očito sad



Sl. 157.



Sl. 158.



Sl. 159.

kod ravnotežja mosta mora i prva grana predstavljati čisti radni otpor, a to se stanje može postići varirajući frekvenciju f struje mjerenja dok nulinstrument ne pokaže nulu struje, znak da je postignut uvjet $L_1\omega = 1/C_1\omega$, pa prva grana predstavlja čisti radni otpor R_1 (v. E-8.). Uz poznato f (dakle i $\omega = 2\pi f$) može se onda L_1 lako izraziti poznatim C_1 (ili C , sa L_1 , ako se C_1 mjeri, a L_1 je poznato).

Primjer: Ako je poznat kapacitet $C_1 = 0,127 \mu\text{F} = 0,127 \cdot 10^{-6} \text{ F}$, pa se ravnotežje mosta postigne kod frekvencije $f = 1000 \text{ Hz}$, onda je $L_1 = 0,2 \text{ H}$ (v. račun u E-29.).

47. Također resonancijom mjeri se i po shemama u sl. 158. i 159. Tu se iskorišćuje činjenica da struja inducirana u krugu sa R , L i C djelovanjem izvora izmjenične struje (oscilatora) O pokazuje više ili manje izrazit maksimum jakosti kod »resonantne frekvencije« f određene relacijom (I) iz E-29. Ako se dakle mijenja na pr. frekvencija struje mjerenja oscilatora O , dok se ne pokaže maksimum struje na prikladnom osjetljivom instrumentu ukopčanom u krug sa R , L i C (u sl. 158. to je »instrument s termopretvaračem« po B-41. s osjetljivim termopretvaračem X i pripadnim galvanometrom M), onda kod te frekvencije f , koja se očita na oscilatoru O , vrijedi relacija (I) iz E-29., pa se iz nje može mjeriti L izraziti poznatim C (ili obrnuto C poznatim L , ako se mjeri kapacitet C s pomoću poznatoga L). A može i fre-

kvencija biti stalna, ali se onda kod mjerenja L varira C , dok se ne postigne resonancija.

Frekvencija mjerne struje može biti tonska; kao izvor upotrebi se onda, kod udešavanja resonancije iznosom f , heterodino cijevno zujalo, a pripadni L i C su relativno nešto veći. Ako se maksimum udešava variranjem kapaciteta, može se za C staviti prikladni fiksni kondenzator tek nešto manjega kapaciteta nego li treba za resonanciju kod odabrane frekvencije oscilatora, a još potrebni do resonancije iznos C_1 kapaciteta udesi se na varijabilnom kondenzatoru s uzduhom, priključenom na a i b paralelno kondenzatoru kapaciteta C . U tomu slučaju uvjet resonancije (E-8.) piše se: $L\omega = 1/(C + C_1)\omega$.

No mogu se za ova mjerenja, kod manjih iznosa L i C , upotrebiti i visokofrekventne struje. Onda kao izvor struje dolaze u obzir radiofrekventni oscilatori, bilo cijevni reaktioni (E-28.) s trajno podržavanim visokofrekventnim titrajjima, »nemoduliranim« ili »tonfrekventno moduliranim«, bilo oni iz starih jednostavnih valomjera ili ondometara (Wellenmesser, wawe meter) s grupama prigušenih titraja u tonfrekventnom slijedu (s uzbuđivanjem titrajnoga kruga na visokofrekventne titraje mehaničkim prekidačem).

Ako visokofrekventni oscilator izvodi neprigušene »nemodulirane« titraje (v. sl. 144. gore), indikator maksimuma struje treba da reagira na visokofrekventne struje (kako to i jest kod kombinacije X sa M u sl. 158.); v. i metodu po sl. 184. (str. 192).

No može se (vrlo približno) resonancija kruga sa R , L i C konstatirati i po maksimumu napona kondenzatora C (sl. 159.), koji se konstatira indikatorom priključenim na 1 i 2 paralelno kondenzatoru C . Taj indikator, kod nemoduliranih radio frekventnih titraja iz oscilatora, može biti na pr. serijska kombinacija »kristalnoga detektora« (ispravljača koji propušta visokofrekventnu struju uglavnom samo u jednom smjeru, i upotrebljava se zbog toga i kod najjednostavnijih prijemnika radiofonije) s osjetljivim galvanometrom s pomičnim svitkom (koji reagira na ispravljene struje). A kod oscilatora koji izvede visokofrekventne titraje »modulirane« tonfrekventno (titraje u tonfrekventnom ritmu, čas više, čas manje intenzivne; v. sl. 145. gore), ili koji izvede grupe »prigušenih« visokofrekventnih titraja u tonfrekventnom slijedu, može se između 1 i 2 staviti i kristalni detektor u seriji s telefonskom slušalicom. Međutim dovoljno je (i čak je bolje), ako se uzme paralelna kombinacija kristalnoga detektora i slušalice i priključi samo »jednopolno« na krug sa R , L i C , na pr. na stezaljku 1. Resonancija se u slušalici prepoznaje po maksimumu jakosti tona modulacione frekvencije.

Često nisu kod upotrebljenih malih visokofrekventnih oscilatora (u valomjerima) na skali naznačene visoke frekvencije f , nego duljine radio valova λ koje tim frekvencijama odgovaraju. Općenito je

$\lambda = c/f$, gdje je $c = 3 \cdot 10^{10}$ cm/s (= brzina svjetlosti), i kad se uzme u obzir relacija (I) iz E-29., izlazi da su L , C i λ vezani formulom:

$$\lambda = 1885\sqrt{LC} \quad (II)$$

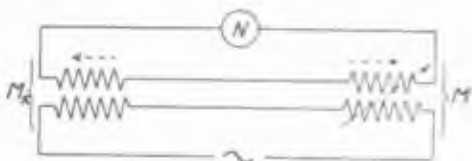
(uz uvjet da se λ izrazi u metrima, L u mikrohenrijima, a C u mikrofaramidima). Kod poznatih dviju veličina može se dakle izračunati treća u formuli (II); na pr. iz poznatih iznosa λ i C u slučaju postignute resonancije lako se dobiva mjereni iznos L .

Vezanje oscilatora s istraživanim titrajnim krugom treba da je kod mjerenja resonancijom što slabije; prema tomu upotrebljeni indikatori resonancije moraju biti vrlo osjetljivi.

Kod primjene metode resonancije u području visokih frekvencija potrebna je, kao i inače kod visokofrekventnih mjerenja, kritičnost u raspoređaju aparature i provedbi mjerenja zbog izbjegavanja različitih nuzgrednih efekata.

48. Za mjerenja *međusobnih induktiviteta* ima također različitih metoda. Jedna, balistička, već je opisana kod balističkih galvanometara; radi se po shemi u sl. 125. (str. 123.), a koeficijent međusobne indukcije računa se, kraj poznatih ili očitanih ostalih veličina, iz relacije (III) na str. 121.

Kao drugu mogućnost navedimo »metodu opozicije«, kod koje za određivanje nepoznatoga međusobnoga induktiviteta poznati međusobni induktivitet mora biti promjenljiv (F-20.) s prikladnim područjem variranja, da se može udesiti na iznos nepoznatoga. Po shemi u sl. 160. ista izmjenična struja pušta se



Sl. 160.

redom kroz primarne svitke obih međusobnih induktiviteta: mjerenoga M_x i poznatoga promjenljivoga M . Sekundarni svici od M_x i M također su sa svoje strane, uz dodatak prikladnoga nulinstrumenta N , spojeni u seriju, ali »u opoziciju«, t. j. tako da inducirane elektromotorne sile djeluju jedna protiv druge (zbog međusobnoga pomaka faza za 180°). Kad se sad, varirajući M postigne da N (na pr. vibracioni galvanometar ili slušalica) pokaže nulu struje, obje elektromotorne sile su izjednačene, a to znači da je $M_x = M$, pa se vrijednost M_x može naprosto očitati na skali za udešavanje iznosa M . Obje kombinacije svitaka uspoređivanih međusobnih induktiviteta moraju biti postavljene dovoljno daleko jedna od druge, odnosno tako da nema induktivne veze izmedju njih.

49. Ima i »mosnih spojeva« koji sadržavaju međusobnih induktiviteta, i takovima se, uz poznate ostale veličine, mogu također mjeriti međusobni induktiviteti. No mogu se mjeriti međusobni induktiviteti i mostovima za mjerenje samoinduktiviteta, ili drugim već opisanim metodama za samoinduktivitete.

Mjerenje međusobnoga induktiviteta daje se naime svesti na dva mjerenja samoinduktiviteta. U tu svrhu izmjere se samoinduktiviteti L' i L'' serijskoga spoja dvaju svitaka kojih se međusobni induktivitet M za određeni fiksni međusobni položaj tih svitaka ima odrediti, i to jedamput s priključkom drugoga svitka na prvi takovim da se magnetski tokovi obih svitaka potpomažu, a drugiput s obrnutim priključkom drugoga svitka, tako da se magnetski tokovi obih svitaka slabe. Ako se izrazi na str. 138., koji uz suponirane prilike vrijede po E-18. za L' i L'' , odbiju, ispadne $L_1 + L_2$ i za M izlazi: $M = (L - L'')/4$.

Ako se povrh toga još izmjere i samoinduktiviteti L_1 i L_2 pojedinih svitaka, može se izračunati i t. zv. »faktor vezanja« obih svitaka, pod čime se (u radiotehnici) razumijeva kvocijent $k = M/\sqrt{L_1 L_2}$ ($k\%$ = 100k).

Primjer: Za dva tijesno međusobno prislonjena svitka bez željeza za upotrebu kod primanja (dugih) radio valova mjerenja su dala (u milihenrijima):

$$L' = 268,1 \quad L'' = 180,9 \quad L_1 = 24,5 \quad L_2 = 200,0$$

Međusobni induktivitet za promatrani položaj svitaka jest: $M = (268,1 - 180,9)/4 = 21,8$ mH, a »faktor vezanja« ovdje iznosi: $k = 21,8/70,0 = 0,311$ (31,1%).

VI. MJERENJA KAPACITETA I KUTA GUBITAKA KONDENZATORA

50. Kod mjerenja kapaciteta prilike su osobito jednostavne, ako ispitivani kondenzatori, komadi kabela itd. predstavljaju praktički samo »čiste« kapacitete, t. j. ako ne pokazuju, kod priključka na izmjeničnu struju, »gubitke« zbog nesavršenosti dielektrikuma (ili ako se ti gubici zanemaruju, kako se to čini kod manje točnih mjerenja). Kod mjerenja gdje dolaze do izražaja, te treba da budu uzeti u obzir, i gubici u kondenzatorima, mjerenja su znatno kompliciranija, ali se, uz iznos kapaciteta, mjereći t. zv. kut gubitaka (Verlustwinkel, loss angle) i dobivaju podaci o kvaliteti kondenzatora, kabela itd., odnosno njihova dielektrikuma.

Razmotrimo najprije slučajeve mjerenja čistih kapaciteta. Između brojnih metoda za ovakovu svrhu treba istaknuti: a) mjerenja u Wheatstoneovu mostu izmjenične struje, b) E-I-metodu (metodu voltmetra i ampermetra), c) balističku metodu, d) me-

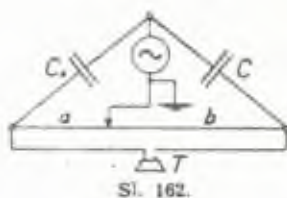
tođe resonancije i e) mjerenja instrumentima s direktnim očitavanjem kapaciteta, t. zv. »mjerilima kapaciteta«.

51. Wheatstoneovim mostom za izmjeničnu struju može se, osim u Maxwellovu spoju (E-42.) za uspoređivanje L sa C , nepoznati kapacitet C_x mjeriti usporedbom s poznatim C , specijalizirajući po E-41. općenitu shemu Wheatstoneova mosta iz sl. 151. tako da C_x i C čine prvu i drugu granu mosta, a čisti radni otpori R_3 i R_4 treću i četvrtu granu. Kod postignutoga ravnotežja mosta vrijedi onda za C_x formula (IV) na str. 155.

Kod praktičke realizacije ovakvih mjerenja može se raditi po shemama u sl. 161. i u sl. 162. U sl. 161. otpori R_3 i R_4 mogu biti fiksni i treba da je poznat samo njihov omjer R_4/R_3 , pa za udešavanje ravnotežja mosta treba samo varirati iznos C poznatoga kapaciteta (to je naznačeno u sl. 161. strijelicom preko simbola za C) dok nulinstrument N ne pokaže nulu struje.



Sl. 161.



Sl. 162.

Ako C nije varijabilno, onda se mora udešavati omjer R_4/R_3 , na pr. u sl. 161. varirajući iznos R_4 , koji se realizira prikladnim mjernim reostatom.

Kod sheme u sl. 162. udešavanje omjera R_4/R_3 naročito je pojednostavljeno, jer je svedeno na udešavanje omjera b/a klizne žice, a nulinstrument je jednostavna slušalica T . Kod nule (ili bar minimuma) tona u T vrijedi relacija:

$$C_x = C \cdot b/a \quad (I)$$

u kojoj C dolazi pomnoženo recipročnim iznosom b/a omjera a/b s kojim se po (I) na str. 158. množi L kod mosta s induktivitetima, tako da kod većega C_x klizni kontakt dolazi više nalijevo.

Primjer: $C = 0,1 \mu F$; ravnotežje mosta postignuto kod položaja kontakta na kliznoj žici (razdijeljenoj u 100 dijelova) sa $a = 42,0$ i $b = 58,0$. Mjereni kapacitet jest: $C_x = 0,1 \times 58/42 = 0,138 \mu F$.

U sl. 162. zamijenjeni su spojevi izvora struje i nulinstrumenta prema shemi u sl. 161.: T je priključeno na krajeve klizne žice, a izvor izmjenične struje u protivnu dijagonalu mosta. To po E-38. i D-7. ne mijenja uvjet ravnotežja, no predstavlja redovno povoljniji spoj obzirom na osjetljivost udešavanja nule mosta (iznosi radnih otpora dijelova a i b klizne žice gotovo su uvijek maleni prema iznosima kapacitivnih otpora $1/C_x\omega$ i $1/C\omega$).

52. Kod mjerenja kapaciteta *metodom ampermetra i voltmetra* iskorišćuje se činjenica da, po Ohmovu zakonu za izmjenične struje, »čisti« kapacitet C predstavlja »prividni otpor: $Z = 1/C\omega$, pa prema tomu za struju I , proizvedenu od napona E , vrijedi izraz: $I = E/Z = EC\omega = 2\pi fEC$. Ako se dakle, uz poznatu frekvenciju struje, izmjere struja kondenzatora i napon na njega primijenjen, može se C izračunati po formuli: $C = I/E\omega$.

Praktički se I i E mjere ampermetrom A i voltmetrom V u spoju kao na sl. 157., samo što sada, dakako, svitak S treba zamisliti nadomješten ispitivanim kondenzatorom. I ovdje, baš kao i kod mjerenja induktiviteta po sl. 157. (E-45.), otpor ampermetra treba da je praktički zanemariv, a upotrebljeni izvor treba da daje praktički čiste sinusoidne struje. To je kod mjerenja kapaciteta čak još odlučnije, jer kapacitet C , koji u slučaju nesinusoidnih struja za član osnovne frekvencije f predstavlja otpor $1/C\omega$, kakov je uzet za bazu kod izračunavanja formule (1), suprotstavlja sve manje i manje prividne otpore prema višim harmoničkim članovima, na pr. za član frekvencije $3f$ samo kapacitivni otpor $1/3C\omega$, za član frekvencije $5f$ samo $1/5C\omega$, itd. I maleni harmonički članovi u izrazu za napon mogu dakle doći jako do izražaja u izrazu za struju. Katkad se zato kod ovih mjerenja kapaciteta upotrebljava »čistilac struje« (E-26.).

Kod približnih mjerenja, kod kojih se napon i frekvencija (na pr. rasvjetne mreže) smiju smatrati stalnima i poznatima, može se voltmetar i ispustiti, pa na C zaključivati iz očitana iznosa I ; uz te pretpostavke mogu se onda na skali ampermetra i direktno nanijeti pripadni iznosi C .

Primjer: Iz mreže od 220 V i 50 Hz kondenzator uzimlje struju 0,058 A. Kapacitet toga kondenzatora jest: $C = 0,058/(220 \times 314) = = 0,84 \cdot 10^{-6} \text{ F} = 0,84 \text{ }\mu\text{F}$.

53. Kod mjerenja kapaciteta *rezonancijom* ne treba ništa dodati onomu što je već rečeno o toj metodi u E-46. i E-47. kod mjerenja induktiviteta. Jedina je razlika, što je kod mjerenja induktiviteta C poznato, a L se traži, dok je kod mjerenja kapaciteta obrnuto.

K tomu kod mjerenja kapaciteta pridolazi i mogućnost da se metoda rezonancije kombinira s metodom supstitucije (zamjene). Na pr. ne mora se nepoznati kapacitet ukopčati kao C u sl. 158. i udešavajući rezonanciju uspoređivati s poznatim L , nego se (i ne poznavajući L) može rezonancija kod prikladne frekvencije f udesiti najprije u krugu s kombinacijom poznatoga varijabilnoga kondenzatora C i njemu paralelnoga mjerenoga kapaciteta C_x (koji se priključi na a i b); ako se zatim kapacitet C_x ukloni, rezonancija će se kod iste frekvencije f ponovno postići samo ako se iznos varijabilnoga kondenzatora toliko poveća da se nadoknadi iznos uklonjenoga kapaciteta C_x . Ako su dakle

C'' i C' udešenja varijabilnoga kondenzatora (sa i bez C_x), mjereni iznos kapaciteta jest: $C_x = C' - C''$.

Supstitucijom se eliminiraju različiti izvori pogrješaka, na pr. utjecaji eventualnoga »vlastitoga kapaciteta« svitka sa R i L , i drugi (koji mogu doći do izražaja osobito kod mjerenja malenih kapaciteta i relativno već viših frekvencija).

54. Balistička metoda mjerenja kapaciteta opisana je već u D-54. (str. 120.). Preostaje još da se opišu mjerenja kapaciteta instrumentima s direktnim očitavanjem. Od preciznijih instrumenata ove vrsti zahtijeva se da svojim otklonom pokažu iznos mjenjiva kapaciteta bez obzira na variranje, barem unutar nekih granica, primijenjenoga izmjeničnoga napona, odnosno njegove frekvencije.

Mjerni sistemi prikladni za ovu svrhu mogu biti različiti. Mogu se upotrebiti elektrodinamski sistemi s unakrsnim svicima (B-46.), a i druga »kvocijentna mjerila«. Elektrodinamski sistemi s unakrsnim svicima po shemi u sl. 38. (str. 46.) mogu se uopće dodatkom prikladnih otpora, kondenzatora ili svitaka osposobiti za vrlo različite svrhe. Baš kao što je na pr. u spojevima na sl. 39. i 40. (str. 47.) ovakov mjerni sistem dodatkom prikladnih otpora, odnosno induktiviteta, pretvoren u (jednofazno ili trofazno) $\cos\varphi$ -mjerilo, njim se može realizirati i mjerilo kapaciteta dodatkom prikladno priključenih kondenzatora, ili mjerilo frekvencije kombinirajući sistem s dodanim elementima u spoj prikladan za ovakovu svrhu.

Kod konstrukcije Weston mjerila kapaciteta (»mikrofaradmetra«) za mjerenja strujom od 50 Hz elektrodinamski sistem s unakrsnim svicima kombinira se¹⁾ sa dva ugrađena kapaciteta, jednim pomoćnim i jednim koji služi za uspoređivanje, a kao treći se na određeni par stezaljki instrumenta priključi istraživani kondenzator. Jedan drugi par stezaljki služi za priključak na izmjeničnu struju. U instrument je ugrađen i zaštitni otpor. Kod mjerenja kazalo direktno pokaže, na praktički jednolikoj skali, iznos kapaciteta ispitivanoga kondenzatora. Instrumenat se za frekvenciju od 50 Hz daje udesiti s opsezima mjerenja kojima odgovaraju iznosi od više mikrofarada sve do nekoliko stotinki mikrofarada kod punoga otklona. Za iznose kapaciteta niže od onih koji se dadu mjeriti s najnižim mjernim opsegom kod 50 Hz potrebni su instrumenti u nešto drugom spoju i za više mjerne frekvencije (poimence: 500 ili 1000 Hz).

U mjerilu kapaciteta H&B upotrebljen je mjerni sistem *indukcionoga* elektrodinamometra; ovaj se naime također može osposobiti, uz ostalo, i za mjerenja kapaciteta, kako je već prije (B-26.) rečeno.

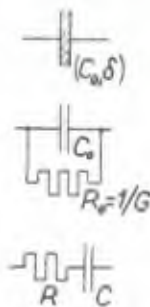
¹⁾ Detaljnije v. na pr. u ETZ (Elektrotechn. Z.), 1925, str. 312/313.

55. Mostovima za mjerenja kapaciteta s jednim jedinim udešavanjem, kako su opisani u E-51., mogu se dobro mjeriti zapravo samo kapaciteti kondenzatora kojima je dielektrikum jednako ili bar približno tako savršen kao i dielektrikum mjernoga kondenzatora koji realizira poznati kapacitet. U protivnom slučaju, dakle kod kondenzatora s »gubicima« učina kod prolaza izmjenične struje kojima su uzrok različite nesavršenosti njihova dielektrikuma, ne da se samim jednim udešavanjem uopće postići nula, niti vrlo oštar minimum struje u nulinstrumentu, jer nesavršeni kondenzatori ni ne predstavljaju čisti kapacitet, kakov jest u pravilu mjerni kondenzator.

Izmjenična struja $\mathcal{I}$ nesavršenih kondenzatora nije naime čista *kapacitivna prazna* (po E-8. za pravi kut $\pi/2$ ili 90° prema naponu n a p r i j e d u fazi pomaknuta) struja $\mathcal{I}_1$, nego u $\mathcal{I}$ treba zamišljati sadržanu pored $\mathcal{I}_1$ još i neku (redovno neznatnu) *radnu* (istofaznu s naponom) struju $\mathcal{I}_2$ kojoj je jakost određena veličinom »gubitaka«, odnosno kvalitetom dielektrikuma kondenzatora. Tako bi, po shemi u sl. 163., $\mathcal{I}$ bilo predočeno rezultantom dvaju vektora $\mathcal{I}_1$ i $\mathcal{I}_2$, prvoga pod kutom priklona $+90^\circ$ prema pripadnom vektoru napona $\mathcal{E}$, a drugoga povučenoga u smjeru vektora $\mathcal{E}$.



Sl. 163.



Sl. 164.

Efektivni iznos I ukupne struje $\mathcal{I}$ vezan je prema tomu s efektivnim iznosima I_1 i I_2 struja $\mathcal{I}_1$ i $\mathcal{I}_2$ (kapacitivne i radne) nesavršenoga kondenzatora relacijom $I^2 = I_1^2 + I_2^2$, dok pomak faza struje $\mathcal{I}$ prema naponu $\mathcal{E}$ ima iznos φ nešto manji nego odgovara kutu 90° (ili četvrtini periode) pomaka faza struje kroz čisti kapacitet (savršeni kondenzator bez gubitaka). Razlika između pravoga kuta i φ , dakle u kutnim stupnjevima $\delta = 90^\circ - \varphi$, odnosno u lučnoj mjeri¹⁾ $\delta = \pi/2 - \varphi$, upravo karakterizira kondenzator, odnosno njegov dielektrikum, obzirom na gubitke kod

¹⁾ Vidi bilješku dolje na str. 126.

izmjenične struje. Čim je kondenzator bliži idealnom (čistom kapacitetu bez gubitaka), tim manji mu je omjer I_2/I_1 , dakle također manji i kut δ . Zato se δ , koji je uostalom kod iole boljih kondenzatora uvijek malena iznosa, i zove *kut gubitaka*. I istom ako je uz kapacitet nekoga kondenzatora određen, odnosno poznat, i »kut gubitaka«, kondenzator je točnije označen. Njegov iznos je pogotovo zato od koristi, jer δ (u lučnoj mjeri) dolazi u izrazu za pravi učin N (u vatima) kondenzatora koji, priključen na izmjenični napon E (u voltima), uzimlje struju I (ampera). Očito je naime:

$$N = EI \cos \varphi = E I \sin \delta \approx E I \operatorname{tg} \delta \approx E I \delta (\approx E^2 \omega C \delta) \quad (II)$$

jer je $\cos \varphi = \sin(\pi/2 - \varphi)$, a za neznatne kuteve, kakov redovno jest δ , iznos kuta δ u lučnoj mjeri $\nu r l o$ je približno jednak ($\approx$) sa $\operatorname{tg} \delta$ i sa $\sin \delta$.

Primjer: Kondenzator sa $C = 20 \mu F$ i $\delta = 0,05$ (tomu odgovara $2^\circ 52'$), priključen na izmjenični napon od 200 V, uzimlje struju 1,2 A. Pravi učin, što ga troši, jednak je: $N = 200 \cdot 1,2 \cdot 0,05 = 12$ W; zbog njega se kondenzator ugrijava (svake sekunde se stvara $0,24 \cdot 12 \approx 2,9$ cal topline).

56. Da bi se kod mjerenja mogli uzeti u obzir gubici u nesavršenim kondenzatorima, zamislimo da nesavršeni kondenzator, simbolički naznačen kao u sl. 164. gore, nadomjestimo »ekvivalentnim spojem«.

Po srednjoj shemi u sl. 164. to može biti kombinacija nekoga savršenoga kondenzatora, takovoga kapaciteta C_0 da bi kroz njega tekla struja $\mathfrak{J}_1$ iz sl. 163., i čistoga radnoga otpora R_0 (odnosno pripadne vodljive vrijednosti t. zv. »odvoda« kondenzatora $G = 1/R_0$) u paralelnom spoju sa C_0 i tolikoga iznosa da bi kroz R_0 tekla baš struja $\mathfrak{J}_1$ iz sl. 163. Ovakov paralelni spoj mora onda propuštati ukupno struju $\mathfrak{J}$ istoga iznosa I i istoga pomaka faza $\varphi = \pi/2 - \delta$ kao i nesavršeni kondenzator, t. j. oni će biti ekvivalentni.

Medutim uvijek je moguće nadomjestiti nesavršeni kondenzator i jednim drugim ekvivalentnim spojem, i to serijskom kombinacijom, kao u sl. 164. dolje, nekoga čistoga kapaciteta C (savršeni kondenzator) i nekoga radnoga otpora R , uz jedini uvjet da ukupni prividni otpor po iznosu i faznom kutu mora ispasti, kod dane frekvencije, takov da vodi na struju $\mathfrak{J}$ istoga iznosa I i istoga pomaka faza φ prema primijenjenomu naponu kakovu pokazuje i nesavršeni kondenzator.

Pita se samo: kakove moraju, kod određenoga iznosa ω , biti korespondentne vrijednosti C_0 i $G = 1/R_0$, odnosno C i R , jednoga i drugoga ekvivalentnoga spoja nesavršenoga kondenzatora, te kako se s pomoću ovih veličina može izraziti »kut gubitaka« δ .

Za kut gubitaka δ , ili točnije njegov tangens koji je i onako — kraj malenih vrijednosti δ — praktički istoga iznosa kao i δ , vrijede relacije:

$$\delta \approx \operatorname{tg}^2 \delta = G/\omega C_0 \quad (\text{IIIa}) \quad \delta \approx \operatorname{tg} \delta = \omega CR \quad (\text{IIIb})$$

Za dokaz formule (IIIa) dovoljno je uzeti u obzir da je po sl. 163. $\operatorname{tg} \delta$ jednako omjeru I_2/I_1 , pri čemu treba staviti $I_2 = E/R_0 = EG$ i $I_1 = E/(1/\omega C_0) = E\omega C_0$, pa (IIIa) odmah izlazi (jer na-
pon E skraćivanjem ispadne).

Kod izvoda formule (IIIb) polazi se od činjenice da spoj u sl. 164. dolje pretstavlja kompleksni otpor

$$Z = R + j \cdot (0 - 1/\omega C)$$

kome je fazni kut φ' određen relacijom: $\operatorname{tg} \varphi' = (-1/\omega C) : R = -1/\omega CR$; za pomak faza φ struje prema naponu vrijedi onda: $\varphi = -\varphi'$ pa je $\operatorname{tg} \varphi = 1/\omega CR$ odnosno: $\operatorname{tg} \delta = \operatorname{cotg} \varphi = \omega CR$.

57. Da se sad R i C izraze sa G i C_0 , i obrnuto, dovoljno je malo prije navedeni izraz za prividni otpor Z serijskoga spoja sa C i R izjednačiti s izrazom:

$$Z_0 = 1/(G + j\omega C_0) \quad (\text{IV})$$

za prividni otpor ekvivalentnoga paralelnoga spoja sa C_0 i $R_0 = 1/G$, koji se dobiva primjenom formule (VI) na str. 156. na ovdje promatrani slučaj. To znači da treba staviti: $Z = Z_0$. Ako se ova relacija uredi, te izjednači realno lijevo s realnim desno, a isto tako i imaginarno lijevo i desno, dolazi se konačno, upotrebivši još i formulu (IIIa), na ove relacije za R i C :

$$R = \frac{G}{G^2 + \omega^2 C_0^2} \quad (\text{V}) \quad R \approx \frac{G}{\omega^2 C_0^2} \quad (\text{V})$$

$$C = C_0 (1 + G^2/\omega^2 C_0^2) = C_0 (1 + \operatorname{tg}^2 \delta) \approx C_0 (1 + \delta^2) \quad (\text{VI})$$

$$C \approx C_0 \quad (\text{VI})$$

Do aproksimativnih relacija (V') i (VI') dolazi se iz (V) i (VI) uzimajući u obzir praktički redovan slučaj kondenzatora malenoga iznosa δ , kod kojih se G^2 može zanemariti prema $\omega^2 C_0^2$, a $G^2/\omega^2 C_0^2 = \operatorname{tg}^2 \delta \approx \delta^2$ prema 1. Na pr. i uz relativno već veliki iznos $\delta = 0,05$ izraz:

$$1 + \delta^2 = 1 + 0,05^2 = 1,0025$$

je doista samo za 0,25% veći od 1, dakle praktički jednak 1.

Kako se vidi, C je zapravo veće od C_0 i tek približno može se smatrati jednako sa C_0 , ako je δ maleno.

Što se tiče iznosa R , on ispada vrlo malen kod kondenzatora koji su blizu savršenima i imaju malen δ , dok R_0 pretstavlja otpore od vrlo mnogo oma (t. j. G odvode s neznatnim iznosom simensa). Kod savršenoga kondenzatora R i G iščezavaju, a R_0 treba zamišljati beskonačno veliko.

Otpor R_0 , recipročni iznos »odvoda« G nesavršenoga kondenzatora kod izmjenične struje, ne treba zamijeniti s otporom R'' , koji dielektrikum kondenzatora suprotstavlja prolazu istomjerne (stalne) struje, i koji se dobiva na pr. mjerenjem po metodi gubitka naboja iz D-23. Na tu razliku između »otpora gubitaka« R_0 i »izolacionoga otpora« R'' već je u D-25. upćoreno. Gubici kondenzatora kod izmjenične struje ne nastaju naime samo zbog neke (redovno neznatne) električne vodljivosti dielektrikuma, nego i zbog još drugih »nesavršenosti« kondenzatora podvrgnutih izmjeničnim električkim naponima. Tako R_0 može izaći mnogo manje nego R'' , odnosno $G = 1/R_0$ mnogo veće nego $1/R''$.

Zanimljivo je da δ uglavnom ne ovisi o dimenzijama i kapacitetu kondenzatora, nego u pravilu karakterizira kvalitetu dielektrikuma kondenzatora. Ako se na pr. uzme da su se oblozi kondenzatora približili na polovicu, ili da su se povećali na dvostruku površinu uz nepromijenjen razmak, kapacitet kondenzatora tim postane doduše dvostruk, ali se i »odvod« kondenzatora uglavnom podvostruči, pa $G/\omega C_0$ ostaje uglavnom nepromijenjeno.

S frekvencijom se δ doduše mijenja, ali ne mnogo, jer kod veće frekvencije postaje veće ne samo ωC_0 , nego i gubici, a s njima i odvod G . Ipak je kod točnih podataka o tg δ nekoga dielektrikuma potrebno naznačiti za koju je frekvenciju iznos tg δ određen, odnosno naveden. I o temperaturi, kao i o visini (i trajanju) visokoga napona primijenjenoga na kondenzator ovisi tg δ . Ispitivanja tih različitih ovisnosti veličine tg δ na pr. kod ulja, kabela itd. cijene se u novije vrijeme sve više kao ona koja mogu nadomjestiti (ili nadupuniti) na pr. visokonaponska ispitivanja na »električki proboj«.

58. Opisani odnosi primjenjuju se kod mjerenja vrijednosti C_0 i δ nesavršenih kondenzatora u *Wienovu mostu* po shemi u sl. 165. Ispitivani nesavršeni kondenzator čini prvu granu mosta, a u drugu granu stavi se serijska kombinacija iz sl. 164. dolje, realizirana mjernim kondenzatorom kapaciteta C (zanemarivih gubitaka, t. j. s uzduhom, ev. i tinjcem itd., kao dielektrikumom) i mjernim otpornikom kojim se daje udešavati potrebni iznos R radnoga otpora. Treću i četvrtu granu čine čisti radni otpori R_3 i R_4 .

Ako su otpori R_3 i R_4 jednaki, kod mosta u ravnotežju mora postojati ekvivalencija između prve i druge grane mosta, t. j. ako nulinstrument N pokaže ravnotežje mosta kod iznosa C i R , udešenih varijabilnim kondenzatorom i otpornikom u drugoj grani, onda za nesavršeni kondenzator u prvoj grani vrijede relacije iz E-57., pa se, s obzirom na to što će δ redovno biti neznatnoga iznosa, vrlo približno može pisati:

$$C_0 \approx C/(1 + \delta^2) \approx C$$

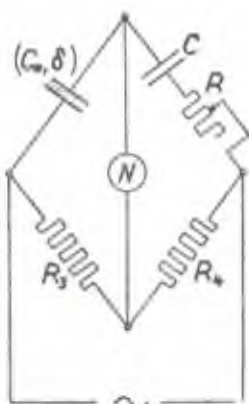
$$\text{tg}\delta \approx \delta \approx \omega RC$$

a G , odn. R_0 , ako je od interesa da se znadu, mogu se računati po (V) na temelju formule $G = 1/R_0 \approx R\omega^2 C^2$.

Ako omjer R_4/R_3 nije jednak jedinici, nema ni jednakosti između prve i druge grane, nego primjenom relacije (XI) na str. 134. izlaze ove formule:

$$C_0 \approx C.R_4/R_3 \quad \operatorname{tg} \delta = \omega RC \quad G = 1/R_0 \approx R\omega^2 C^2.R_4/R_3$$

U ovakvom slučaju »mosta s nejednakim granama« (R_4/R_3 različito od 1) C može biti fiksno; ravnotežje se onda postizava udešavajući mjernim reostatima R i omjer R_4/R_3 (pri čemu se kod variranja omjera R_4/R_3 na pr. otporu R_3 daje prikladni fiksni iznos, a R_4 se fino udešava).



Sl. 165.



Sl. 166.

Primjer: $C = 0,03 \mu\text{F} \approx 3 \cdot 10^{-8} \text{ F}$; $R = 1370 \Omega$; $R_3 \approx 5000 \Omega$; $R_4 = 8250 \Omega$. Struja mjerenja od 50 Hz ($\omega = 314$); nulinstrument: vibracioni galvanometar. Izlaze vrijednosti:

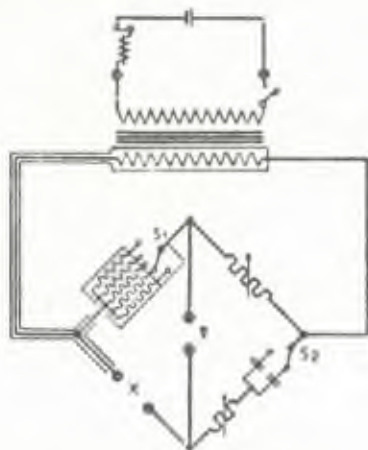
$C_0 = 0,0495 \mu\text{F}$; $\operatorname{tg} \delta = 0,0129$; $G = 0,201 \mu\text{S}$, odnosno $R_0 = 4,98 \text{ M}\Omega$

Kod većih frekvencija i većih kapaciteta R postaje, uz stalan iznos $\operatorname{tg} \delta$, razmjerno manje. Iznos 129 desetitsučinki za $\operatorname{tg} \delta$ u malo prije promatranom primjeru odgovarao bi dielektrikum s ne baš neznatnim gubicima; najbolje (obzirom na što manje gubitke) krute dielektričke supstancije imaju mnogo manji $\operatorname{tg} \delta$: na pr. $\operatorname{tg} \delta$ kremenja se kreće oko 1 desetitsučinke; $\operatorname{tg} \delta$ tinjca, već prema kvaliteti, od 2 do 15 desetitsučinki; itd. Transformatorska dobra ulja imaju $\operatorname{tg} \delta$ na pr. 50 desetitsučinki ili slično, a porculani već i do 500 desetitsučinki (0,05 ili 5%) kod 50 Hz. Kod kvalitetnih maraka savremenih kondenzatora s papirnatim dielektrikumom $\operatorname{tg} \delta$ redovno ima iznose ispod 0,01.

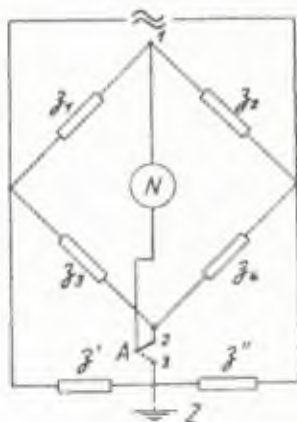
59. Često se i kod mostova određenih samo za mjerenja kapaciteta (a ne i kuta gubitaka) upotrebljava spoj po sl. 165. U tomu slučaju podaci o iznosu nepoznatoga kapaciteta dobivaju se iz »glavnoga« udešavanja mosta, koje se može sastojati bilo

u udešavanju omjera R_1/R_2 uz stalno odabrano C , bilo u udešavanju poznatoga kapaciteta C uz stalno odabran omjer R_1/R_2 ; mjereni kapacitet jednak je izrazu $C \cdot R_1/R_2$. Mijenjanje pak otpora R , kome iznos ni ne mora biti poznat, služi samo kao »pomoćno« udešavanje za postizavanje točnijega ravnotežja mosta nego što bi ga moglo dati samo »glavno« udešavanje u slučajevima ispitivanja kondenzatora koji se kutom gubitaka znatno razlikuju od kondenzatora što realiziraju poznati kapacitet C .

Po sl. 167. most dobiva struju mjerenja iz zujala s prekidačem (tjeranoga baterijom malih suhih elemenata); taj dio je na sl. 166. gore desno vidljiv kao pridodatak samomu mostu. Na strujni krug mosta struja se prenosi preko transformatora kome sekundarni namotaj ima metalnu zaštitu (Abschirmung, screen). Zaštićen je i dovod do mjesta X za priključak ispitivanoga kondenzatora u prvoj grani i do kutije u trećoj grani s pet otpora različitoga iznosa i preklopom S_1 . I ta kutija sa svoje strane ima zaštitu. Preklopkom S_1



Sl. 167.



Sl. 168

može se kojigod od 5 otpora ukopčati kao otpor R_2 mosta iz sl. 165. Elementi R_1 i R_2 spoja iz slike 165. lako se prepoznaju u slici 167; oni su promjenljivi otpori. Poznati pak kapacitet C realizira se tako da se preklopkom S_2 ukopča po potrebi jedan ili drugi od oba mjerna kondenzatora ugrađena u aparaturu. Već prema položaju preklopaka S_1 i S_2 mogu se tako, s udešavanjem otpora R_4 kao glavnim i otpora R kao sporednim, postići različiti mjerni opsezi, pa se mostom iz sl. 167. (H&B) dadu mjeriti kapaciteti od vanredno neznatnih do relativno velikih iznosa (od nekoliko pikofarada pa sve do više mikrofaraada).

60. Zaštita kod mosta po sl. 167. jest elektrostatska, protiv električkih polja. Njom imaju da se po mogućnosti eliminiraju eventualni kapacitivni učinci, između pojedinih dijelova mosta

ili između nulinstrumenta i zemlje, koji bi inače mogli izobličiti rezultate mjerenja.

Uopće treba kod mostova izmjenične struje paziti da ne bude nuzgrednih učinaka, ni induktivnih, ni kapacitivnih.

Induktivni učinci mogli bi se na pr. manifestirati u mostu za mjerenja induktiviteta po sl. 155. (str. 157.) u obliku međusobne indukcije između svitaka prve i druge grane mosta kod prevelike blizine i neprikladnoga međusobnog položaja tih svitaka, pa to treba držati na umu kod razmještaja pojedinih dijelova mosta.

U mostovima za mjerenja kapaciteta dolaze do izražaja, i to u pravilu jače kod viših frekvencija i manjih kapaciteta u mostu, uglavnom samo kapacitivni učinci, i na te treba, kod točnijih mjerenja, obratiti pažnju i nastojati ih učiniti što manjima, odnosno neškodljivima; naročito na pr. treba paziti da između nulinstrumenta i zemlje ne bude znatnijih razlika potencijala.

Spojiti u tu svrhu nulinstrument, na pr. T u mostu po sl. 162., direktno sa zemljom, ne bi predstavljalo ispravan put. Redovno je bolje spojiti sa zemljom jedan pol one dijagonale mosta u kojoj leži izvor struje, na pr. načinivši spoj sa zemljom naznačen u sl. 162. Zaštićivanje kao u sl. 167. pogotovo je dobro sredstvo protiv neželjenih kapacitivnih utjecaja u mostu. No najradikalnije sredstvo, vrlo mnogo upotrebljavano kod najpreciznijih mjerenja, jest da se upotrebi t. zv. *Wagnerov pomoćni most* (Wagnersche Hilfsbrücke ili Wagnerscher Hilfszweig; Wagner's earthing device), koji nulinstrument (slušalicu ili vibratorni galvanometar) dovodi na potencijal zemlje, a da ga ipak ne spaja direktno sa zemljom.

Za bolje razumijevanje svrhe i funkcije »Wagnerove zemlje« zamislimo da je uspjelo udesiti međusobno pojedine grane mosta u sl. 165., ili općenitije u ma kakovom mostu s kompleksnim otporima 3_1 do 3_4 kao u sl. 168., na točno »ravnotežje« u mostu. To znači da bi na pr. u sl. 168. točke 1 i 2 ostale kod uzbuđenja mosta izmjeničnom strujom na istom potencijalu. No taj potencijal ne mora biti ujedno i potencijal zemlje. Ako sad nulinstrument, na pr. slušalica na glavi mjeritelja, ima kapacitivne veze prema zemlji, kod razlike potencijala nulinstrumenta prema onomu zemlje mora teći nešto kapacitivne struje, m a k a r most bio u ravnotežju, te točke 1 i 2 imale isti potencijal.

Ako se međutim paralelno dijagonali mosta u kojoj je izvor struje stavi »Wagnerov pomoćni odvojak« s dva kompleksna otpora $3''$ i $3'''$, tako sastavljena da se otporima $3''$ i $3'''$ dade udesiti omjer iznosa i razlika faznih kuteva paralelnih kombinacija 3_1 i 3_2 , te 3_2 i 3_4 otpora 3_1 do 3_4 glavnoga mosta, pa ako se spojno mjesto

između $3'$ i $3''$ spoji sa zemljom Z, onda će očito postepenim udešavanjem impedancija $3'$ do 3_4 glavnoga mosta i impedancija $3'$ i $3''$ »Wagnerove pomoćne naprave« biti moguće, služeći se nulinstrumentom N, priključenim preklopkom A čas preko 2 u glavni most, a čas preko 3 na »Wagnerovu zemlju«, postići da nulinstrument pokazuje nulu struje uz preklopku A okrenutu bilo na 2, bilo na 3. U tomu slučaju most je ne samo u ravnotežju, nego su točke 1 i 2 i na potencijalu zemlje, pa ne može biti kapacitivnih struja između N (slušalice, vibracionoga galvanometra) i Z.

Ovako se po Wagneru vrše najtočnija mjerenja kapaciteta i gubitaka kod mostova po sl. 165., kod onih po Scheringu (na koje ćemo odmah preći) i drugih. Kod upotrebe sa spojem po sl. 165. za $3'$ i $3''$ bi se uzele kombinacije radnih otpora i kapaciteta.

61. Uz spoj po sl. 165. za mjerenja kapaciteta i gubitaka u dielektrikumu prikladan je i spoj *Scheringova mosta* po shemi u sl. 169. Scheringov most se čak najviše upotrebljava za ovakove svrhe, tim više što je, osim za mjerenja kod niskih napona, prikladan i za *visokonaponska* ispitivanja (budući da su kod njega elementi R_3 i C_4 , kojima se udešava ravnotežje mosta, jednim polom spojeni sa zemljom), tako da se »visokonaponskim« Scheringovim mostom vrše ispitivanja sve do najviših napona ne samo gotovih kondenzatora, nego se istražuju gubici i dielektrička konstanta (A-11.) također uzoraka dielektričkih tvari na improviziranim kondenzatorima s dielektrikumom od istraživanih materija. A pogotovo mnogo mjere se Scheringovim mostom kapaciteti i dielektrički gubici komada visokonaponskih kabela, pa i onih za najviše napone, koji se i ispituju takovim naponima.

Po slici 169. most dobiva željeni napon preko transformatora s primarnim namotajem P, koji se na mrežu električke struje priključi preko 1 i 2, i sekundarnim namotajem S, spojenim s mostom jednim polom direktno, a drugim preko zemlje Z. Nepoznati kondenzator, ispitivani komad kabela, ili pločica istraživanoga dielektrikuma stisnuta između dva metalna obloga, tako da čini kondenzator, dolazi u prvu granu ($C_{0,8}$) mosta. U drugoj je grani samo fiksni mjerni kondenzator poznatoga kapaciteta C_2 i zanemarivih gubitaka (kod mostova za najviše napone C_2 se realizira na pr. kondenzatorom iz E-23. s komprimiranim plinom kao dielektrikumom). U trećoj je grani varijabilni radni otpor R_3 , a u četvrtoj paralelna kombinacija radnoga otpora R_4 s varijabilnim mjernim kondenzatorom kapaciteta C_4 .

Most, kod tipa prikazanoga u sl. 169. (ima i ponešto drugih varijanata Scheringova mosta), udešava se varirajući naizmjenice sad R_3 , sad C_4 , dok vibracioni galvanometar V ne pokaže nulu struje. Za taj slučaj, primjenom uvjeta (XI) na str. 134. i uzimajući kod proračunavanja četvrte grane u obzir relaciju (VI)

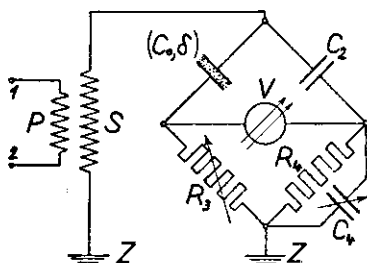
na str. 156., lako je simboličkom metodom izvesti ove relacije.

$$C_0 \approx C_2 \cdot \frac{R_4}{R_3} \cdot \frac{1}{1 + \varepsilon^2} \quad \text{tg} \delta \approx \omega R_4 C_4$$

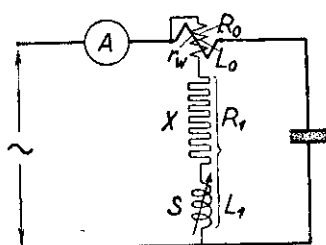
iz kojih se C_0 i δ mogu izračunati. Za praksu, zbog malenoga δ , može se uzeti približno:

$$C_0 \approx C_2 \cdot R_4/R_3 \quad \delta \approx \omega R_4 C_4$$

Kod ispitivanja visokonaponskih kabela dobivaju se podaci o upotrebljivosti kabela u pogonu ako se $\text{tg} \delta$ odredi kod različitih napona, sve većih i većih. Iz naglijega porasta $\text{tg} \delta$ počevši od određenoga napona dalje može se na pr. zaključiti na ionizaciju (možda u impregnaciji kabela zaostalog) uzduha i druge pojave koje navje-



SI. 169.



SI. 170.

šćuju popuštanje čvrstoće dielektrikuma protiv proboja od visokoga napona. Odatle već u E-57. istaknuta velika praktička važnost mjerenja $\text{tg} \delta$ kod visokonaponskih ispitivanja (kabela i dr.). Ima danas već i naprava koje registrirajući daju $\text{tg} \delta$ kao funkciju napona, primijenjenoga na kabel, kondenzator ili koju drugu visokonaponsku napravu (na pr. visokonaponski provod, Durchführung, bushing).

Iz vrijednosti C_0 dobivene za ispitivanu duljinu kabela lagan je prelaz na kapacitet po km duljine kabela; njegov je iznos $C_0 \times 1000/l$, ako l naznačuje ispitivanu duljinu kabela u metrima, jer između kapaciteta kabela i njegove duljine postoji direktna proporcionalnost. Slično za odvod po km duljine kabela vrijedi izraz $G \times 1000/l$ ako je $G = 1/R_0$ iznos odvoda za l metara dugi komad kabela, jer i odvod raste proporcionalno duljini kabela. Naprotiv za otpor gubitaka po km duljine vrijedi izraz $R_0 \times l/1000$, jer je otpor gubitaka manjega iznosa kod veće duljine kabela.

62. Osim mostovima izmjenične struje $\text{tg} \delta$ može se mjeriti i drugim metodama. Amo spadaju na pr. različite vatmetričke metode, koje se osnivaju na ideji u principu jednostavnoj: da se na kut gubitaka zaključi iz učina što ga kondenzator uz danu izmjeničnu napetost i struju troši. Iz relacije (E-55.) $N \approx EI \text{tg} \delta$ slijedi $\text{tg} \delta \approx N/EI$. Samo je poteškoća da se u praksi kod mje-

renja učina iole boljih kondenzatora mora računati s neznatnim $\lg \delta \approx \cos \varphi$, a prema tomu i neznatnim N , pa su potrebne specijalne naročito osjetljive izvedbe vatmetara, na pr. a statičkoga elektrodinamskoga sistema (v. B-25.), koje s nominalnim (maksimalno za njih predviđenim) iznosima napona i struje daju puni otklon već uz vrlo malen faktor učina. Dovoljne osjetljivosti za ovakve svrhe dadu se dosegnuti vatmetričkim sistemima »s obješenjem na metalnoj vrpici« (opisanim u B-11. kod opisa galvanometara), eventualno i sa zrcalnim očitavanjem (B-8.).

Dakako da je kod ovih mjerenja s malenim faktorom učina pogotovo odlučno da kombinacija »naponski svitak + dodani otpor X « iz B-23. doista pretstavlja praktički što točnije čisti radni otpor, dakle otpor kome se »fazni kut« praktički može smatrati jednakim nuli, odnosno da se zbog spomenutoga faznoga kuta uzme korekcija, jer čim faktor mjerenoga učina postaje manji, tim više utječu, po B-23., na rezultat i najneznatniji zaostali iznosi spomenutoga faznoga kuta. Treba naravno na očitavanju vatmetra preduzeti još i korekciju zbog vlastitoga potroška instrumenta (D-48.).

Točniji rezultati mogu se dobiti, ako se umjesto direktnoga očitavanja otklona vatmetra upotrebi metoda da se udešavanjem prikladnoga iznosa L varijabilnoga induktiviteta, dodanoga u naponski krug vatmetra kombinaciji: »naponski svitak + otpor X « po shemi u sl. 170., otklon vatmetra svede na nulu. Princip postupka razabire se iz vektorskoga prikaza u sl. 171.

Nesavršeni kondenzator, koji se može zamisliti nadomješten ekvivalentnom serijskom kombinacijom kapaciteta C i (relativno neznatnoga) otpora R (sl. 164. dolje) priključen je u sl. 170. kao potrošač po shemi I) spajanja vatmetra u sl. 119. (str. 115.). Ako je I efektivni iznos vektora struje $\vec{I}$ kroz strujni svitak vatmetra, koji neka pretstavlja radni otpor r_w , onda očito gubitke napona IR i Ir_w na otporima R i r_w treba predočiti vektorima OM i MN u smjeru vektora $\vec{I}$, dok gubitak napona $I/\omega C$ zbog prolaza struje $\vec{I}$ kroz čisti kapacitet C pretstavlja vektor OP na sl. 171., okomit na vektor $\vec{I}$. Ukupni napon vatmetra pretstavlja rezultanta $\mathcal{E}$ vektora OP , OM i MN ; ona je pomaknuta u fazi prema $\vec{I}$ za kut ψ , po sl. 171. manji od pravoga kuta za iznos $\delta + \beta$ sume kuteva δ i β (u kojoj je δ očito »kut gubitaka« nesavršenoga kondenzatora, a β dolazi zbog otpora r_w strujnoga svitka vatmetra).

Kad bi sad u naponskoj grani vatmetra bio samo potpuno čisti radni otpor, struja kroz naponski svitak bila bi točno »u fazi« s naponom i vektor $\vec{I}'$ te struje, kojoj efektivni iznos neka bude I' , bio bi istoga smjera kao $\mathcal{E}$. Vatmetar bi onda izveo otklon proporcionalan sa $I.I'.\cos\psi$ (B-23.). No kod dodanoga po sl. 170. induktiviteta dolazi do »zaostajanja u fazi« struje $\vec{I}'$ prema pripadnom naponu $\mathcal{E}$, što ima za posljedicu da kut (pomak faza) između $\vec{I}'$ i $\vec{I}$ postaje veći

od ψ , tako da kod nekoga određenoga ukupnog induktiviteta L' (uz ukupni radni otpor R' naponske grane vatmetra i određenu kružnu frekvenciju ω izmjenične struje) kut između $\mathcal{J}'$ i $\mathcal{J}$ mora narasti na iznos pravoga kuta, dakle kut između $\mathcal{J}'$ i $\mathcal{E}$ na iznos $\alpha = \delta + \beta$. To se stanje prepoznaje po tomu da otklon vatmetra padne na nulu, jer kod pomaka faza za 90° između struja kroz oba svitka vatmetra moment vrtnje vatmetra iščezava.

U R' i L' su relacijama $R' = R_0 + R_1$ i $L' = L_0 + L_1$ obuhvaćeni po sl. 170. uz radni otpor R_1 i induktivitet L_1 kombinacije dodanoga otpora X i varijabilnoga samoinduktiviteta S također i radni otpor R_0 i samonduktivitet L_0 naponskog svitka vatmetra.

Iz odnosa u sl. 171. lako je sada izračunati $\delta = \alpha - \beta$, odnosno $\operatorname{tg} \delta = R\omega C$, izračunavajući α iz relacije $\operatorname{tg} \alpha = L'\omega/R'$, a β iz relacije $\operatorname{tg} \beta \approx QR/OQ \approx MN/OP = r_w\omega C$, koja vrlo približno vrijedi uz malene kuteve β i δ .

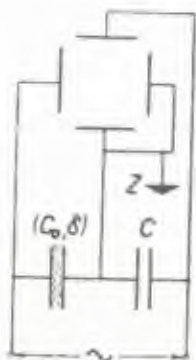
Ima i metoda mjerenja gdje se na određeni način kompenzira na nulu otklon vatmetra kod priključenoga normalnoga kondenzatora (bez gubitaka), a onda se normalni nadomjesti istraživanim nesavršenim i očita otklon. Također neki elektrostatski instrumenti mogu služiti za vatmetrička mjerenja gubitaka u kondenzatorima.

63. Za istraživanje (i demonstriranje) gubitaka u dielektrikumu dadu se upotrebiti i cijevi za katodne zrake (C-13.), s vrućom (po sl. 62. na str. 68.) ili s hladnom katodom. Postupak se osniva na činjenici da se kod istodobne primjene dvaju izmjeničnih napona iste frekvencije na parove pločica katodne cijevi za vertikalni i horizontalni otklon opaža na zastoru cijevi svijetla zatvorena krivulja (Lissajous-ova figura), nastala sastavljanjem vertikalnih i horizontalnih titraja koje bi primijenjeni naponi pojedinačno proizveli. Specijalno ako su oba primijenjena napona sinusoidna, i ako su međusobno »u fazi«, na zastoru se vidi kosi pravac. No ako između obih napona postoji neki pomak faza, Lissajousova slika bit će, po zakonima o sastavljanju međusobno okomitih titraja, koso položena elipsa, kod neznatnih pomaka faza posvema uska, a kod sve većih sve šira i šira, tako da kod pomaka faza 90° izlazi elipsa s horizontalnom i vertikalnom velikom i malom osi (odnosno kružnica kod jednake amplitude otklona od oba napona). Ako se sad na pr. po shemi u sl. 172. pusti izmjenična struja redom kroz neki savršeni kondenzator i kroz ispitivani kondenzator s gubicima, pa se na jedan par otklonskih pločica katodne cijevi pusti da djeluje napon prvoga kondenzatora, a na drugi par napon drugoga kondenzatora, koji će zbog gubitaka biti više ili manje pomaknut u fazi prema prvom naponu, onda se iz oblika i položaja (promatrane ili fotografirane) elipse na zastoru katodne cijevi, upravo iz veličine plohe te elipse, može zaključiti na iznos gubitaka, dakle na $\operatorname{tg} \delta$ ispitivanoga kondenzatora, odnosno dielektrikuma.

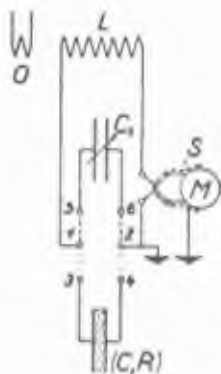
64. Za mjerenja u kondenzatorima kod *visokih frekvencija* se iskoristi činjenica da je struja rezonancije nekoga tipa kruga obrnuto proporcionalna s ukupnim radnim otporom kruga, jer se po E-8. prema induciranim naponima rezonancije (one za koju je ispunjen »uvjet rezonancije« $= 1/C\omega$) titrajni krug vlada kao čisti radni otpor.



Sl. 171.



Sl. 172.



Sl. 173.

Postupa se tako da se najprije odredi otpor R' titrajnoga kruga, resonantnog kod kružne frekvencije ω , a sastavljenog od nekoga određenoga induktiviteta L i od istraživanoga kondenzatora s gubicima, koji se može zamisliti nadomješten ekvivalentnom serijskom kombinacijom kapaciteta C i otpora R iz sl. 164. dolje (tako da se po E-56. može staviti: $\operatorname{tg} \delta = \omega CR$). A zatim se odredi radni otpor R'' kruga u kome je, uz netaknute ostale dijelove, ispitivani kondenzator nadomješten varijabilnim mjernim kondenzatorom kapaciteta C_1 i zanemarivih gubitaka. Ako je ovaj krug udešen na istu resonantnu kružnu frekvenciju ω kao i prvi, može se očito staviti: $C = C_1$ i $R = R' - R''$.

E

krug ispitivani kondenzator, a spojevima 1—5 i 2—6 mjerni varijabilni. No spojevi 1—3 i 2—4, odnosno 1—5 i 2—6, neka budu, po potrebi, bilo »kratka« premošćenja zanemariva otpora, bilo premošćenja uz pomoć specijalnih mjernih otpora za visokofrekventne svrhe, koji ukupni radni otpor pripadnoga titrajnoga kruga povećavaju za određeni iznos.

Pomislmo sad da titrajni krug otpora R' s ispitivanim nesavršenim kondenzatorom, ukopčanim kratkim premošćivanjem 1—3 i 2—4, dovedemo u resonanciju varirajući kružnu frekvenciju oscilatora O sve do iznosa ω , kod koga M pokaže maksimalnu struju efektivnoga iznosa I_1 . A zatim, uz netaknuto ostalo, zamjenjujući kratko premošćenje 1—3 i 2—4 premošćenjem mjernim radnim otporima poznatoga ukupnoga iznosa R_1 , povećajmo ukupni otpor titrajnoga kruga na iznos $R' + R_1$. Kod (fino adjustirane) resonancije M će sada pokazati struju I_2 ; zbog većega otpora ona će biti manja nego I_1 . Očito vrijedi relacija

$$I_1 R' = I_2 (R' + R_1)$$

iz koje se, uz poznato R_1 i očitano I_1 i I_2 , lako daje izračunati R' .

Ako se pak kratko premoste 1—5 i 2—6, nastat će titrajni krug radnoga otpora R'' , koji će se dati dovesti na resonanciju kod kružne frekvencije ω oscilatora O udešavanjem iznosa C_1 sve dok instrument M ne pokaže maksimum odklona: t. j. neku struju resonancije I_3 . Napokon dodajmo i ovom krugu sa C_1 , premošćujući 1—5 i 2—6 poznatim mjernim radnim otporima, neki povoljni iznos otpora R_2 , tako da nastane krug otpora $R'' + R_2$. Struja resonancije neka sada bude I_4 . Vrijedi relacija

$$I_3 R'' = I_4 (R'' + R_2)$$

iz koje se izračuna R'' .

Rasporedaj mjerenja u sl. 173. odgovara specijalnim metodama visokofrekventne mjerne tehnike. Kod mjerenja struja I_1 do I_4 stanje resonancije treba fino adjustirati. Treba pripaziti na zaštitu S i spojeve sa zemljom naznačene u sl. 173.

Mogu se kod mjerenja resonancijom u titrajnom krugu gubici u kondenzatorima određivati i jednostavnom supstitucijom. S ispitivanim kondenzatorom u titrajnom krugu udesi se struja resonancije udešavajući na iznos ω kružnu frekvenciju oscilatora koji uzbuđuje titrajni krug. A zatim se umjesto ispitivanoga kondenzatora stavi serijski spoj varijabilnog čistog kapaciteta C i varijabilnog radnog otpora R , koji se variraju dok se opet ne postigne resonancija kod iste kružne frekvencije ω i s istom jakošću resonantne struje kao prije. Udešene vrijednosti C i R su onda one koje odgovaraju ekvivalentnom spoju nesavršenoga kondenzatora iz sl. 164. dolje, pa se s njima, po E-57. i E-56. mogu izračunati C_0 i $\text{tg} \delta$.

U principu, dakako, nema zapreke ni da se direktno primijene kod visokih frekvencija m o s n i spojevi izmjenične struje za mjerenja kapaciteta i gubitaka kondenzatora, obični ili oni s resonan-

cijom iz E-46. Samo su poteškoće zaštićivanja i drugih metoda sprječavanja neželjenih (nuzgrednih) efekata tim veće, čim su više frekvencije, pa mjerenja »visokofrekventnim« mostovima traže svlađavanje posebne tehnike, ako treba da budu pouzdana.

65. Na mjerenja kapaciteta daje se svesti i određivanje relativne dielektričke konstante ϵ' (v. A-11.) izolatora. Izmjeri se na pr. kojom od opisanih metoda kapacitet C_0 nekoga kondenzatora, na pr. »pločastoga« ili kojega drugoga s u z d u h o m kao dielektrikumom (što praktički izlazi na isto kao da je dielektrikum vakuum, jer relativna dielektrička konstanta uzduha normalnoga pritiska ima vrijednost 1,0006 prema vrijednosti 1 za vakuum, t. j. njihova se razlika može zanemariti). A zatim se odredi kapacitet kondenzatora s posve istim prostornim rasporedajem obloga, ali s ispitivanim izolatorom kao dielektrikumom umjesto uzduha. Ako tvar kojoj treba odrediti ϵ' potpuno ispunjava prostor između obloga, traženi iznos ϵ' jednak je, po definiciji, omjeru C/C_0 .

Za proračunavanje veličine ϵ' može biti dovoljno i samo mjerenje iznosa C , ako je rasporedaj obloga geometrijski tako jednostavan da se kapacitet kondenzatora daje matematski izraziti prikladnom formulom. Takova je na pr. formula

$$C = 0,0886 \cdot 10^{-12} \epsilon' S/d \text{ farada} = 0,0886 \epsilon' C/d \text{ pikofarada}$$

za kapacitet kondenzatora kod koga dva jednaka obloga površine $S \text{ cm}^2$ stoje točno nasuprot jedan drugomu, tijesno priljubljeni s jedne i s druge strane na planparalelnu ploču nezna tne debljine $d \text{ cm}$, načinjenu od nekoga dielektrikuma dielektričke konstante ϵ' (ili su rastavljeni slojem tekućine debljine $d \text{ cm}$ kao dielektrikumom). Iz električki izmjerena kapaciteta C , te vrijednosti S i d utvrđenih direktnim mjerenjima dimenzija na samomu kondenzatoru, veličina ϵ' dobiva se po formuli

$$\epsilon' = 11,3 \cdot C \cdot d / S$$

u kojoj je S izraženo u cm^2 , d u cm , C u pF , a mjesto $1/0,0886$ je stavljen njegov iznos 11,3.

Kod preciznih mjerenja moraju se uzeti u obzir, odnosno eliminirati, efekti električnog polja oko rubova obloga, eventualni »rasipni« kapaciteti prema zemlji i susjednim vodičima i sl. Točnije¹⁾ je na pr. upotrebiti mjesto promatranoga jednostavnog pločastog kondenzatora pločasti kondenzator sa »zaštitnim prstenom«, ili »kondenzator s tri ploče« (kod kojega jedan oblog čini nutarnja ploča, a drugi oblog su obje vanjske ploče, nešto veće od nutarnje).

Ima i posve specijalnih postupaka mjerenja veličine ϵ' (na pr. metoda po Drude-u s pomoću valne duljine vrlo kratkih stojnih radio valova, proizvedenih uzduž voda od dva vodiča); oni leže izvan opsega ovih razmatranja.

¹⁾ Potanje na pr. u Kohlrausch, Prakt. Physik, 17. izd., Berlin 1935

Osim gubitaka i dielektričke konstante za karakterizaciju dielektrikuma služi i t. zv. »električka čvrstoća« (čvrstoća protiv električkoga proboja), koja se izražava brojem kilovolta na centimetar (v. primjer za kV/cm na str. 9.), dakle električkim poljem, kod koga nastupa proboj dielektrikuma. O toj veličini, koja međutim osim o vrsti ovisi još i o debljini sloja dielektrikuma, te o drugim uvjetima mjerenja, bit će još govora (kod visokonaponskih mjerenja).

VII. MJERENJA VODLJIVOSTI ELEKTROLITA (TEKUĆINA). UNIVERZALNI MOSTOVI

66. U općenitoj shemi po sl. 151. (str. 153.) mogu se, u principu, sve grane Wheatstoneova mosta za izmjenične struje zamisliti i bez kapaciteta i induktiviteta, t. j. realizirane samim radnim otporima R_1 do R_4 . Uvjet ravnotežja $R_1 : R_2 = R_3 : R_4$ ovakvoga mosta posvema je isti kao i kod Wheatstoneova mosta istosmjerne struje (D-7.), pa prema tomu ne bi bilo zapreke da se i čisti radni otpori mjere mostom izmjenične struje u ovako pojednostavljenom spoju. Ipak se obično mjerenja otpora žica, ili općenitije: »vodiča I. klase« (vodiča metalnoga karaktera), izvode istosmjernom strujom, jer se time izbjegava upotreba kompliciranijih izvora struje i kompliciranijih ili manje osjetljivih nulinstrumenata, kakovi dolaze u obzir kod mostova izmjenične struje. K tomu kod istosmjerne struje ne utječu na rezultat eventualni induktiviteti ili kapaciteti, na pr. induktiviteti svitaka, koji bi kod izmjenične struje došli do izražaja.

Naprotiv za mjerenja otpora *elektrolita*, kapljevityh »vodiča II. klase«, kod kojih je prolaz električke struje uvjetovan pojavama »elektrolize«, dolazi u obzir baš upotreba izmjenične struje u vezi s prikladnim mosnim mjernim rasporedajem i zgodnim nulinstrumentom, na pr. slušalicom.

Razlog su tomu komplikacije koje bi kod mjerenja istosmjernom strujom mogle nastati zbog pojava t. zv. polarizacije »elektroda«, preko kojih se struja u tekućinu uvodi i izvodi. Pojavom elektrolize izazvane »elektromotorne sile polarizacije«, dakle faktori koji nisu predviđeni kod izvođenja jednostavnoga uvjeta ravnotežja mosta istosmjerne struje, nužno naime izazivlju poremetnju onoga ravnotežja mosta koje odgovara jednostavnoj relaciji: $R_1 : R_2 = R_3 : R_4$. Kako je polarizacija ovisna o smjeru kojim prolazi struja, to se njezinim učincima nastoji izbjeći tako da se upotrebi kod mjerenja struja alternativno čas jednoga, čas drugoga smjera. Željeni efekt postizava se međutim dovoljno potpuno samo uz uvjet da je učestalost alternacija (promjena smjera struje) dovoljno visoka, iako ona s druge strane ne treba niti da je ekstremno visoka da

ne bi došli do izražaja nuzgredni efekti kod vrlo visokih frekvencija. Dolaze dakle najviše u obzir izmjenične struje tonskih frekvencija sa više stotina ili oko hiljadu Hz, kakove mogu dati i jednostavna zujala; u tomu su slučaju kao nulinstrumenti baš prikladne jednostavne slušalice. Za pogonska tehnička mjerenja, kod nešto manjih zahtjeva na točnost ili uz elektrode dovoljno velike površine, mogu se također upotrebiti i struje iz rasvjetne mreže od 50 Hz (u Americi 60 Hz); za nul-instrument će se u tomu slučaju uzeti na pr. vibracioni galvanometar ili galvanometar istosmjerne struje u vezi sa suhim ispravljačem.

67. Kako su elektrolitički vodiči kao tekućine (obično su to otopine »soli«, »baza« i »kiselina«, ili rastaljene soli) nestalnoga oblika, to se redovno mjereći njihov otpor ide za tim da se odredi njihov specifički otpor, ili njegova recipročna vrijednost: vodljivost tekućine. Samo se kod elektrolitičkih vodiča uvijek radi o mnogo puta većim specifičkim otporima, dakle mnogo puta manjim vodljivostima, nego li se obično susreću kod metalnih vodiča, pa se specifički otpor, a slično i vodljivost tekućina, većinom ne izražavaju, kao kod kovina, svedeni na vodič duljine 1 m i prereza 1 mm², nego na vodič duljine 1 cm i prereza 1 cm², u kome slučaju (zbog 100-strukoća prereza i 100 puta manje duljine) specifički otpor izlazi izražen u $\Omega \cdot \text{cm}^2/\text{cm}$ 10000 puta manjim brojem, a vodljivost u S.cm/cm² 10000 puta većim brojem.

Još je važna okolnost kod mjerenja vodljivosti elektrolita da se njihov otpor relativno vrlo jako mijenja s temperaturom (i to u protivnom smislu nego obično kod kovina: dok specifički otpor kovina i kovnih slitina redovno raste s temperaturom, i prema tomu njihova vodljivost pada kod povišavanja temperature, dotle specifički otpor elektrolita opada, i prema tomu njihova vodljivost raste, i to s relativnim visokim »temperaturnim koeficijentom porasta vodljivosti« β). Potrebno je dakle, kod točnijih mjerenja vodljivosti elektrolita, da temperatura istraživane tekućine bude točno poznata i jednolika u cijeloj tekućini (precizni termometri; posuda s tekućinom uroñjena u kupku stalne temperature; po potrebi miješanje tekućine). Za određivanje temperaturnog koeficijenta β porasta vodljivosti s temperaturom dovoljno je, dakako, da se odredi vodljivost tekućine kod dvije određene temperature, dovoljno blize da se može suponirati linearno mijenjanje vodljivosti s temperaturom.

Za ilustraciju kako elektroliti mnogo lošije vode električku struju nego kovine neka bude spomenuto da na pr. relativno vrlo

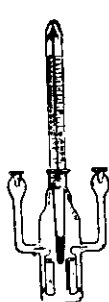
dobro vodljiva »zasićena« vodena otopina NaCl (oko 26 g kuhinjske soli NaCl u 100 g tekućine) ima kod 20° vodljivost

$$\kappa = 0,226 \text{ S.cm/cm}^2 \quad (= 0,000226 \text{ S.m/mm}^2)$$

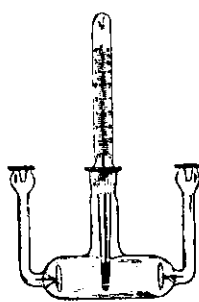
što je oko 2,5 milijuna puta manji iznos κ nego kod bakra (koji uz $\rho = 0,0175 \text{ } \Omega.\text{mm}^2/\text{m}$ ima $\kappa = 1/\rho = 57$). Kod različitih drugih i razrijeđenijih otopina vrijednosti κ su još mnogo puta niže, a destilirana voda može imati κ u okolini od $1 \text{ } \mu\text{S.cm/cm}^2$, i znatno ispod toga.

Kod gore spomenute otopine NaCl ugrijavanjem na 21° C poviši se κ na iznos 0,231 S.cm/cm², t. j. za više nego 2% uz 1 stupanj C povišenja temperature, dok naprotiv κ bakra pada, i to tek za 0,39% uz isto povišenje temperature.

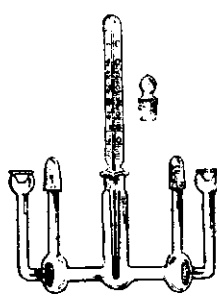
68. Kao materijal elektroda kod mjerenja vodljivosti elektrolita upotrebljava se obično lim od platine (zbog otpornosti platine protiv kemijskih reakcija). Već je istaknuta važnost velike površine elektroda, osobito kod rada s nešto nižim frekvencijama. Da bi se i kod malenih komada platinenoga lima postigle velike djelotvorne površine elektroda, dobro je elektrode »platinirati«, t. j. oboriti na njihovoj površini t. zv. »crnu platinu« (Platinschwarz, crni sloj vanredno fino porazdijeljene platine), što se može izvesti elektrolitički (da se elektroda, na pr. od Pt-lima, koju treba platinirati, uzme za vrijeme od 10 minuta, s gustoćom struje oko 0,03 A/cm², za »katodu« kod elektrolize 3%-ne otopine platinenoga klorida, kojoj je dodano posve malo olovnoga acetata). Međutim katkad se upotrebljavaju i gole platinene elektrode, a i mjesto platinenih mogu biti dobre zlatne ili naprosto ugljene elektrode.



SI. 174.



SI. 175.



SI. 176.



SI. 177.

Rasporedaj elektroda odabire se prema boljoj ili lošijoj vodljivosti tekućina određenih za ispitivanje, jer treba paziti da duljina i prerez stupca tekućine između elektroda budu takovi da mjereni otpori izidu, zbog točnijega i udobnijega mjerenja, po mogućnosti u području osrednjih iznosa oma, na pr. u području od nekoliko desetica do nekoliko tisućica oma.

Kod tekućina relativno malene vodljivosti elektrode će dakle biti nešto veće i smještene bliže jedna drugoj u posudi za tekućinu, na pr. kao u »stanici« za mjerenje vodljivosti na sl. 174. Kod tekućina osrednje, odnosno visoke vodljivosti upotrebit će se rasporedaji po sl. 175., odnosno sl. 176., s manje ili više daleko razmaknutim elektrodama i sa stupcem tekućine manjega prereza.

Kod pogonskih tehničkih mjerenja udobno je, ako se elektrode tako montiraju da se naprava s elektrodama može uroniti u ispitivanu tekućinu, kako je to prikazano na primjeru stanice u sl. 177. s rasporedajem elektroda za tekućine malene vodljivosti i sa staklenim zvonom dolje otvorenim za ulaz tekućine i gore snabdjevenim rupicama za izlaz uzduha.¹⁾

69. Samo mjerenje obavlja se po shemi u sl. 178. s izvorom struje i nulinstrumentom N , pri čemu S može biti kojagod stanica za mjerenje vodljivosti, na pr. koja od onih iz sl. 174. do 177. Otpori R_1 i R_2 mogu se realizirati dijelovima a i b klizne žice kao u sl. 178., ali također i mjernim reostatima (slično kao kod mosta u sl. 161.). Ako je R otpor prve grane mosta kod danoga rasporedaja elektroda, a ostale grane mosta su radni otpori R_2 do R_4 , ravnotežje kod nule struje u nulinstrumentu za izmjeničnu struju N bit će kod ispunjene relacije $R : R_2 = R_3 : R_4$, iz koje se može izračunati R (u Ω).

Da se sad odredi vodljivost κ , najjednostavnije bi bilo zamisliti da je mjerenje izvedeno uz prolaz struje kroz stupac tekućine točno određenoga prereza i duljine, kako je to idealizirano predloženo stanicom u sl. 178. sa staklenom cijevi unutarnjega prereza q cm², ispunjenom tekućinom u prostoru između l cm udaljenih elektroda koje točno pristaju u cijev. U tomu slučaju, zbog $R = \rho \cdot l / q = l / \kappa q$, vrijedila bi naprosto relacija:

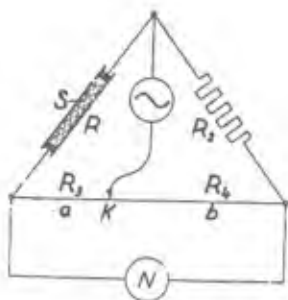
$$\kappa = l / q R = A / R \quad \text{S.cm/cm}^2 \quad (\text{stavivši: } l / q = A)$$

U praksi strujanje električne struje kod rasporedaja elektroda na pr. kao u sl. 174. do 177. i sličnih očito je mnogo kompliciranije, pa se ne može govoriti o nekim određenim iznosima l i q stupca tekućine. No može se uzeti da za određenu stanicu za mjerenje vodljivosti postoji neka karakteristična konstanta A , e k v i v a l e n t n a kvocijentu l / q onoga jednostavnoga slučaja i naznačena tim da vrijedi relacija $R = A / \kappa$, odnosno obrnuto: $\kappa = A / R$.

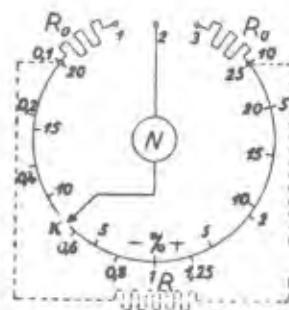
Ta konstanta A može se eksperimentalno odrediti za određenu stanicu da se izmjeri otpor R_0 kod stanice napunjene ne-

¹⁾ Termometri u sl. 174. do 176., koje (zajedno sa sl. 177.) predočuju konstrukcije L&N, imaju skalu podijeljenu u razmacima od 0,2 stupnja C. U dovodne cijevčice k elektrodama u sl. 174. do 176. ulije se žive, a u ovu se utaknu krajevi pripadnih priključnih žica.

kom tekućinom poznate vodljivosti κ_0 , na pr. gore spomenutom zasićenom otopinom NaCl. Traženi iznos A slijedi iz relacije $A = \kappa_0 \cdot R_0$. A kad je jednom A za izvjesnu stanicu određeno, dakle kad je stanica »baždarena«, mogu se tom stanicom određivati vodljivosti drugih tekućina. Treba samo stanicu napuniti istraživanom tekućinom, odrediti njoj pripadni otpor R u mostu, te računati vodljivost po formuli: $\kappa = A/R$.



Sl. 178.



Sl. 179.

Kako je A ekvivalentno kvocijentu neke duljine u cm i neke površine u cm^2 , jedinica za A su »recipročni centimetri« (»dimenzija« konstante A jest cm^{-1}). Općenito će A neke stanice biti tim veće čim je stanica predviđena za tekućine veće vodljivosti. Tako na pr. izvedbama u sl. 174. i 177. odgovaraju konstante A od 0,17, odnosno 0,1 »recipročnih cm«, dok stanica u sl. 175. već ima $A = 1,3$, a ona u sl. 176. čak $A = 15,0 \text{ cm}^{-1}$.

70. Za baždarenje stanica mogu služiti, već prema tipu stanice, ove otopine precizno određenih vodljivosti:

- I. Sumporna kiselina maksimalne vodljivosti (30%-na),
- II. Zasićena otopina NaCl (ca. 26%-na),
- III. »Normalna« otopina KCl (74,6 g KCl u 1000 cm^3 otop.)
- IV. Zasićena otopina sadre.

No upotrebljavaju se i »1/10-normalna«, »1/50-normalna« i »1/100-normalna« otopina KCl, zatim »maksimalno vodljiva« (17,4%-na) otopina MgSO_4 .

Evo vodljivosti kod 18° i 20° C otopina I. do IV. (u S. cm/cm^2):

Tabela VIII.

	I.	II.	III.	IV.
18°	0,7398	0,2161	0,09824	0,001880
20°	0,7645	0,2260	0,10209	0,001976

Primjer: Napunjena zasićenom otopinom NaCl od 18° C neka stanica za mjerenja vodljivosti dala je, mjerenjem u mostu, otpor 48,6 Ω . Njezina konstanta jest:

$$A = 0,2161 \times 48,6 = 10,5 \text{ cm}^{-1}$$

Ista stanica napunjena nekom drugom tekućinom iste temperature pokazala je otpor 190Ω . Vodljivost te tekućine kod 18°C iznosi:

$$\kappa = 10,5/190 = 0,0553 \text{ S.cm/cm}^2 (= 0,0553 \text{ S.cm}^{-1})$$

Katkad se postigne točnija nula struje u mostu, ako se u drugu granu mosta doda neznatno kapaciteta (s pomoću varijabilnoga kondenzatora s uzduhom s maksimalnim kapacitetom od nekoliko stotina pikofarada, priključenoga paralelno otporu R_2).

Mjerenja elektrolitičkih vodljivosti mnogo se praktički primjenjuju, na pr. u različitim industrijama (za nadziranje koncentracije tekućina, osobito otopina soli); za kontrolu pitke vode, kondenzata parnih kotlova i sl. na može bitna onečišćenja; za ispitivanje kvalitete mlijeka i u drugim prilikama.

Ima danas već naprava koje koncentraciju određenih tekućina pokazuju otklonom prikladnoga instrumenta sa skalom koja je odmah baždarena u g/l (gramima neke soli na litru tekućine). A kako tokom ispitivanja temperatura mnogih tekućina dosta varira, predviđene su kod nekih aparatura i automatske »kompenzacije« promjena temperature. Ako se još uz to otkloni i registriraju prikladnim registracionim instrumentom (C-I.), može to dati vrlo preglednu kontrolu nekoga pogona, zbog čega se metode s pomoću mjerenja vodljivosti u novije vrijeme sve više šire.

71. Također za mjerenja elektrolitičkih otpora, ali i za niz drugih primjena (mjerenja neelektrolitičkih radnih otpora, mjerenja kapaciteta, po potrebi i induktiviteta itd.), dakle »univerzalni«, jesu mostovi izmjenične struje koji osim što kao sredstvo za variranje omjera R_3/R_4 treće i četvrte grane mosta sadrže kliznu žicu, eventualno s dodanim otporima na oba kraja po shemi u slici 79. (str. 79.), imaju ugrađen odmah i indikator nule izmjenične struje. Već prema tomu koje se veličine žele mjeriti, mogu se kao druga ili prva grana uzeti poznati radni otpori, kapaciteti ili induktiviteti, koji mogu biti sadržani u samoj aparaturi, pa se ukapčaju preklopkom, ili se izvana dodadu. U preostalu granu mosta dolazi istovrsna nepoznata (mjerena) veličina.

Primjer moderne izvedbe po ovim principima jest most izmjenične struje »Philoscop« (konstrukcija: Philips), koji je naročito zanimljiv zbog ugrađenoga posebne vrsti nulindikatora na principu cijevi s katodnim zrakama.

Osnovni je spoj mosta kao u sl. 179. Otpori R_0 s obje strane klizne žice tolikoga su iznosa da se kod pomicanja kliznoga kontakta K od početka do kraja klizne žice postizavaju omjeri otpora 1-K i K-3, dakle omjeri R_3/R_4 , s iznosima između 0,1 i 10. Od K vodi spoj preko indikatora nule izmjenične struje N do stezaljke 2. Kako se sad između stezaljki 2 i 3 preklopkom mogu ukopčati po volji otpori 1Ω , 100Ω , 10000Ω i $1 \text{ M}\Omega$, to se, priključeni između 1 i 2, mogu očito mjeriti mostom otpori unutar područja od 0,1 do 10Ω , odnosno od 10 do 1000Ω , pa od

1000 Ω do 0,1 M Ω i konačno od 0,1 M Ω do 10 M Ω , dakle ukupno unutar širokoga neprekinutoga područja od 0,1 Ω do 10 M Ω . Ne treba u tu svrhu drugo, nego udesiti most na nulu struje klizanjem kontakta K i pomnožiti očitani (na pripadnoj skali) omjer R_3/R_4 s iznosom otpora koji je baš priključen između 2 i 3. Mjereni otpori mogu biti i elektrolitički.

Kod mjerenja kapaciteta poznati kapacitet, preklopom odabran po volji u iznosu od 100 pF, 10000 pF ili 1 μ F, ukopča se između stezaljki 1 i 2, a ispitivani kondenzator priključuje se na stezaljke 2 i 3, tako da i kod mjerenja kapaciteta vrijedi, za različite položaje kliznoga kontakta K, ista skala iznosa 0,1 do 10 (t. j. mjereni kapacitet između 2 i 3 dobiva se množeći iznos poznatoga kapaciteta između 1 i 2 očitanoj vrijednošću na skali iznosa 0,1 do 10, a ne treba uzimati recipročni iznos očitane vrijednosti).

Konačno se preklopka može okrenuti i na »otvoreni« most, t. j. u položaj kad ni 1—2, ni 2—3 nisu direktno premošteni nekim elementom iz same aparature, nego se i poznata i ispitivana grana mosta priključuju izvana. Ako se kod ovoga položaja preklopke između 1 i 2 izvana priključi na pr. kondenzator veći od 1 μ F, otvara se mogućnost da se mjere i kapaciteti iznad 10 μ F priključeni između 2 i 3. A s pomoću varijabilnih poznatih induktiviteta izvana priključenih na 2 i 3 otvara se mogućnost da se mjere induktiviteti ukopčani između 1 i 2.

Osim toga jednim otporom paralelnim kliznoj žici (otporom R crtkano naznačenim u sl. 179.) može se otpor klizne žice tako smanjiti da, uz netaknuta oba otpora R_0 , omjer vrijednosti R_3/R_4 kod pomicanja kontakta K od početka do kraja klizne žice varira samo u granicama od 0,8 do 1,25, t. j. od 20% i s p o d pa do 25% i z n a d vrijednosti 1 koja odgovara sredini klizne žice. U tom slučaju most postaje »procentni most« (D-8.), prikladan za kontrolna mjerenja odstupanja u % od predviđene vrijednosti na pr. većega broja otpora, kapaciteta itd. Tako bi se kod kontrole kondenzatora koji treba da imaju, unutar određenih granica tolerancije, vrijednost recimo 2 μ F priključio izvana kao poznati kapacitet kondenzator od točno 2 μ F i postotna odstupanja ispitivanih kondenzatora, t. j. za koliko % njihovi kapaciteti iznose više (+) ili manje (—) nego 2 μ F, očitavala bi se, već prema položaju kontakta K u slučaju ravnotežja mosta, direktno na »postotnoj skali« mosta (koja je i u sl. 179. pored skale iznosa 0,1 do 10 naznačena).

72. Kao struja mjerenja uzimlje se kod promatranoga mosta obično struja od 50 Hz iz rasvjetne mreže, i to posredstvom »ulaznoga transformatora«, koji napon mreže snizi na vrlo malo volta; no nema zapreke da se uzmu i struje koje druge frekven-

cije od 40 do 10000 Hz, što katkad može biti od važnosti, na pr. ako se kod mjerenja elektrolitičkih otpora želi raditi kod viših frekvencija.

Struja iz mreže služi ujedno i za pogon nulindikatora N, koji je u ovom mostu zapravo cijela naročita naprava s tri elektronske cijevi u prikladnom spoju. Ne ulazeći u detalje primijetimo samo kratko¹⁾ da je jedna između tih cijevi specijalna cijev EM1, koja oko električki grijane katode ima u svom gornjem, »indikatorskom«, dijelu prema gore lijevkasto otvorenu anodu, pozitivno nabijenu i prepariranu prikladnim materijalom koji zelenkasto svjetluca ondje gdje ga zgađaju spore katodne zrake u obliku elektrona emitiranih iz vertikalno smještene katode. Cijev EM1 sadrži također, u svom donjem dijelu, i »triodni« sistem (t. j. kombinaciju »katode«, »mrežice« i »anode« u raspoređaju kao kod običnih radio cijevi: »trioda«).

Ako se sad na mrežicu triodnoga sistema u cijevi EM1 pušte da djeluju promjenljivi električki potencijali, to po osnovnim svojstvima radio cijevi mora izazvati promjene anodne struje triode. Tim se pak promjenama mogu, posredstvom njima izazvanih varijacija »gubitka napona« u prikladnom otporu (2 MΩ) ukopčanom u anodni krug triodnoga dijela cijevi EM1, proizvesti relativno znatni promjenljivi naponi na četiri žice, tako raspoređene u prostoru između katode i lijevkaste anode »indikatorskoga« dijela cijevi EM1 da stoje u jednolikim razmacima okolo naokolo uz katodu, i to paralelno s njom.

Ovako raspoređene, i na opisani način promjenljivim električkim potencijalima podvrgnute, ove četiri žice nužno će imati promjenljivi učinak na staze elektrona što u indikatorskom dijelu cijevi EM1 idu iz katode prema lijevkastoj anodi, pa ovi ne će zgađati lijevkastu anodu jednoliko, nego će stizati na nju u četiri pramena promjenljive širine, već prema varijacijama potencijala na četiri žice. Zbog toga ni anoda ne će zasjati jednolikim svjetlucanjem, nego u četiri svijetla sektora širine promjenljive u ritmu varijacija potencijala na četiri žice oko katode. Konačni efekt jest da se na lijevkastoj anodi gledanoj s vrha cijevi EM1 vidi kao neki svijetli križ, s kracima neke minimalne širine (po prilici kao na sl. 180.), odnosno manje ili više proširenima (po prilici kao na sl. 181.), već prema tomu da li između katode i mrežice triodnoga sistema u cijevi EM1 ne djeluje nikakav ili djeluje neki manji ili veći izmjenični napon.

Prema tomu cijev EM1 u opisanomu spoju može poslužiti kao indikator nule ili postojanja izmjeničnoga napona između

¹⁾ Više o spoju nulindikatora N (i dalje potankostj o opisanom mostu) vidi na pr. u »Philips' Technische Rundschau«, god. II. (1937), str. 270 do 275.

katode i mrežice njezina triodnog sistema. Može se dakle njom konstatirati i postojanje ili nepostojanje izmjeničnoga napona između K i 2 u mostu na sl. 179.

Međutim, da bi se postigla velika osjetljivost udešavanja mosta, ne primjenjuje se napon između K i 2 direktno na cijev EM1, nego istom nakon pojačanja (do 2000-strukoga iznosa) s pomoću cijevi s tri mrežice (pentode EF6) upotrebljene u »pojačalačkom« spoju. Istom ovako pojačan pušta se napon K-2 da djeluje između mrežice i katode triodnoga sistema u indikatorskoj cijevi.

Pored EM1 i EF6 naprava sadrži, kao treću cijev, »ispravljačicu« AB2 u prikladnom spoju za proizvođenje, priključkom na izmjeničnu mrežu, istosmjernih napona potrebnih anodama (i drugim elektrodama) ostalih dviju cijevi.

Osjetljivosti udešavanja mosta koje se ovom napravom postavljaju mogu biti vanredno velike. Ekstremno se može postići da se već kod promjene izmjeničnoga napona između K i 2 za samo malo milivolta vidljivo promijeni širina krakova svijetloga križa. Obično je dovoljno ako se naprava udesi na znatno smanjenu osjetljivost.

Cijev EM1 upotrebljava se, u drugom spoju, i kod radio aparata za indiciranja točnoga udešenja na visokofrekventne signale primanih radiofonskih stanica.

73. Evo još primjera, kako su mostovi s izmjeničnom strujom mnogostruko upotrebljivi. Već je pokazano, kako se mostovi po sl. 179. mogu upotrebiti za mjerenja radnih otpora vodiča I.



Sl. 180.



Sl. 181.

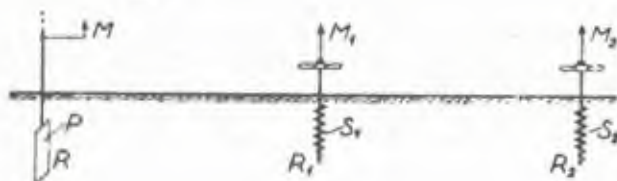
i II. klase, te za mjerenja kapaciteta (i induktiviteta). Prema tomu polje primjena ovakvih mostova mora obuhvaćati i takova mjerenja koja izlaze na mjerenja otpora, naročito elektrolitičkih, na mjerenja kapaciteta i sl. Tako se na pr. mostom iz sl. 179., tjeranim izmjeničnom strujom, može tražiti mjesto pogriješke u kabelima, i to jednako lako ako se radi o dozemnom spoju pojedinih vodiča, odnosno kratkom spoju između dva vodiča (radi se po shemi u sl. 80., odn. 81. na str. 80., kao i kod mjerenja istosmjernom strujom, samo što sada mjesto baterije B treba zamišljati izvor izmjenične struje, dok je galvanometar G već nadomješten u sl. 179. nulinstrumentom N izmjenične struje), kao i onda kad se radi o prekidu vodiča, gdje se po D-9. i D-55. pro-

blem svodi na mjerenja kapaciteta (samo što se ovdje kapaciteti, umjesto »balistički« kao u D-55., određuju mostom izmjenične struje).

74. A moguće je mostom iz sl. 179. mjeriti i »otpor uzemljenja« (otpor zemnoga spoja, Erdungswiderstand, ground connection resistance) spojeva sa zemljom realiziranih na pr. kovnim pločama, cijevima i sl. ukopanim u zemlju. Kod ovih mjerenja, obzirom na elektrolitički karakter vođenja električne struje u zemlji, baš je potrebno raditi s izmjeničnom strujom.

Neka na pr. treba odrediti otpor spoja kojim je, po sl. 182., pločom P ukopanom u zemlju priključen na zemlju recimo munjovod, neki radio uređaj ili slično. Ako u tu svrhu stoje u dovoljnom razmaku na raspoloženju još dva »pomoćna uzemljenja«, već u uređaju izvedena ili umjetno načinjena na pr. time da se duboko (bar 1 m) zabiju ili ušarafe u zemlju prikladne debele željezne ili bakrene cijevi, odnosno specijalna debela kovna »zemna svrdla« (Erdbohrer) kao S_1 i S_2 u sl. 182., onda je otpor R ispitivanoga uzemljenja s pomoću ploče P (a ujedno i otpore R_1 i R_2 obih pomoćnih uzemljenja) moguće odrediti s pomoću tri mjerenja mostom izmjenične struje iz sl. 179.

Nazovimo sa M priključak koji vodi od ispitivanoga spoja sa zemljom, a M_1 i M_2 neka budu priključci što vode od »pomoćnih uzemljenja«. Ako se sad na spoj za mjerenja izmjeničnom strujom iz sl. 179., nadopunjen u most za mjerenja



Sl. 182.

radnih otpora prikladnim mjernim otporom ukopčanim između 2 i 3, spoje na 1 i 2 najprije priključci M i M_1 , zatim priključci M i M_2 , te napokon priključci M_1 i M_2 , pa se most svaki puta dovede u ravnotežje, dobiveni iznosi otpora A , B i C bit će praktički jednaki redom sumama $R + R_1$, $R + R_2$ i $R_1 + R_2$, t. j. vrijedit će tri jednadžbe:

$$\begin{aligned} R + R_1 &= A \\ R + R_2 &= B \\ R_1 + R_2 &= C \end{aligned}$$

iz kojih je lako izračunati ne samo otpor mjerenaog spoja sa zemljom:

$$R = (A + B - C)/2$$

nego i ostale dvije nepoznanice R_1 i R_2 .

Primjer: Mjerenja neka su dala (u Ω): $A = 72$; $B = 68$; $C = 80$. Kao otpor ispitivanoga uzemljenja dobiva se $R = 30 \Omega$, a za R_1 i R_2 izlaze vrijednosti $R_1 = 72 - 30 = 42 \Omega$, odnosno $R_2 = 68 - 30 = 38 \Omega$.

Jači gubitak napona kod prolaza struje između dva uzemljena vodiča opaža se u glavnom samo u okolici vodiča do daljine od kojih 5 m. Izvan te zone otpor zemlje prema prolazu struje može se praktički zanemariti. Da se dobiju pouzdani rezultati, razmaci istraživanog i obih pomoćnih uzemljenja će se dakle uzeti iznad 10 m, a obično se zbog sigurnosti ne uzimlju ispod 15 do 20 m. Tako bi na pr. u sl. 182. razmake od P do S_1 , te od S_1 do S_2 , trebalo uzeti oko 20 m.

Da se gore opisanim (Nippoldtovim) postupkom s dvije pomoćne zemlje dobiju bar donekle pouzdani rezultati, moraju pomoćna uzemljenja biti izvedena slično pomno kao i ispitivani spoj sa zemljom, t. j. s otporima R_1 i R_2 ne bitno većima od R . Jer ako su iznosi R_1 i R_2 veliki prema R , nepouzdanosti mjerenja iznosa A , B i C dolaze tako jako do izražaja u rezultatu koji izražava R da dobiveni iznos R može postati posve nepouzdan. O tomu se lako uvjeriti ako se zamisli konkretni numerički primjer, s iznosima R_1 i R_2 velikima prema R , pa se, dopustivši da nesigurnosti u određivanju iznosa A , B i C imaju određeni postotni iznos, razmotri koliko taj iznos u najnepovoljnijem slučaju može utjecati na R izraženo sa A , B i C .

Jedna druga mosna metoda, po Wiechertu, zahtijeva samo jednu »pomoćnu zemlju« (i uz to još jednu »sondu«, t. j. primitivan spoj sa zemljom, kojim u slučaju ravnotežja mosta ne teče uopće s.r.u.a, pa njegov otpor ni ne ulazi u rezultat).

Osim mosnih metoda ima za mjerenja otpora zemnih spojeva još metoda s »kompenzacijom« kod izmjenične struje i drugih postupaka, pa i specijalnih aparata [»mjerila uzemljenja« megger i meg, izvedbe E&V srodne istoimenim »mjerilima izolacije« iz D-34.; aparati S&H itd.].

Naročitu točnost kod mjerenja otpora zemnih spojeva ne treba zahtijevati, jer ti otpori (kao i izolacioni) dosta variraju, na pr. s vlagom zemlje i dr. Uostalom otpori zemnih spojeva osim o dubini ukapanja i plohi ukopanoga vodiča znatno ovise o vrsti (električkoj vodljivosti) tla, tako da mjerenja uzemljenja mogu poslužiti i kao pomagalo geologu kod ispitivanja tla.

VIII. MJERENJA FREKVENCIJE I POMAKA FAZA

75. O aparatima i postupcima koji mogu poslužiti za mjerenja frekvencije izmjeničnih struja bilo je već govora u prijašnjim poglavljima u vezi s drugim temama tako da će biti dovoljno ako se samo pregledno rekapituliraju i nadopune metode koje tu dolaze u obzir.

Te metode mogu biti vrlo različite, već prema tomu da li se mjeri u područjima tehničkih niskih i tonskih frekvencija ili se radi o visokofrekventnim mjerenjima, te da li se radi o pogon-

skim mjerenjima instrumentima s direktnim očitanjem frekvencije ili o mosnim i drugim više laboratorijskim postupcima.

U području tehničkih niskih frekvencija i u donjem tonfrekventnom području (do 1000 Hz) dobro se daju upotrebiti mjera frekvencije s jezičcima opisana u B-50. Ona pružaju prednost direktnoga očitavanja mjerene veličine.

Također s direktnim očitanjem jesu mjera frekvencije s kazalom. Ona se odlikuju kontinuiranim pokazivanjem promjena mjenoga iznosa i prema tomu su prikladna i za registracije. Mjerni sistemi mjera frekvencije s kazalom mogu se osnivati na vrlo različitim principima. Savršeniji između tih sistema pokazuju mjerenu frekvenciju bez obzira na varijacije, unutar širih granica, napona na koji su priključeni. Redovno su to »kvocijentna mjera« u spoju prikladnom za predviđenu svrhu. Jedno takovo »indukciono« kvocijentno mjerilo u spoju za mjerenje frekvencije opisano je u B-49., no nema zapreke ni da se upotrebe u spojevima za mjerenje frekvencije i kvocijentna mjera ostalih mjernih sistema koja reagiraju na izmjenične struje, u prvom redu ona elektrodinamskoga tipa s unakrsnim svicima (B-46.), te ona s pokretnim (mekim) željezom, a mogu se upotrebiti i indukcioni dinamometri (B-26.).

76. Od indirektnih metoda mnogo se upotrebljava kod ton-skih frekvencija *Robinsonov* most, opisan u E-43. (v. sl. 154. na str. 155.), kod koga se iz ravnotežja mosta, postignutoga istodobnim variranjem dvaju otpora, koji iznosom R moraju uvijek ostati međusobno jednaki, zaključuje na mjerenu frekvenciju.

I spoj *Campbellova* mosta za izmjenične struje s promjenljivim međusobnim induktivitetom M (sa svicima S_1 i S_2) i kapacitetom C , kombiniranim s nulinstrumentom N (na pr. slušalicom) po shemi u sl. 183., prikladan je za mjerenja frekvencije. Kad se udešavanjem iznosa M postigne da nulinstrument pokazuje nulu struje, to je znak da je elektromotorna sila inducirana međusobnom indukcijom u sekundarnom svitku S_2 promjenljivoga međusobnog induktiviteta baš u ravnotežju (dakle da je jednaka po veličini, a protivna po fazi) s naponom kondenzatora kapaciteta C kojim teče struja I kruga 1— S_1 — C —2. Međutim po zakonima indukcije napon induciran u S_2 jest ωMI , a napon kondenzatora jest $I/\omega C$, tako da izlazi jednadžba:

$$\omega MI = I/\omega C$$

iz koje se, nakon skraćivanja sa I , dobiva relacija $\omega^2 = 1/CM$. Iz podataka mosta u ravnotežju kod ispitivane izmjenične struje može se dakle lako izračunati ω (a iz ω i $f = \omega/2\pi$).

Primjer: Neka je $C = 5 \mu F = 5 \cdot 10^{-6}$ F. Ravnotežje pak mosta neka je postignuto kod udešenja $M = 8 \text{ mH} = 8 \cdot 10^{-3}$ H. Za ω^2 izlazi

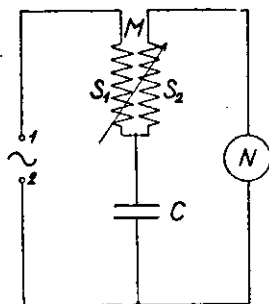
vrijednost 25000000, pa je prema tomu $\omega = 5000$, čemu odgovara $f = 5000/2\pi = 796$ Hz.

Uz poznato f Campbellov most može služiti i za mjerenja (velikih) kapaciteta.

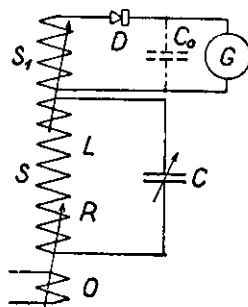
Zanimljive i relativno nove su naprave za mjerenja frekvencije s pomoću nabijanja kondenzatora kroz elektronske cijevi kod kojih se, protivno nego kod opisanih nul-metoda, mjerene frekvencije direktno očitavaju na priključenom, odnosno ugrađenom u aparaturu, instrumentu za istosmjernu struju. Aparature¹⁾ se mogu graditi za područja mjerenja od posve malo Hz pa sve do mnogo (na pr. 60, 100 ili slično) kHz.

77. Kod visokih frekvencija često se umjesto o mjerenju frekvencije govori o mjerenju duljine λ pripadnoga radio vala. Po formuli $\lambda = c/f$ iz E-47. strujama najnižih frekvencija visokofrekventnoga područja, strujama od recimo 15000 Hz ili 15 kHz (kiloherca), odgovara duljina vala 20000 m, dok najviše frekvencije ovoga područja, one koje odgovaraju najkraćim valovima radiotehnike što se praktički primjenjuju ili se s njima eksperimentira, dosežu iznose od vrlo mnogo MHz (megaherca). Tako recimo valovima duljine 3 m, 0,3 m (3 dm) i 0,03 m (3 cm) odgovaraju frekvencije 100, odn. 1000 i 10000 MHz.

Područje visokih frekvencija je prema tomu vanredno opsežno. Ipak je najobičniji princip mjerenja f (odnosno λ) u cijelom ovom ogromnom području isti. To je princip resonancije



Sl. 183.



Sl. 184.

u titrajnim krugovima kao u sl. 158. i 159. (str. 159.). Ti su krugovi obično uzimlju s fiksnim induktivitetom L i varijabilnim kapacitetom C . Iznos C dotle se varira, dok instrument za konstatiranje resonancije ne pokaže maksimum otklona kod kruga uzbuđenoga strujom (na pr. iz izvora O na sl. 158.) kojoj se želi

¹⁾ Vidi na pr. AEG-Mitteil. 1937, str. 378 do 381, te 1938, str. 272 do 275; nadalje ATM 85, V 3612—8.

odrediti f , odnosno λ . Veličine λ , odnosno f , slijede onda po formuli (II) iz E-47. i iz relacije $f = c/\lambda$.

78. Za načine konstatiranja resonancije kod ovih mjerenja vrijedi ono što je rečeno u E-47. i E-53. kod opisivanja primjena iste metode na mjerenja kapaciteta i induktiviteta.

No može se, po shemi u sl. 184., za pokazivanje resonancije upotrebiti i t. zv. *aperiodski* (neudešavani) titrajni krug, sastavljen od svitka S_1 spojena u seriju s prikladnim visokofrekventnim ispravljačem D i galvanometrom G. Na izvor O struje, kojoj treba odrediti frekvenciju f , svitkom S induktivno je vezan »mjerni« titrajni krug sa L i C , koji se variranjem iznosa C dovede u resonanciju. Da je ova postignuta, razabire se po maksimumu odklona galvanometra G, koji reagira na struju induciranu u aperiodskom »indikatorskom« krugu (posredstvom induktivne veze između S i S_1) i ispravljen ispravljačem D. Kao D može se uzeti kristalni detektor ili suhi ispravljač u izvedbi za visoke frekvencije. Iz obzira na visokofrekventne pulzacije ispravljene struje katkad se G premosti kondenzatorom fiksnoga kapaciteta C_0 .

Prednost je postupka mjerenja f ili λ radio valova po sl. 184. u tomu, što »mjerni« krug osim svitka i kondenzatora ne sadržaje nikakvih dodanih vanjskih elemenata, pa je moguće stalno i točno izbaždariti krug po frekvencijama, odnosno duljinama vala. Po potrebi se, zbog postizavanja više radnih područja, za S uzme svitak s odvojcima.

Također bez dodanih vanjskih elemenata ostaje mjerni titrajni krug i kod *apsorpcionih* valomjera, gdje se za konstatiranje resonancije iskorisćuje činjenica da mjerni krug kod postignutoga udešenja na resonanciju troši toliko učina na račun izvora O da to u ovomu, ako je samo dovoljno slab, dolazi do izražaja u obliku poremećenja, po kojima se prepoznaje postignuta resonancija. Na pr. ako je O mali cijevni visokofrekventni oscilator s miliampermetrom u krugu anodne struje, odklon toga instrumenta naglo će se promijeniti kad se, uz povoljan stepen vezanja između oscilatora i mjernoga kruga, kod određenoga kapaciteta mjernoga kruga baš postigne resonancija.

Utvrđiti da neka ispitivana struja ima frekvenciju posve određenoga iznosa daje se vrlo točno i s pomoću resonantnih titraja kremenih pločica ili štapića (Quarzresonatoren, quartz resonators), tako rezanih iz kristala kremenja da svakomu komadu odgovara određena »vlastita« titrajna frekvencija. Takov kremenit resonator izrazito reagira u izmjeničnom električkom polju, ako se frekvencija toga polja podudara s vlastitom titrajnom frekvencijom kremenoga oscilatora.

Kod jednoga oblika izvedbe nalazi se na pr. kremeni štapić u vrlo razrijeđenom plinu neonu u međuprostoru između dvije elektrode, koje su spojene na krajeve nekoga svitka S. Ako se taj S induktivno veže na oscilator, svjetluca razrijeđeni neon u okolici kremenoga štapića, ako je frekvencija (dovoljno snažnoga) oscilatora baš udešena na iznos vlastite frekvencije resonatora s kremenom u razrijeđenom neonu.

Kod najviših radio frekvencija (najkraćih radio valova) mogu se λ i f mjeriti i s pomoću stojnih valova uzduž vodiča (Lecherove žice i slično; vidi na pr. ATM V 3614—2); ako se tom metodom odredi, kod iste frekvencije f , uz duljinu vala λ u uzduhu još i duljina vala λ_1 u nekom drugom dielektrikumu, dobiva se po formuli $\epsilon' = (\lambda/\lambda_1)^2$ odmah i dielektrička konstanta toga dielektrikuma relativno prema uzduhu (praktički dakle i vakuumu); na ovu metodu već je u E-65. upozoreno.

Osobitost je mjerenja s pomoću stojnih valova da ona zapravo daju direktno duljine vala, dok se prije opisanima metodama (i drugima) mjeri zapravo frekvencija f . Na skalama valomjera po tim metodama nanoseni su doduše obično odmah iznosi λ , no to su preračunane vrijednosti po formuli $\lambda = c/f$.

79. Vrlo važna naročito u području jake struje jesu *mjerenja pomaka faza* φ između struje i napona, odnosno faktora učina $k = \cos\varphi$, jer $\cos\varphi$ dolazi u izrazu za učin $N = EI\cos\varphi$. I za ta mjerenja ima u jednu ruku instrumenata s direktnim očitavanjem, s označenima na skali bilo iznosima φ (»mjerila pomaka faza« ili »fazna mjerila«), bilo iznosima $\cos\varphi$ (»mjerila faktora učina« ili » $\cos\varphi$ -mjerila«), bilo jednim i drugima; a u drugu ruku sprava i metoda koje traženi iznos daju tek posredno.

Od faznih mjerila, odnosno $\cos\varphi$ -mjerila, već je detaljno opisan elektrodinamski tip s unakrsnim svcima u spojevima po sl. 39. i 40. (str. 47.) za priključak na jednofaznu i trofaznu mrežu.

Međutim mogu se mjerne sprave za pokazivanje iznosa φ , odnosno $\cos\varphi$, i drukčije konstruirati. Kod tipa po Lipmanu (izvedba: N. Bros. & Th.) s pomičnim željezom nema uopće pomičnih svitaka, te prema tomu ni komplikacija s dovodima do ovakvih svitaka. U izvedbi za priključak na trofaznu mrežu¹⁾ pomični sistem instrumenta čini kombinacija od tri elementa od mekoga željeza, koji su smješteni jedan iznad drugoga u dovoljnim razmacima na zajedničku slobodno vrtivu osovinu. Elementi su orijentirani međusobno zakrenuto u tri ravnine položene kroz os vrtnje sistema s razmacima od 120° , i sva tri se nalaze u magnetskom polju fiksnoga strujnog svitka koji se priključuje u seriju u strujni tok jednoga od triju vodiča tro-

¹⁾ Više u opisima proizvađača; vidi i Golding, Electrical measurements, II. izd., London (1935), str. 780/781

faznoga voda. Svaki od tri željezna elementa podvrgnut je međutim još posebnom djelovanju od po jednoga naponskoga svitka, također fiksnog, tako da instrument ima tri naponska svitka koji se priključuju u zvjezdani spoj na trofazni vod. Kombinacijom učinaka magnetskih polja strujnoga svitka i naponskih svitaka na elemente od mekoga željeza nastaju sile koje pomični sistem instrumenta postavljaju u neki položaj ravnotežja određen pomakom faza između struje i napona, odnosno faktorom učina (simetrično opterećenoga) trofaznog sistema.

Ovi instrumenti mogu se naročitim spojem udesiti i za priključak na jednofaznu mrežu. A ima i izvedbi određenih za nesimetrično opterećene trofazne mreže.

80. Indirektno se φ i $\cos\varphi$ mogu dobiti time da se izmjere učin N , napon E i struja I (vatmetrom, voltmetrom i ampermetrom; po potrebi uzimajući u obzir korekcije zbog vlastitoga potroška instrumenta). Vrijednost $\cos\varphi$ slijedi onda iz formule $N = EI\cos\varphi$ kod jednofaznih sistema, odnosno iz formule $N = \sqrt{3} \cdot EI\cos\varphi$ kod simetrično opterećenih trofaznih sistema (ako E i I znače *linijsku* struju, odnosno napon, a N je ukupni učin triju faza). Iznos φ nade se iz $\cos\varphi$ s pomoću tabela trigonometrijskih funkcija.

Kod simetrično opterećenih trofaznih sistema moguće je dobiti $\operatorname{tg}\varphi$ mjerenjem učina »metodom dvaju vatmetara«, o kojoj će biti kasnije (u E-94.) govora. Ako su N_1 i N_2 iznosi očitani na prvom i drugom vatmetru, tako da je ukupni učin jednak algebarskom zbroju $N = N_1 + N_2$, vrijedi relacija:

$$\operatorname{tg}\varphi = \sqrt{3} \cdot (N_1 - N_2) / (N_1 + N_2) \quad (I)$$

a iz proračunanoga iznosa $\operatorname{tg}\varphi$ lako se dobivaju vrijednosti $\cos\varphi$ i φ iz tablica trigonometrijskih funkcija.

Kako se vidi iz sastava relacije (I), iznos $\operatorname{tg}\varphi$, a po njemu i iznosi $\cos\varphi$ i φ , određeni su zapravo kvocijentom N_1/N_2 vrijednosti pokazanih od oba vatmetra. Moguće je dakle načiniti tabelu koja veže vrijednosti $\cos\varphi$ s iznosima N_1/N_2 , odnosno nacrtati krivulju iz koje se, kod danoga kvocijenta očitavanja obih vatmetara, $\cos\varphi$ može brzo odrediti.

81. Više laboratorijska jesu mjerenja frekvencije izmjeničnih struja i pomaka faza uz pomoć oscilografa. Da se na pr. odredi *frekvencija*, dosta je da se istodobno s oscilografskim registriranjem na poznati način (C-II.) krivulje istraživane izmjenične struje na registracionom papiru ili filmu fotografski registriraju i »vremenske markice« od periodski izvađanih za poznati vremenski interval razmaknutih kratkih bljeskova svjetlosti (kakovi se dadu proizvesti na više načina, na pr. mehaničkim napravama ili električki upravljanim periodskim elek-

tričkim izbijanjima kroz cjevčice s razrijeđenim plinovima). Ako se sad na registraciji ustanovi da na razmak na pr. između dvije susjedne vremenske markice, kojima neka odgovara vremenski interval od 0,2 sekunde, otpada recimo 14,8 perioda istraživane struje, frekvencija te struje jest očito $f = 14,8/0,2 = 74$ Hz.

Kod aparatura koje dopuštaju više istodobnih oscilografskih registracija može se vrijeme markirati i tako da se uz krivulju struje ili napona mjerene frekvencije istodobno registrira i krivulja struje točno poznate frekvencije, na pr. struje iz zujala upravljanoga glazbenom viljuškom poznate visine tona. Ako na oscilogramu na određenu duljinu registracije, na pr. onu kojoj odgovara 100 titraja struje poznate frekvencije 800 Hz, otpada recimo 28,3 titraja istraživane veličine, za traženu frekvenciju vrijedi očito relacija:

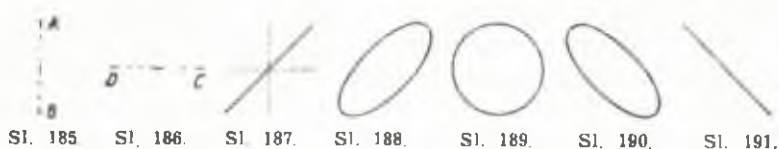
$$f = 800 \times 28,3/100 = 226,4 \text{ Hz}$$

Slično se daje odrediti i *pomak faza* između struje i napona, odnosno općenitije između ma koje dvije (sinusoidne) izmjenične veličine iste frekvencije, simultanom registracijom krivulja obih veličina. Tako je za pomak faza između struje i napona nekoga potrošača dovoljno istodobno registrirati obje pripadne krivulje s pomoću dvije oscilografske petlje, od kojih je prva priključena na istraživani krug struje na način shuntiranoga ampermetra, tako da bilježi krivulju struje, a drugu na način voltmetra sa serijskim otporom, tako da bilježi krivulju napona. Ako se pripazi da točke obih krivulja za isti moment t padaju na registraciji točno u isti pravac okomito na smjer registriranja, iz dobivenoga oscilograma dat će se traženi pomak faza izmjeriti, slično kako je to moguće učiniti na pr. na sl. 127. za pomak faza (natrag ili naprijed) struja danih krivuljama i i i' prema naponu danom krivuljom e .

82. Za mjerenja frekvencija i pomaka faza oscilografskim i sličnim pogonski manje običnim metodama dadu se naravno zamisliti i različite druge varijante. Spomenimo ovdje samo još metodu Lissajous-ovih slika na zastoru katodne cijevi, kojih je princip opisan već u E-63. Dosljedno onomu što je rečeno na citiranom mjestu istraživani napon (odnosno pad napona na radnom otporu protjecanom istraživanom strujom, ako se istražuje struja) primijenit će se na jedan par otklonskih pločica katodne cijevi, a napon poznate frekvencije na drugi par. Međutim kod *različitih* frekvencija obih primijenjenih napona nastala slika ne će biti kosi pravac ili elipsa, kao što je to bilo u E-63., gdje su se sastavljali međusobno okomiti titraji *jednaki* frekvencija, nego će se na zastoru vidjeti više ili manje komplicirana krivulja, i k tomu još promjenljiva oblika ako omjer između mjerene i poznate frekvencije nije takov da se može

izraziti kvocijentom cijelih brojeva, dakle na pr. sa 3 : 1, 1 : 2, 9 : 4 ili slično. Tek za slučaj frekvencija kojih se omjer može svesti na omjer cijelih brojeva (to može biti i omjer 1 : 1) vidi se na zastoru nepomična figura posve određenoga oblika, karakterističnoga za omjer frekvencija i fazni odnos obih primijenjenih izmjeničnih veličina (suponirat ćemo da su primijenjeni naponi sinusoidni i da su maksimalni iznosi pripadnih međusobnih otklona mrlje na zastoru jednaki). U takvim se dakle slučajevima promatranjem Lissajousovih slika na zastoru katodne cijevi može zaključiti na odnose među frekvencijama i na fazne prilike nepoznate veličine prema poznatoj.

Praktički se ova metoda daje zgodno primijeniti na određivanje pomaka faza φ između (sinusoidnoga) napona i (sinusoidne) struje, proizvedene tim naponom, osobito kod viših frekvencija. Istraživani napon primijeni se na jedan par otklonskih pločica, a na drugi par otklonskih pločica pusti se da djeluje pad napona proizveden na prikladnom radnom otporu, prolazom istraživane struje. Kako je ovdje omjer frekvencija nužno jednak 1 : 1, nastaje sastavljanjem obih međusobno okomitih (općenito »raznofaznih«) titraja AB i CD iz sl. 185. i 186. (koje bi svijetla mrlja opisivala



pod utjecajem primijenjenih napona svaki za sebe) Lissajousova slika općenito u obliku elipse. Po sl. 187. do 191. ova se elipsa, uz jednake amplitude AB/2 i CD/2 obih titraja iz sl. 185. i 186., kod »istofaznosti« struje s naponom suzuje u granični oblik pravca u sl. 187. u smjeru raspolovnice kuta titraja AB i CD, dok kod vrijednosti pomaka faza φ iznad 0° pa sve do 90° nastaje sve šira i šira elipsa (slici 188. odgovara $\varphi = 45^\circ$), koja za $\varphi = 90^\circ$ prelazi u krug (sl. 189.), a za još veće iznose φ , sve do »suprotnosti« faza, varira dalje kako je naznačeno u slikama 190. ($\varphi = 135^\circ$) i 191. ($\varphi = 180^\circ$). Prema tomu je traženi pomak faza određen Lissajousovom slikom koja se pojavi na zastoru i može se iz nje i numerički odrediti.

Na tom principu međusobne ovisnosti pomaka faza i Lissajousove slike bazirala je uostalom i metoda iz E-63., s tom jedinom razlikom da je tamo trebalo odrediti fazni odnos između dva napona, kojih je veća ili manja razlika faza bila uvjetovana većim ili manjim gubicima istraživanoga kondenzatora.

83. Neka još ukratko u ovom poglavlju o isporédivanju frekvencija i određivanju razlike faza budu taknute i *naprave za sinhronizaciju* koje se upotrebljavaju kod paralelnoga spa-

janja sinhronih strojeva. Kako je poznato, za priključivanje bez smetnja sinhronih strojeva izmjenične struje, višefaznih i jednofaznih, na mrežu držanu drugim strojem ili strojevima na određenom naponu i određenoj frekvenciji nije samo potrebno a) da napon stroja odgovara naponu mreže po efektivnom iznosu, nego mora da postoje još b) jednakost frekvencija i c) suglasnost faza. Uz to dakako kod višefaznih strojeva priključak na mrežu treba da bude izveden tako da »slijed faza« stroja odgovara onomu mreže, t. j. treba da se na pr. tri spoja od stezaljki trofazne mašine ispravnim redom priključe na vodiče R, S, T trofaznoga voda (dakle da ne dodje do priključka s »obrnutim« slijedom faza, u kome slučaju bi bilo dovoljno, da se dobije ispravnii slijed faza, dva od tri predviđena spoja međusobno izmijeniti).

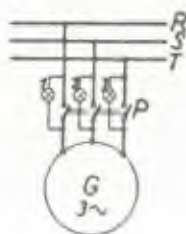
U najgrubljem obliku dade se udesiti željena »sinhronizacija« stroja s mrežom upotrebom starih metoda sa sijalicama, dobro poznatih iz osnova elektrotehnike. Kao primjer navedimo metodu »tamnoga spoja« u slučaju priključivanja trofaznoga sinhronog stroja. Po shemi u sl. 192. tri sijalice 1, 2, 3, ne će biti pod naponom, i prema tomu ne će ni svijetliti, kad napon stroja G svojim iznosom drži ravnotežje naponu mreže.

Da to pak t r a j n o bude, dovoljno je da oba napona budu iste veličine i frekvencije i da budu u ispravnom (za priključak) faznom odnosu. Ako frekvencije samo približno odgovaraju, nastaju »treptaji« (v. sl. 144. na str. 145.) između napona mreže i napona stroja, tako da se, kod treptaja u dovoljno sporom ritmu, dakle kad se frekvencija stroja već dovoljno približi frekvenciji mreže, sijalica vidi čas svijetla, čas tamna u ritmu tih treptaja, i vremenski razmaci između svijetlih i tamnih stanja postaju sve veći, čim se frekvencija stroja više približava frekvenciji mreže. Kad se tako postigne da treptaji slijede vrlo sporo, onda se u momentu kad se sve tri sijalice nalaze oko sredine tamnoga perioda trolna sklopka P može zatvoriti, čime se G priključi na mrežu R, S, T.

Ako se stroj priključi s krivim slijedom faza, ne će uspjeti postići da sve tri sijalice u sl. 192. istodobno ne svijetle. Sijalice 1, 2 i 3 moraju očito biti dimenzionirane da podnose dvostruki linijski napon; odnosno ne priključe se direktno, nego preko naponskih »mjernih transformatora«, dimenzioniranih primarno za dvostruki linijski napon, a sekundarno za napon koji odgovara upotrebljenim sijalicama.

84. Međutim sijalice ne mogu u »tamnim« spojevima, jednofaznom i višefaznim, svojim nesvijetljenjem nikako precizno poslužiti kao indikatori nule napona. A nisu također dovoljno točni ni nešto drukčiji t. zv. »svijetli« spojevi gdje maksimum svijetla, kod polaganoga izmjenjivanja svijetla i tame sijalice,

služi kao znak praktički postignute sinhronizacije. Zato se, s obzirom na veliku praktičku važnost priključivanja u momentu što točnije postignute sinhronizacije, već davno javila tendencija da se kao pomagala kod sinhronizacije upotrebe mjerni instrumenti, odnosno i posebne naprave za ovakve svrhe: *sinhronoskopi*; u koliko se uz sinhronoskope upotrebe i sijalice, one se uzimlju samo zbog grube kontrole, dok se samo udešavanje sinhronizacije vrši po podacima na pr. triju mjerila, ili dvaju mjerila kombiniranih sa sinhronoskopom.



Sl. 192.



Sl. 193.

Tako će moderna naprava za sinhronizaciju na pr. sadržavati: a) »dvostruki« voltmetar (instrument s dva nezavisna mjerna sistema za napon, s kazalima koja pokazuju napone na istoj skali ili na dvije susjedne paralelne profilne skale); b) »dvostruko« mjerilo frekvencije poput onoga na sl. 47. (str. 51.); te c) »voltmetar za napone oko nule« ili »voltmetar za sumu napona« ili »sinhronoskop«; v. sl. 193. s dvostrukim voltmetrom lijevo (1 i 2 su mu kazala) i sinhronoskopom desno.

Grubo udešavanje istoga iznosa napona i iste frekvencije postizava se usporedbom podataka instrumenata pod a) i b), a konačno se konstatira sinhronizacija, odnosno moment kad je praktički postignuta, uz suglasnost iznosa i frekvencija, i suglasnost faza, napravom pod c). Pri tomu voltmetar nule napona odgovara tamno spojenoj sijalici, a onaj drugi sijalici u svijetlom spoju. A sinhronoskopi omogućuju da se prati postupak sinhronizacije različitim manifestacijama, već prema različitim više ili manje duhovitim principima po kojima su konstruirani

Ne možemo na ovom mjestu ulaziti u pojedine principe funkcioniranja sinhronoskopa. Spomenimo samo kao primjer sinhronoskope po motornom principu¹⁾ s kazalom koje neprekidno rotira u jednom ili drugom smjeru, već prema tomu da li je fre-

¹⁾ Više o ovim sinhronoskopima, te uopće o sinhronizacionim napravama i spojevima, vidi na pr. u Skirli, Elektr. Messungen, II. izd. (1936), str. 330 do 383; zatim u ATM J 78—1 do J 78—3; itd.

kvencija stroja prema frekvenciji mreže preniska ili previsoka, odnosno da li je preniska ili previsoka brzina stroja n okretaja na minutu (vezana s frekvencijom f Hz relacijom $n = 60f/p$, gdje je p broj pari polova stroja). Čim se brzina (a s njom i frekvencija) mašine naregulira bliže ispravnoj, tim sporije rotira kazalo sinhronoskopa; konačno kod skoro savršeno dostignute ispravne frekvencije kazalo skoro stane. Ako se sad još čeka na ovakovo praktički mirno kazalo dođe u određeni položaj naznačen markacijom na skali sinhronoskopa, to je znak da je i faza ispravna, pa se sklopka za priključivanje stroja smije zatvoriti.

Princip funkcioniranja ovoga motornog sinhronoskopa (sl. 193. desno; konstrukcija S&H) jest međusobno djelovanje između »zakretnoga« magnetskog polja proizvedenoga s pomoću trofazno namotanoga rotora priključenoga trofazno na mrežu i jednofaznoga magnetskoga polja od statora hranjenoga priključkom na stroj. Markacija označena je u sl. 193. sa 3, a kazalo koje rotira sa 4. I kod jednofazne izvedbe istoga sinhronoskopa rotor je namotan trofazno, ali je kombiniran u »umjetni spoj« s radnim i praznim otporima da i kod jednofaznoga priključka daje »zakretno« polje.

IX. DIREKTNA MJERENJA STRUJE, NAPONA I UČINA

85. Za mjerenja izmjeničnih struja i napona vrijede isti principi spajanja ampermetara A i voltmetara V, po shemama u sl. 104. i 105. na str. 105., kao i za mjerenja istosmjernih struja i napona. Treba samo pripaziti da upotrebljeni instrumenti budu po svome mjernom principu prikladni za mjerenja izmjeničnih struja i napona dane frekvencije, o čemu je u B-II. kod opisivanja pojedinih mjernih sistema bilo potanko govoreno.

Kao i kod istosmjernih krugova struje priključivanje ampermetra u istraživani krug struje, odnosno voltmetra konačnoga otpora paralelno istraživanom dijelu kruga struje, uvijek ponešto poremeti prvobitne prilike kruga, no ti učinci postaju više manje zanemarivi ako ampermetar ima prema izmjeničnoj struji što neznatniji »prividni otpor«, a voltmetar što veći, baš kao što u analognim prilikama kod istosmjerne struje treba željeti da otpor prema istosmjernoj struji bude kod ampermetra neznatan, a kod voltmetra vrlo velik.

Razumije se da kod promatranih mjerenja i načini postizavanja više mjernih opsega, u koliko se ovi predvide kod pojedinih instrumenata, moraju odgovarati potrebama i prilikama izmjeničnih struja (D-IV.; D-V.). Međutim baš u slučaju izmjeničnih struja pitanje snabdijevanja instrumenata s više mjernih opsega gubi od svoje oštine time što se različiti mjerni opsezi, a uz to i druge prednosti, mogu postići instrumentima s jednim jedinim mjernim opsegom, ali priključivanima ne »direktno« na

način ampermetra A iz sl. 104., odnosno voltmetra V iz sl. 105., nego »indirektno« na sekundarni namotaj (već u D-40. i D-44. spomenutih) »mjernih transformatora« s prikladnim omjerom prenošenja, kojima se primarni namotaji priključuju bilo umjesto A u sl. 104., bilo umjesto V u sl. 105., već prema tomu da li se radi o »strujnim« mjernim transformatorima, na koje se sekundarno priključuju ampermetri (i druge naprave, na pr. strujni svici vatmetara, koje se slično priključuju), ili o »naponskim«, na koje se sekundarno priključuju voltmetri (i naprave koje se slično priključuju, na pr. naponske grane vatmetara).

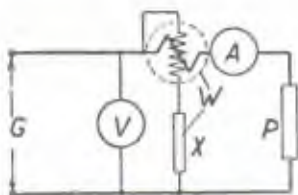
86. Kod mjerenja pravoga (t. zv. radnoga) učina $N = EI \cos \varphi$ jednofaznih sistema (v. B-22. i dalje) za pripadne iz B-II. poznate vatmetarske mjerne sprave, od kojih su neke upotrebljive za istosmjerne i izmjenične učine, a neke samo za izmjenične, vrijede kod »direktnoga« priključivanja također već uzete sheme (v. razmatranja u B-22., te sheme I) i II) na str. 115.), pa čak i korekture po tabeli na str. 116. zbog vlastitoga potroška instrumenata u pojedinim slučajevima mogu se nepromijenjeno upotrebiti i ovdje kod izmjeničnih struja.

Ako se kod priključivanja vatmetara upotrebe mjerni transformatori, može se to izvršiti upotrebom samo jednoga mjernog transformatora, bilo strujnoga (na koji bi se priključio strujni svitak vatmetra), bilo naponskoga (na koji bi se priključila naponska grana, t. j. kombinacija: naponski svitak + dodani otpor X iz B-22.). U oba slučaja vatmetar bi bio priključen samo dijelom posredstvom mjernoga transformatora, a preostali element vatmetra priključio bi se neposredno na mrežu. A može se spajanje i tako izvesti da oba priključka vatmetra budu provedena indirektno, preko prikladnih mjernih transformatora: strujnog i naponskog.

Kod mjerenja učina izmjeničnih struja može dakle biti: a) »direktnih« spojeva, s vatmetrom direktno priključenim na pr. kao u sl. 119. ili 120.; b) »poluindirektnih« spojeva, s jednim priključkom vatmetra, strujnim ili naponskim, direktnim, a s preostalim, naponskim ili strujnim, indirektnim preko pripadnoga mjernoga transformatora; te konačno c) »indirektnih« spojeva, s priključkom posredstvom dvaju mjernih transformatora. Uzevši u obzir i mjerenja t. zv. »praznoga učina«, te različite spojeve za mjerenja na višefaznim sistemima, to vodi naravno na veliku raznolikost mjernih spojeva. U ovomu odsjeku razmatrat ćemo, da stvari prerano ne kompliciramo, samo direktna mjerenja, i to najprije na jednofaznim sistemima, a zatim na trofaznim, ostavljajući za posebni odsjek probleme i spojeve u vezi s mjernim transformatorima.

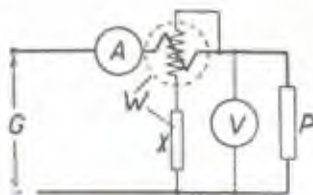
87. Kod kompletnih mjerenja na jednofaznim izmjeničnim sistemima redovno se istodobno mjere napon E , struja I i radni

učin N . Pripadni instrumenti, voltmetar V , ampermetar A i vatmetar W (supsumirajući pod W i dodani otpor X naponske grane vatmetra), mogu se priključiti po shemama I') i II') u sl. 194. i 195., koje se prirodno nāđaju posveopćenjem shemā I) i II) iz str. 115.



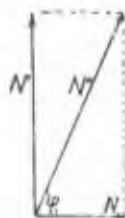
Shema I')

Sl. 194.



Shema II')

Sl. 195.



Sl. 196.

Kod izmjeničnih struja potrebno je pored E i I mjeriti još posebno i N , jer tu, općenito, ne vrijedi relacija $N = EI$ kao kod istosmjernih struja, nego izraz za *pravi* ili *radni* učin $N = EI \cos \varphi$ sadrži kao faktor i kosinus pomaka faza φ između struje i napona. K tomu se izmjerivši E , I i N dobivaju odmah i podaci za proračunavanje *faktora učina* $k = \cos \varphi = N/EI$, zatim izraza $EI \sin \varphi$, veličine nazvane *prazni* učin N' , koja je od znatnoga interesa u električkim pogonima, te konačno u pogonima također važne veličine EI , nazvane *prividnim* učinkom N'' .

Na pojam praznoga učina dolazi se ako se struja pomaknuta u fazi za kut φ prema naponu (v. sl. 128.) zamisli rastavljena u dvije komponente, naime u »radnu« struju u fazi s naponom i u »praznu« struju pomaknuta u fazi za pravi kut. Prva je jednaka projekciji $I \cos \varphi$ vektora struje duljine I u smjeru vektora napona, a druga projekciji $I \sin \varphi$ okomito na taj smjer. Kako produkt $N = EI \cos \varphi$ predstavlja pravi ili radni učin, to se po analogiji $N' = EI \sin \varphi$ zove praznim učinkom.

Između N , N' i prividnoga učina $N'' = EI$ postoji odnos koji se može predočiti slikom 196., tako da vrijedi relacija:

$$N^2 + N'^2 = N''^2 \quad (I)$$

a uz poznato N i φ može se N' računati i po formuli $N' = N \cdot \operatorname{tg} \varphi$.

Dok se N redovno izražava u W (vatima), prividni se učin N'' kao produkt volta i ampera obično izražava u VA (voltamperima). Uz prazni učin N' mnogo su služili nazivi »prazni« vati (njem. Blindwatt, bW), no u novije vrijeme (u skladu sa zaključkom već u B-56. spomenute IEC iz 1930. upotrebljava se naziv i oznaka VAR (ili var; voltamperi reaktivni); v. i našu »Uredbu o elektr. jedinicama koje se upotrebljavaju u javnom saobraćaju« u Služb. Nov. br. 191/1935. Uostalom »dimenzije« veličina N , N' i N'' su iste, jer su $\cos \varphi$ i $\sin \varphi$ veličine »bez dimenzija«, pa bi se zapravo N'

i N'' mogli izražavati istom jedinicom¹⁾ kao N , dakle u W'). No nema zapreke da se N'' i N' naznačuju u VA, odn. VAR.

Kratice kVA, MVA, mW, kVAR i slične bit će razumljive po tabeli III iz A-7. same po sebi.

88. Ako se utjecaji zbog vlastitoga potroška instrumenata kod mjerenja učina N po shemama I') i II') ne mogu zanemariti, uzet će se korekcije, koje su analogne onima uz sheme I) i II) na str. 115., te različite već prema spoju i prema tomu da li se određuje učin »potrošača« ili »generatora«.

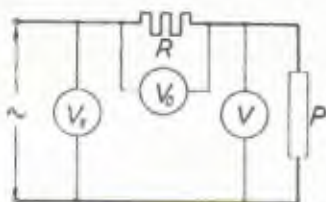
Uzevši u obzir da se za otpor ampermetra r_A u sl. 194. i 195. može smatrati kao da povećava otpor strujnoga svitka vatmetra r_W na iznos $r_W + r_A$, dok se otpor voltmetra R_V može uzeti sastavljen s otporom R_W naponske grane vatmetra u neki kombinacioni otpor R po relaciji $1/R = 1/R_W + 1/R_V$, lako se razabire posveopćenjem tabele VII na str. 116. da za korekcije kojima se iz očitano $\dot{g}$ a na vatmetru iznosa N_0 dobiva ispravan iznos N učina generatora ili potrošača vrijedi:

Tabela VIII.

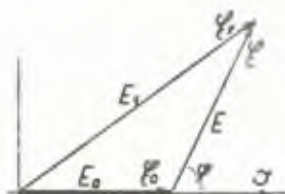
Spoj	Učin generatora	Učin potrošača
I')	$N_0 + E^2/R_W + E^2/R_V$	$N_0 - I^2 r_W - I^2 r_A$
II')	$N_0 + I^2 r_W + I^2 r_A$	$N_0 - E^2/R_W - E^2/R_V$

U praksi će se, ako se uzimlju korekcije po tabeli VIII, nastojati upotrebiti onaj spoj kod koga dolaze korekcije s R_W i R_V , jer su iznosi R_W i R_V redovno naznačeni na instrumentima i stalni, dok r_W i r_A često nisu poznati i variraju s temperaturom.

89. Zanimljivo je da se (pravi) učin izmjenične struje $N = EI \cos \varphi$ dade mjeriti i bez vatmetra, i to bilo s pomoću tri ampermetra, bilo s pomoću tri voltmetra.



Sl. 197.



Sl. 198.

Kod *metode triju voltmetara* voltmetri V , V_0 , V_1 priključe se po sl. 197., a kod *metode triju ampermetara* ampermetri A , A_0 , A_1 ukopčaju se kao u sl. 199. U oba slučaja R znači prikladan čisti radni otpor. Pripadni vektorski prikazi vide se na slikama 198., odn. 200.

¹⁾ Vidi na pr. ETZ 58 (1937), str. 258.

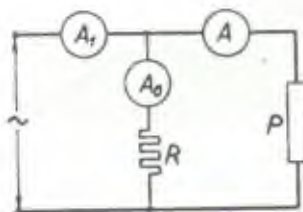
Zanemarivši potroške struje upotrebljenih voltmetara može se po sl. 198. napon $\mathcal{E}_0$, s efektivnim iznosom E_0 pokazanim od voltmetra V_0 , crtati u fazi sa strujom $\mathcal{I}$, efektivnoga iznosa I , kroz potrošač P kojemu učin treba izmjeriti, dok će napon $\mathcal{E}$, efektivnoga iznosa E pokazanoga od voltmetra V , treba crtati s pomakom faza φ prema struji. Ukupni napon $\mathcal{E}_1$, s efektivnim iznosom E_1 pokazanim od voltmetra V_1 , dobit će se sumirajući geometrijski (analogno postupku uz sl. 130. na str. 128.) napone $\mathcal{E}_0$ i $\mathcal{E}$, tako da se može pisati (po kosinusovu stavku):

$$E_1^2 = E_0^2 + E^2 + 2 \cdot E_0 \cdot E \cdot \cos \varphi$$

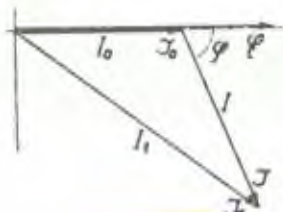
Odatle pak odmah slijedi (zbog $E_0 = IR$):

$$N = EI \cos \varphi = (E_1^2 - E_0^2 - E^2) / 2R$$

Kod metode triju ampermetara slično se, zanemarivši gubitke napona zbog ampermetara, može po sl. 200. uzeti da je



Sl. 199.



Sl. 200.

ukupna struja $\mathcal{I}_1$, efektivnoga iznosa I_1 , mjerenoga sa A_1 , geometrijska suma struje $\mathcal{I}_0$ kroz R , koja je istofazna s primijenjenim naponom $\mathcal{E}$ efektivnoga iznosa E , a njezin efektivni iznos I_0 pokazuje ampermetar A_0 , i struje $\mathcal{I}$ kroz potrošač P , s iznosom I mjerenim ampermetrom A i s pomakom faza φ prema $\mathcal{E}$.

Vrijede dakle relacije: $I_1^2 = I_0^2 + I^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I \cdot \cos \varphi$ i $I_0 = E/R$, na temelju kojih slijedi:

$$N = EI \cos \varphi = (I_1^2 - I_0^2 - I^2) \cdot R / 2$$

90. U mnogim se prilikama umjesto proračunavanja iz izmjerenih vrijednosti E , I i N faktora učina $\cos \varphi$ i faktora praznoga učina $\sin \varphi$, kao i samoga praznoga učina $E I \sin \varphi$, zahtijevaju naprave koje neposredno pokazuju ili registriraju ove veličine.

Sprave za mjerenja faktora (pravoga) učina $\cos \varphi$ već smo opisali (E-79.). No iste sprave u istom spoju mogu služiti i kao mjerila faktora prividnoga učina $\sin \varphi$, jer su otkloni tih sprava i onako funkcije pomaka faza φ , pa je svejedno ako se na njihove skale nanese uz (ili umjesto) vrijednosti φ koje odgovaraju različitim otklonima tih instrumenata, pripadne vrijednosti $\cos \varphi$

(što se čini u slučaju mjerila faktora učina) ili pripadne vrijednosti $\sin\varphi$ (ako instrument treba da neposredno pokazuje iznose faktora praznoga učina).

Međutim mnogo se češće traže sprave koje odmah pokazuju ili registriraju sam prazni učin. Za ovakva mjerila praznoga učina (*Blindleistungsmesser*, reactive-power meters) mogu poslužiti u pravilu isti mjerni sistemi koji služe i za mjerenja pravnoga učina, dakle vatmetrički sistemi, samo oni moraju biti priključeni na naročiti način.

Obični naime vatmetrički sistemi, na pr. elektrodinamski, pokazuju zapravo, ako ispravno rade, kod izmjenične struje produkt napona E primijenjenoga na njihov naponsku granu, struje I (iste frekvencije) puštene kroz njihov strujni svitak, te kosinusa pomaka faza φ između toga napona i te struje, bez obzira na to kakove su i odakle dolaze napon E i struja I , te kako je proizveden fazni pomak φ između njih. Prema tomu je očito da svaki vatmetar može postati upotrebljiv i za mjerenja $EI\sin\varphi$ nekoga potrošača P , ako se samo udesi da kroz strujni svitak teče struja I potrošača, a na naponski svitak da bude primijenjen napon s faznim kutom za 90° ili $\pi/2$ pomaknutim prema faznom kutu napona E potrošača, i prema tomu pomaknutim za kut $90^\circ - \varphi$, odnosno u lučnoj mjeri za $\pi/2 - \varphi$, prema struji. U tom naime slučaju, kod iste efektivne vrijednosti zakrenutoga napona prema naponu potrošača, vatmetar će očito pokazivati $EI\cos(\pi/2 - \varphi) = EI\sin\varphi$, budući da su sinus nekoga kuta i kosinus njegova komplementa međusobno jednaki. Kod razlike između efektivnih iznosa napona potrošača i zakrenutoga napona vatmetar će također mjeriti $EI\sin\varphi$, samo s drugom osjetljivošću.

Kod trofaznih mjerenja učina ovu je činjenicu, kako ćemo još pobliže vidjeti, vrlo lako praktički iskoristiti, jer tamo vektorima faznih napona stoje nasuprot na njih okomiti vektori linijskih napona. No kod jednofaznih sistema ne stoje na raspolaganju za 90° fazno zakrenuti naponi, nego se treba zadovoljiti time da se prikladnim »umjetnim spojem« struja u naponskoj grani vatmetra, a time i njom proizvedeno magnetsko polje, zakrenu u fazi za 90° prema naponu potrošača, što očito također ima za posljedicu da priključeni vatmetrički mjerni sistem daje otklone određene sa $N' = EI\sin\varphi$ (umjesto sa $N = EI\cos\varphi$).

91. Prema tomu su jednofazna mjerila praznoga učina u bitnosti vatmetrički sistemi nadopunjeni prikladnim umjetnim spojem. A kako je redovno, zbog racionalnijega iskorišćivanja aparata, poželjno da se istim instrumentom mogu mjeriti po volji radni i prazni učini, to se u tehničkoj praksi mnogo susreću kombinirana mjerila s preklopkom koja, već prema položaju preklopke, pokazuju bilo $EI\cos\varphi$, bilo $EI\sin\varphi$.

Shematski spoj jednoga takvog mjerila (izvedba: NORMA), s ispuštenim zbog boljšega pregleda nekim nebitnim pojednostima¹⁾, prikazan je u sl. 201. Mjerni sistem je elektrodinamski; S_1 je strujni (nepomični) svitak, a S_2 naponski (pomični). S radnim otporom R_2 u seriji sa S_2 , te sa otporom R_3 paralelno priključenim tako nastaloj kombinaciji, sistem ostaje u bitnosti valmetrički, pa kad se zakretom nadesno preklopke K još priključi radni otpor X (koji ima analognu funkciju kao i otpor X u sl. 15., 119. i 120.) instrument je normalni vatmetar i mjeri, priključen stezaljkama V_1 i V_2 na napon E potrošača P, a stezaljkama A_1 i A_2 u krug struje I potrošača P pomaknute u fazi za kut φ prema E , pravi učin $EI\cos\varphi$. Ako treba mjeriti prazni učin, dovoljno je zakrenuti preklopku K nalijevo ne dirajući u spojeve stezaljki A_1 i A_2 , te V_1 i V_2 . Zakretanjem preklopke ispadne iz spoja X , ali se S_2 , R_2 i R_3 nadopune na način naznačen u sl. 201. u »umjetni spoj« za zakret struje u svitku S_2 za 90° prema naponu primijenjenom između V_1 i V_2 novo pridošlim elementima: induktancijama L_1 i L_2 , te otporom R_1 . Ovaj posljednji daje se tako adjustirati da struja u S_2 doista bude u fazi pomaknuta baš za 90° prema naponu primijenjenom između V_1 i V_2 . Instrument onda mjeri prazni učin $EI\sin\varphi$.

Adjustiranje otpora R_1 ovisno je o frekvenciji, pa mjerena struja mora kod mjerenja $EI\sin\varphi$ biti stalne određene frekvencije, na pr. 50 Hz; kod ponešto promijenjene frekvencije uzme se korekcija, koja je u prvoj aproksimaciji proporcionalna promjeni frekvencije.

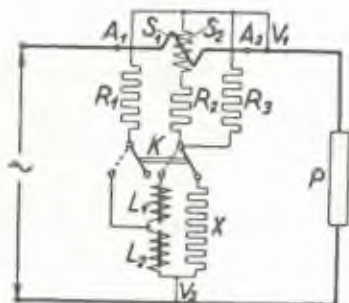
X. MJERENJA UČINA U TROFAZNIM SUSTAVIMA

92. Kod mjerenja na trofaznim sustavima treba razlikovati slučajeve simetričnoga opterećenja (jednakoga opterećenja svih triju faza) od onih nesimetričnoga opterećenja. Uz to su, dakako, mjerni spojevi različiti prema tomu da li se mjeri pravi učin ili prazni.

Ograničimo se najprije na mjerenje *pravoga učina*. Pomislimo sistem od tri jedan prema drugomu za 120° u fazi pomaknuta, a po efektivnom iznosu E' jednaka sinusoidna napona. Takva kombinacija može se prema sl. 202. predočiti trima vektorima $\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$, $\vec{E}_3$ iste duljine, zakrenutim jedan prema drugomu za 120° . Neka to budu na pr. tri napona između krajeva »faznih namotaja« nekoga trofaznoga generatora poput G u sl. 203. u »zvjezdastom spoju«, s počecima faznih namotaja spojenima u »zvjezdište generatora« O, a svršecima priključenima na trofazni vod s tri vodiča R, S, T (zanemariva prividnoga otpora).

¹⁾ Detaljnije: Zwierina, ETZ 1929, br. 51; »Helios« 1930, br. 20.

Ako se sad trofazni vod simetrično ili jednoliko opteretiti, na pr. sa tri u svakom pogledu jednaka prividna otpora Z_1, Z_2, Z_3 , priključena jednim krajem na R, S, odn. T, a s preostala tri kraja zajedno spojena u »zvjezdaste potrošača« O_1 , teći će kroz fazne namotaje generatora tri »fazne struje« I_1, I_2, I_3 istoga efektivnoga iznosa I' , pomaknute u fazi, svaka prema svome »faznom naponu«, za isti kut φ , određen sastavom triju priključenih jednakih prividnih otpora.



Sl. 201.



Sl. 202.

Kako su međusobni odnosi struja i napona kod ovakvoga simetričnoga i simetrično opterećenoga sistema u svakoj od tri faze isti, ukupni učin N što ga generator G vođu R, S, T daje, odnosno što ga potrošač P iz vođa uzima, može se izraziti kao produkt broja faza 3 s učinkom jedne faze $E'I'\cos\varphi$:

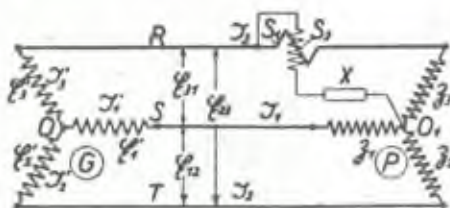
$$N = 3 \cdot E'I'\cos\varphi \quad (I)$$

Međutim redovno se N izražava umjesto (često mjerenju nepristupačnim) iznosima *faznoga napona* E' i *fazne struje* I' radije efektivnim iznosima E i I t. zv. *linijskoga napona* i *linijske struje*, t. j. napona između vodiča R, S, T vođa (linije), odnosno struja kroz te vodiče. U tomu slučaju izraz za N glasi općenito:

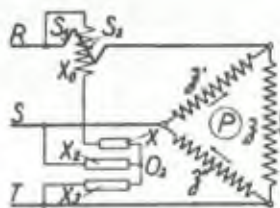
$$N = \sqrt{3} \cdot EI\cos\varphi \quad (II)$$

i to bez obzira na to da li su generator, odnosno potrošač, u »zvjezdastom« spoju ili u »trokutnom«. Tako se na pr. u slučaju sl. 203., dakle kod zvjezdastoga spoja generatora G, linijski naponi $\mathcal{E}_{12}$, $\mathcal{E}_{23}$ i $\mathcal{E}_{31}$ očito moraju shvatiti kao nastali superpozicijom od dva po dva jedan prema drugomu suprotno računana fazna napona. Pripadni vektor na pr. linijskoga napona $\mathcal{E}_{12}$ treba prema tomu shvatiti kao geometrijsku ili vektorsku razliku između $\mathcal{E}'_1$ i $\mathcal{E}'_2$, dakle kao sumu vektora $\mathcal{E}'_1$ i $-\mathcal{E}'_2$ efektivnoga iznosa E' , a ovakvo vektorsko sumiranje vodi na vektor smjera i veličine poput onoga označenoga u sl. 202. sa $\mathcal{E}_{12}$; slično i druga dva linijska napona daju vektore $\mathcal{E}_{23}$ i $\mathcal{E}_{31}$,

tako da nastaje »trokut linijskih napona« ABC. Svaka od triju stranica ovoga istostraničnoga trokuta linijskih napona jednaka je, prema geometrijskim odnosima u sl. 202., $\sqrt{3}$ -kratniku dužine vektora faznih napona, reprezentanta njihova efektivnoga iznosa E' , tako da se za efektivni iznos linijskoga napona može pisati: $E = E' \cdot \sqrt{3}$. S druge strane u slučaju sl. 203. očito je fazna struja ujedno i linijska: $I' = I$; dakle i $I' = I$. Na temelju pak dobivenih relacija odmah se razabire da je (I) ekvivalentno sa (II).



Sl. 203.



Sl. 204.

U slučaju trokutnoga spoja također je lako izvesti prelaz sa (I) na (II). Tako je, prema odnosima između trofaznoga voda i trokutno priključenoga simetričnoga potrošača u sl. 204. kod trokutnog spoja očito linijski napon jednak faznom: $E = E'$, dok svaku od tri linijske struje I_1 , I_2 i I_3 treba shvatiti kao diferenciju od po dvije fazne struje odnosno kao sumu od po dvije protivno računane struje: prve »ulazne« u jedan fazni namotaj, a druge »izlazne« iz prethodnoga namotaja. Time, sličnim razmatranjima kao prije kod linijskih napona uz supoziciju zvjezdastoga spoja, ovdje izlazi: $I = I' \cdot \sqrt{3}$. Primjenom dobivenih odnosa na (I) opet se i uz trokutni spoj dobiva (II) kao formula za ukupni učin kod simetričnoga opterećenja trofaznoga voda.

93. Nakon ovih detaljnijih razmatranja odnosa u simetrično opterećenim trofaznim sistemima lako je vidjeti da se njihov učin N može odrediti jednim jedinim vatmetrom, množeći s 3 njegovo očitavanje, ili snabdijevajući sam instrument za ovakva mjerenja odmah skalom s trostrukim iznosima od stvarno pokazanih brojeva vata što bi ih instrument u jednofaznom spoju stvarno pokazivao.

Samo mjerni spoj kod ove metode jednoga vatmetra mora biti takav da doista strujnim svitkom vatmetra teče (po veličini i fazi) fazna struja, a na naponsku granu vatmetra da bude primijenjen fazni napon sistema, dakle na pr. na sl. 203. napon između onoga od vodiča R, S, T kome je u tok priključen strujni svitak i zvjezdista ili nultoeke sistema. A to, već prema

Kod metode dvaju vatmetara za mjerenja pravoga učina strujni svitak S_1 prvoga vatmetra dolazi, kao u sl. 205., u strujni tok jednoga, a strujni svitak S_2 drugoga vatmetra u strujni krug drugoga od tri vodiča koji sačinjavaju trofazni vod. Naponske grane tih vatmetara priključe se na linijski napon između vodiča upotrebljenoga u strujnom krugu prvoga, odnosno drugoga vatmetra i preostalog trećega vodiča, neupotrebljenoga kod ukapčanja strujnih svitaka.

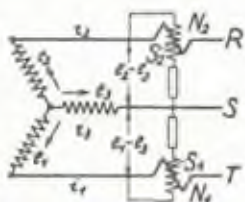
Da se vidi kako dolazi do toga da *algebarski* sumirana očitavanja N_1 i N_2 jednoga i drugoga vatmetra predstavljaju ukupni učin $N = N_1 + N_2$ svih triju faza, razmotrimo odnose između momentanih vrijednosti struja i napona u spoju po sl. 205. Neka je trofazni vod hranjem iz izvora u zvjezdastom spoju i neka u momentu t fazni naponi imaju iznose e_1, e_2, e_3 , a fazne struje iznose i_1, i_2, i_3 . Ukupni momentani učin jest onda:

$$N_{\text{mom}} = e_1 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3$$

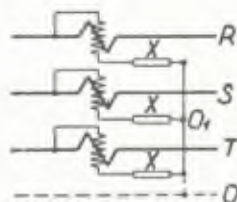
dok na vatmetre djeluju, zbog struja i_1 i i_2 kroz njihove strujne svitke i ispravno primijenjenih linijskih napona $e_1 - e_3$ i $e_2 - e_3$ na njihove naponske grane, momenti vrtnje određeni produktima $i_1(e_1 - e_3)$ i $i_2(e_2 - e_3)$. Međutim na temelju činjenice da po zakonima razgranjivanja električkih struja u svakom momentu vrijedi relacija $i_1 + i_2 + i_3 = 0$, odnosno: $i_3 = -(i_1 + i_2)$, lako je sumu:

$$i_1(e_1 - e_3) + i_2(e_2 - e_3)$$

identificirati s malo prije dobivenim izrazom za N_{mom} .



Sl. 205.



Sl. 206.

Suma momentanih vrijednosti momenata vrtnje obih vatmetara odgovara prema tomu, u zadnjoj liniji, ukupnom momentanom učinku N_{mom} svih triju faza. Zbog tromosti pomičnih sistema vatmetara pokazani otkloni bit će prema prosječnom iznosu pripadnih momenata vrtnje, a suma pokazanih iznosa vata N_1 i N_2 odgovarat će očito prosječnom iznosu od N_{mom} t. j. pravom učinku N svih triju faza, što je baš trebalo dokazati.

Treba pripaziti da kod porasta pomaka faza otkloni jednoga ili drugoga vatmetra mogu postati protivnoga predznaka; onda

tomu da li je ovomu zahtjevu moguće udovoljiti neposredno već raspoloživom nultočkom ili se ova tek mora proizvesti nekim »umjetnim spojem«, vodi na dvije varijante metode jednoga vatmetra: a) s pristupačnom (i upotrebljenom) nultočkom, b) s »umjetnom« nultočkom.

U slučaju a) dovoljno je spojiti vatmetar po sl. 203., priključivši strujni svitak vatmetra S_1 u jedan trofazni vodič, a naponski S_2 (s dodanim otporom X) između toga vodiča i najbliže nultoeke (O ili O_1 ; obje su na istom potencijalu uz supotirane uvjete).

U slučaju b) polazi se od činjenice da svako opterećenje trofazne mreže s tri jednaka radna otpora priključena u zvijezdu daje nultocku simetričnoga i simetrično opterećenoga trofaznog sistema. Ta nultocka je zvjezdaste priključene kombinacije otpora. Dovoljno je dakle, po shemi u sl. 204., naponsku granu vatmetra ukupnoga radnoga otpora X_1 (računajući u X_1 pored dodanoga otpora vatmetra X i radni otpor X_0 naponskoga svitka S_2 kome induktivni otpor neka bude zanemariva iznosa prema X_1) nadopuniti u zvjezdasti spoj dodavajući dva, otporu $X_1 = X + X_0$ jednaka, radna otpora X_2 i X_3 . Zvjezdaste O_2 predstavlja onda »umjetnu nultocku« i spoj vatmetra izlazi na isto kao i u slučaju a).

Obično se uz vatmetre za mjerenja s umjetnom nultockom dobavljaju odmah i otpori za realiziranje umjetne nultoeke, ugrađeni u instrument ili u posebnoj kutiji. Često ovi otpori imaju odvojke, pa se onda njima dade udesiti različiti naponski mjerni opsezi vatmetra. I kod upotrebe vatmetra za mjerenja jednofaznih učina ovi se otpori dade iskoristiti (za realiziranje različitih iznosa dodanoga otpora X).

94. Kod nesimetrično (nejednoliko) opterećenih trofaznih sistema jednostavni spoj s jednim vatmetrom ne vodi k cilju, jer se struje i pomaci faza, a po tomu i učini, razlikuju u pojedinim fazama. U prvi mah bi moglo izgledati da se u tom slučaju ne će moći izići bez triju vatmetara, po jednoga za svaku fazu. Takov spoj s tri vatmetra je dakako uvijek moguć kod svakoga trofaznog sustava. Međutim jednim klasičnim spojem, po Aronu, moguće je ipak ukupni učin triju različito opterećenih faza u mrežama s tri vodiča mjeriti i s pomoću samo dva vatmetra.

Prema tomu se trofazni učin kod nesimetričnoga opterećenja može mjeriti bilo metodom dvaju vatmetara, bilo metodom triju vatmetara, pri čemu je spoj s tri vatmetra upotrebljiv i u slučaju mreža s četiri vodiča, naime, kao u sl. 206., s tri »fazna«: R , S , T , i s jednim neutralnim vodičem ili nulvodičem: O (ovim se posljednjim u slučaju nejednolikoga opterećenja izbjegavaju nejednakosti faznih napona potrošača u trofaznim mrežama).

treba obrnuti priključak pripadne naponske grane. Prema tomu ima slučajeva da jedan ili drugi sumand u algebarskoj sumi $N = N_1 + N_2$ treba uzeti s negativnim predznakom.

Prednost je metode dvaju vatmetara da se kod nje izlazi sa samo dva instrumenta (pa čak i s jednim uz specijalnu preklopku koja omogućuje da se očitaju jedan iza drugoga iznosi N_1 i N_2). A mana joj je što u slučajevima protivnih predznaka iznosa N_1 i N_2 , ako su ovi još i blizu po apsolutnoj vrijednosti, iznos N izlazi s mnogo nesigurnosti i kraj uskih tolerancija u određivanju iznosa N_1 i N_2 . U tim slučajevima pouzdanija je metoda triju vatmetara.

O primjeni metode dvaju vatmetara kod *simetrično* opterećenih trofaznih sistema uz istodobno određivanje $tg\varphi$ već je bilo govora (E-80.).

95. Kod *metode triju vatmetara* za mjerenja *pravoga* učina spoj je vrlo pregledan i razumljiv sam po sebi. Može se na pr. uzeti da je na mrežu u sl. 206. priključeni izvor ili potrošač, kojemu treba izmjeriti ukupni učin, spojen u zvijezdu (ako je spoj trokutni, moguće ga je uvijek u misli »transfigurirati« u ekvivalentni zvjezdasti). No uz spomenutu supoziciju teku strujnim svicima vatmetara u promatranoj shemi fazne struje, a naponske grane priključene su na pripadne fazne napone, tako da vatmetri mjere učine pojedinih faza i ukupni učin dobiva se sumiranjem iznosa vala očitanih na sva tri vatmetra.

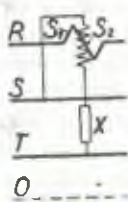
Nepriključena na pripadne naponske svitke tri kraja dodanih otpora X triju vatmetara spoje se na nulvodič (četvrti vodič) O , a k o je taj povučen (u sl. 206. crtkano naznačeno). Kod sistema bez nulvodiča ta tri kraja spojena zajedno čine zvjezdište O , zvjezdastoga spoja sastavljenog od tri vatmetarske naponske grane (suponirane jednake).

96. Od opisanih različitih spojeva za mjerenja *pravoga* učina samo je jedan korak do korespondentnih mjernih spojeva za mjerenja *praznoga* učina u trofaznim sistemima. Po E-90. svaki spoj za mjerenje *pravoga* učina može se pretvoriti u spoj za mjerenje *praznoga* učina, ako se uz netaknut spoj strujnoga svitka vatmetra spoj naponske grane dađe tako promijeniti da na tu granu djeluje za 90° fazno pomaknuti napon. Vektorski govoreći: treba primijeniti napon predložen vektorom okomitim na vektor prvobitno primijenjenoga napona. Međutim u trofaznim sustavima, s relacijama između faznih i linijskih napona po sl. 202., korespondiraju recipročno vektori faznih napona s vektorima linijskih napona u tomu smislu da po jedan fazni i jedan linijski stoje međusobno okomito. Tako su u sl. 202. međusobno okomiti $\mathcal{E}_1$ i $\mathcal{E}_{23}$, zatim $\mathcal{E}_2$ i $\mathcal{E}_{31}$, te konačno $\mathcal{E}_3$ i $\mathcal{E}_{12}$.

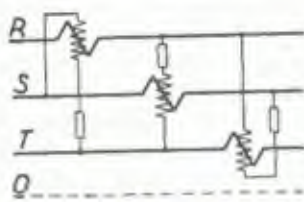
Dosta je dakle, da se dobije mjerni spoj po *metodi jednoga vatmetra* za mjerenja *praznoga* učina u simetrički opterećenim trofaznim sustavima, promijeniti spoj za pravi učin iz sl. 203.

tako da se naponska grana vatmetra $S_2 + X$, umjesto između vodiča R i nultoečke sistema, spoji po shemi u sl. 207. između preostala dva vodiča trofaznoga voda S i T. Instrument onda daje otklon određen mjerenim praznim učinkom.

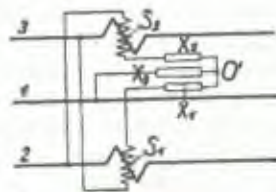
Samo kod toga treba uzeti u obzir da je primijenjeni napon kod spoja po sl. 207. linijski, dakle $\sqrt{3}$ puta toliki kao fazni koji je bio primijenjen u spoju po sl. 203., pa će prema tomu moment vrtnje instrumenta, uz naponsku granu vatmetra $S_2 + X$ istu u oba slučaja, postati $\sqrt{3}$ puta prevelik. Kod prelaza na spoj po sl. 207. uzme se dakle očitavanje instrumenta $\sqrt{3}$ puta umanjeno u račun, ili se mjesto toga otpor X toliko poveća da ukupni radni otpor naponske grane postane $\sqrt{3}$ puta toliki kao prije.



Sl. 207.



Sl. 208.



Sl. 209.

97. Posve istim postupkom dobivaju se iz korespondentnih spojeva za mjerenja pravoga učina mjerni spojevi za prividni učin s dva i tri vatmetra. Tako spoj po sl. 208., koji ilustrira metodu triju vatmetara za mjerenja praznoga učina prirodno nastaje iz spoja po sl. 206. primjenom istoga principa spajanja naponskih grana upotrebljenih vatmetara kao i u sl. 207. I ovdje vrijedi primjedba o povećanim iznosima napona: novi su naponi $\sqrt{3}$ -kratnici onih u sl. 206., iz čega treba izvesti i iste konsekvencije kao kod sl. 207. Kako se vidi, ne treba nul-točke, odnosno nul-vodiča, kod spoja po sl. 208., kao ni kod onoga po sl. 207.

98. Konačno kod metode dvaju vatmetara za mjerenja praznoga učina po shemi u sl. 209. spoj za prazni učin dobiva se također prekapčajući naponske krugove obih vatmetara na u fazi za 90° pomaknute napone.

Samo kako se kod metode dvaju vatmetara upotrebljavaju za mjerenja pravoga učina linijski naponi, kod spoja za prazni učin moraju se upotrebiti korespondentni fazni naponi. A to nosi sa sobom da treba proizvesti umjetnu nul-točku. Na sl. 209. nul-točka je zvjezdište O' dobiveno simetričkim opterećenjem u zvjezdastom spoju, kombiniranim od jednakih naponskih svitaka obih vatmetara s dodanim otporima X_1 i X_2 koje treba suponi-

rati jednake, te od radnoga otpora X_3 tolikoga iznosa koliko odgovara cijeloj jednoj ili drugoj naponskoj vatmetarskoj grani.

Druga je konsekvencija prelaza s linijskih na fazne napone da se, kod nepromijenjenih naponskih grana vatmetara, dobivaju proporcionalno manjem iznosu napona premaleni otkloni, pa očitavanja treba uzeti $\sqrt{3}$ -struko u račun; odnosno efekt se kompenzira smanjivši X_1 i X_2 (a prema tomu i X_3) da nastane zvjezdasti spoj s otporima u svakoj od tri grane smanjenima u omjeru $\sqrt{3} : 1$.

Za brz prelaz od mjerenja pravoga učina na mjerenja praznoga (i obrnuto) s opisanim višefaznim spojevima mogu se upotrebljeni vatmetri kombinirati u prikladan spoj s potrebnim dodanim otporima za obje vrste mjerenja i pripadnom preklopkom. Kod upotrebe instrumenata koji registriraju može se udesiti da prekapčanja slijede pravilno i često čas na jedno, čas na drugo mjerenje, pa se na istom papiru mogu dobiti registracije pravoga i praznoga učina kao vrlo informativna slika nekoga pogona.

Kod opisanih spojeva za prazni učin dolazi do većih razlika potencijala između svitaka, strujnoga i naponskoga, upotrebljenih vatmetara. To bi po D-50. normalno trebalo izbjegavati, no kod niskih pogonskih napona i manje nježnih mjernih sistema može se trpjeti. A kod nešto viših napona mogu se primijeniti priključci posredstvom mjernih naponskih transformatora koji napone dovoljno snize.

F) MJERENJA METODOM KOMPENZACIJE

I. PRINCIP KOMPENZACIJE KOD ISTOSMJERNE STRUJE

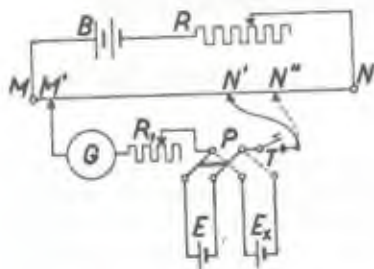
1. Metoda kompenzacije jest nul-metoda neposredno prikladna za mjerenja napona, a posredno i za mjerenja struja i otpora. Kod istosmjerne struje njezina fundamentalna važnost za tehniku električkih mjerenja leži u prikladnosti principa kompenzacije, odnosno po njemu građenih »kompenzacionih aparata« ili »kompenzatora« istosmjerne struje, za vanredno točna baždarenja najpreciznijih mjernih instrumenata, reostata i sl., pri čemu se mjerenja upiru jedino na normal otpora (normalni om) i normal elektromotorne sile (Westonov normalni element), na što je već u A-5. upozoreno. Kompenzatorom precizno baždareni instrumenti i naprave mogu onda dalje poslužiti kao praktički normalni za baždarenje i nadziranje manje preciznih instrumenata i ostalih mjernih naprava.

I na izmjenične struje metoda kompenzacije daje se također proširiti. Iako su tu prilike drukčije, pa na pr. naravno ne može

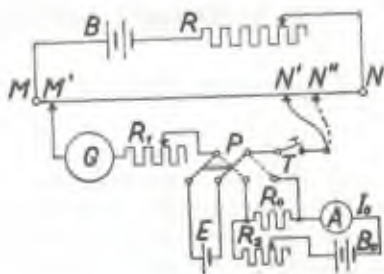
biti govora o upotrebi Westonova normalnoga elementa kao normala elektromotorne sile, postupak se pokazao upotrebljiv kao vrlo prikladna nul-metoda za različite primjene kao ispitivanja mjernih transformatora i sl.

2. Razložimo najprije *princip metode kompenzacije* kod istosmjernje struje na jednostavnom spoju s običnom kliznom žicom. Neka je u sl. 210. B baterija koja šalje (otporom R reguliranu) stalnu struju, t. zv. »pomoćnu struju«, kroz »kalibriranu« žicu MN. Paralelno dijelu M'N' te žice priključen je preko preklopke P i osjetljivoga nul-instrumenta (galvanometra G sa zaštitnim varijabilnim otporom R_1) element poznate elektromotorne sile E .

Neka se sad kliznim kontaktom N' duljina dijela M'N' klizne žice dotle udešava dok galvanometar ne pokaže nulu struje. U tomu položaju kontakta N' (koji će se uvijek dati postići ako polariteti baterije i elementa poznate elektromotorne sile E međusobno onako korespondiraju kako je naznačeno u slici, te ako je pad napona proizveden u kliznoj žici strujom iz baterije B veći od E) očito mora da je pad napona na dijelu M'N' klizne žice baš točno jednak elektromotornoj sili E . Nula struje u galvanometru postići će se naime kad dodu u ravnotežje pad napona na M'N' i elektromotorna sila E , agensi koji nastoje proizvesti suprotne struje u grani s galvanometrom i elementom, paralelnoj dijelu MN' klizne žice. Elektromotorna sila E »kompenzirana« je padom napona na MN'.



Sl. 210.



Sl. 211.

Ako je sad E poznato i iznosi na pr. 1.5 V, onda i pad napona na M'N' iznosi 1.5 V; polovici duljine M'N' odgovara 0.75 V; dvostrukoj duljini 3.0 V; uopće: proporcionalno duljini odmjerenoj na žici MN odgovara i broj volta. Prema tomu, da se izmjeri elektromotorna sila E_x nekoga drugoga elementa, dosta je preklopkom P iz sl. 210. nakon dovršenoga kompenziranja poznate elektromotorne sile E ukopčati taj drugi element, pa ako se kompenzacija njegove elektromotorne sile E_x postigne

padom napona na duljini $M'N''$ klizne žice, vrijedi relacija:

$$E_x : E = M'N'' : M'N'$$

Metodom kompenzacije mogu se prema gornjem mjeriti nepoznate *elektromotorne sile* uz pomoć poznate. No ne samo elektromotorne sile, nego i *naponi*, odnosno padovi ili gubici napona na potrošačima protjecanima strujom, dadu se mjeriti ovom metodom.

Da se na pr. odredi napon između krajeva otpora R_0 na sl. 211., kad njim po sl. 211. teče struja I_0 iz neke baterije B_0 , dovoljno je da se, nakon kompenzacije elementa poznate elektromotorne sile E pomakom nadesno preklopke P priključi otpor R_0 i da se kompenzira pad napona E_0 na tomu otporu padom napona na jednom dijelu klizne žice.

Razmotreni kompenzacioni spoj, kod koga ne treba da bude poznato ništa drugo osim elektromotorne sile E (jer stalno udešena pomoćna struja ne treba da bude poznata u amperima), funkcionira dakle kao voltmetar, i to kao voltmetar koji *ne troši* nikakve struje (jer, kod postignute točne kompenzacije kroz galvanometar G ne teče uopće struja).

Posredno mogu se kompenzacijom lako mjeriti i *struje*. Da se na pr. izmjeri struja I_0 kroz R_0 u sl. 211., dovoljno je da R_0 bude neki poznati otpor i da se kompenzacijom izmjeri napon E_0 na krajevima toga otpora. Struja I_0 dobila bi se iz relacije $I_0 = E_0/R_0$.

3. No ako se kompenzacijom mogu mjeriti naponi i struje, njom se očito mogu *baždari* voltmetri i ampermetri, a također i vatmetri. Da se na pr. izbaždari ampermetar A na sl. 211., ne bi trebalo drugo nego otporom R_0 udesiti, te kompenzacijom izmjeriti, različite struje kroz R_0 , koje su odmah i struje kroz A . Usporedbom iznosa dobivenih kompenzacionim mjerenjem s otklonima pokazanima od ampermetra moglo bi se baždarenje izvesti za po volji mnogo točaka skale ampermetra.

A da se izbaždari neki voltmetar otpora R_v , dovoljno je postaviti ga paralelno otporu R_0 na sl. 211., tako da nastane kombinacioni otpor iznosa $R'' = R_0 R_v / (R_0 + R_v)$, pa ako se reguliranjem struje iz B_0 s pomoću R_2 udese različiti padovi napona na R'' , onda pripadnim otklonima voltmetra odgovaraju kompenzacijom mjereni padovi napona na R'' .

Kod baždarenja vatmetara kompenzacijom se izmjere struja u strujnom svitku i napon primijenjen na naponsku granu.

4. Također i *otpori* mogu se uspoređivati metodom kompenzacije. Ako se, po sl. 212., ista struja I_0 pusti redom kroz poznati otpor R_0 i nepoznati R_x , pa se kompenzacijom odrede na kliznoj žici MN duljine $M'N_0$ i $M'N_x$ koje kompenziraju

padove napona E_0 i E_x na poznatom i nepoznatom otporu, onda očito nepoznati otpor slijedi iz proporcije:

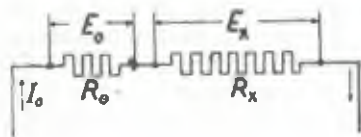
$$R_x : R_0 = M'N_x : M'N_0$$

jer su kod iste struje padovi napona proporcionalni iznosima otpora. Nema dakle zapreke da se kompenzacijom ne ispituju i mjerni otpornici i sl.

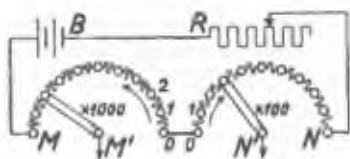
II. KOMPENZATORI ISTOSMJERNE STRUJE

5. Metodom kompenzacije dadu se prema gornjem izvoditi sva baždarenja instrumenata i aparatura koja baziraju, direktno ili indirektno, na mjerenjima glavnih električkih veličina: napona, struja i otpora.

U principu bi se čak ovakva ispitivanja mogla izvoditi jednostavnim spojem iz sl. 211., uzimajući za polaznu točku uz element poznate elektromotorne sile E još jedino poznati otpor R_0 . Međutim praktički je ovakav spoj samo s kliznom žicom neprikladan. Umjesto s kliznom žicom, koja je premalena otpora i premalo točna u isporodbi s granicama preciznosti do kojih je moguće doprijeti metodom kompenzacije kod istosmjerne struje, radi se kod preciznih mjerenja s posebnim aparatima za kompenzaciju, t. zv. *kompenzatorima* (njem. Kompensatoren; engl. potentiometers), sastavljenima u bitnosti od precizno adjustiranih i za kompenzacione svrhe kombiniranih reostata s tisućicama i daljim nižim dekadskim jedinicama oma.



Sl. 212.



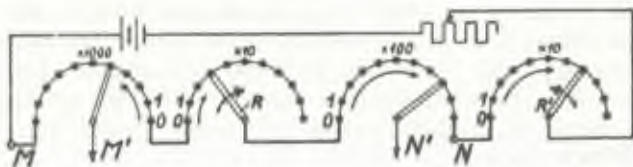
Sl. 213.

Kako u kompenzatorima dolaze veliki otpori, postizava se njima prednost da je pomoćna struja I vrlo malena, na pr. samo 0,0001 A (= 0,1 mA), dok su pogotovo neznatna opterećenja kod još ne potpuno postignute kompenzacije, Westonova normalnoga elementa (A-5.), koji kod rada s kompenzatorima služi kao izvor »poznate« elektromotorne sile E . A ta opterećenja baš i smiju biti samo posvećma neznatna kod pravilne upotrebe ovakvih elemenata.

Direktno bi se zapravo klizna žica MN spoja na sl. 211. dala zamijeniti, uzevši da su varijabilna oba kontakta M' i N' , sa samo dva dekadaska mjerna reostata s ručkom, ukopčana

po shemi u sl. 213. Kod položaja obih ručki kao u sl. 213. odsjeku između M' i N' odgovaralo bi na pr. $8000\ \Omega$ na reostatu tisućica i $300\ \Omega$ na reostatu stotica, dakle svega otpor od $8300\ \Omega$. Ali na ovaj način bi se očito dale udešavati, ne mijenjajući krug pomoćne struje I , vrijednosti otpora koje nadomještaju otpor dijela $M'N'$ klizne žice MN iz sl. 211. samo u grubim »skokovima« po $100\ \Omega$. Moglo bi se na pr. kod pokušaja kompenziranja nekoga napona udesiti $8300\ \Omega$ kao u sl. 213., ali slijedeća viša ili niža stepenica bila bi 8400 , odn. $8200\ \Omega$. Za finije udešavanje, potrebno za točnu kompenzaciju, recimo za udešavanje iznosa $8345,2\ \Omega$ na »pet mjesta«, trebaju očito i reostati s deseticama, jedinicama i desetinkama Ω .

6. No dodavanje ovih daljih dekadskih omskih jedinica jednostavnim dodavanjem pripadnih dekadskih ručnih reostata između obih krajnjih dekada kojih ručke realiziraju M' i N' , kako je to ilustrirano dodanom dekadom desetica s ručkom R u sl. 214., bilo bi u protivnosti s osnovnim zahtjevom kod mjerenja metodom kompenzacije: da pomoćna struja, jednom udešena na određeni iznos I , mora ostati stalna kod cijeloga

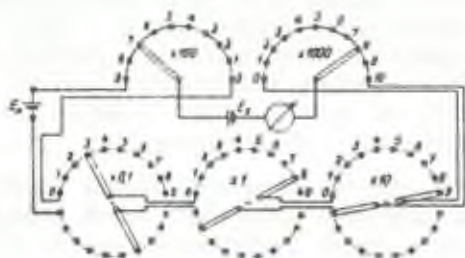


Sl. 214.

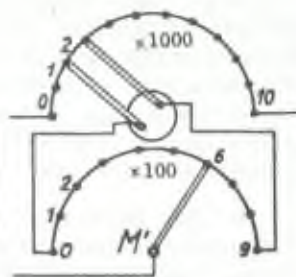
mjerenja. Mijenjanjem pak na pr. broja desetica ručkom R u sl. 214. udešavala bi se doduše točnije vrijednost otpora $M'N'$, ali bi se istodobno mijenjao ukupni otpor kruga pomoćne struje kompenzatora, a time i jakost struje I , koja treba da ostane stalna.

Jedno sredstvo protiv ove neprilike, također i praktički pokušano kod nekih konstrukcija kompenzatora, jest da se svakoj dekadi ukopčanoj *unutar* MN , između obih vanjskih dekada, doda *izvan* MN isto takova dekada koja se udešava i *istodobno* s pripadnom dekadom *unutar* MN , i to na vrijednost kojom se nadomješta ono što je u dekadi za udešavanje vrijednosti otpora $M'N'$ iskopčano. Tako na pr. u sl. 214. dekada s ručkom R' , korespondentna dekadi s ručkom R , mora biti udešena na $7 \times 10\ \Omega$, jer je dekada sa R udešena na $3 \times 10\ \Omega$, a kad bi udešenje nultarnje dekade bilo $4 \times 10\ \Omega$, ručka druge morala bi biti stavljena na $6 \times 10\ \Omega$; itd. Pri tomu se gibanja obih ručki mogu i mehanički vezati, tako da oba udešavanja nužno odgovaraju jedno drugomu.

Provede li se ova zamisao dosljedno, dolazi se na spoj *Feussnerova kompenzatora* predložen u sl. 215., kojoj nakon gornjega razlaganja ni ne treba bližega tumačenja. Kako se vidi, tu se mogu vršiti udešavanja kompenzacionoga otpora na pet mjesta, a da ipak otpor kruga pomoćne struje ostaje stalno isti.



Sl. 215



Sl. 216.

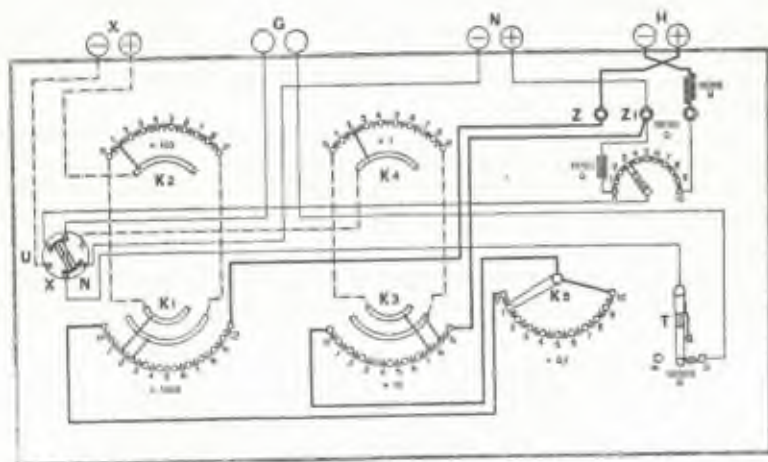
7. Kod *Rapsova kompenzatora* (S&H) izlazi se s manjim brojem precizijinih reostata. Tu je iskorišćena činjenica da na pr. grupa od 9 otpora po 1000 Ω , dakle ukupno 9000 Ω , ako se priključi po shemi u sl. 216. s pomoću jedne dvostruke ručke paralelno kojegod od 11 otpora po 1000 Ω reostata $11 \times 1000 \Omega$, daje kombinaciju ekvivalentnu otporu 900 Ω po poznatoj formuli za otpor R razgranjivanja od dvije grane $R_1 = 1000 \Omega$ i $R_2 = 9000 \Omega$:

$$R = 1000 \times 9000 / (1000 + 9000) = 900 \Omega$$

Pusti li se dakle pomoćna struja kompenzatora kroz reostat $11 \times 1000 \Omega$, moći će se dvostrukom ručkom toga reostata udešavati tisućice oma, a jednostrukom ručkom reostata $9 \times 1000 \Omega$, paralelnoga jednomu od otpora po 1000 Ω prvoga reostata, moći će se, zbog već pokazane ekvivalencije cijeloga razgranjenja s otporom od 900 Ω , udešavati i stotice oma. Tako bi udešenje na sl. 216., uzevši da je M' u toj slici korespondentno sa M' iz sl. 214., bilo: $2 \times 1000 + 6 \times 100 = 2600 \Omega$. Analogna kombinacija reostata $10 \times 10 \Omega$ s reostatom $9 \times 10 \Omega$, paralelnim jednomu od otpora reostata $10 \times 10 \Omega$, omogućila bi udešenje desetica dvostrukom ručkom prvoga reostata i udešenje jedinica jednostrukom ručkom drugoga reostata.

8. U spoju Rapsova kompenzatora po sl. 217. tisućice i stotice, te desetice i jedinice oma udešavaju se ručkama K_1 do K_4 na opisani način, a samo se desetinke oma ručkom K_5 udešavaju jednostavnim dodavanjem u potrebnom broju. Praktički ovom poslijednjemu ne može biti prigovora, jer je utjecaj nekoliko dodanih desetinki oma na ogromni iznos ukupnoga

Aparat se upotrebljava ovako: Iza kako su na odnosne parove stezaljki H, N i G u sl. 217. priključeni izvor pomoćne struje (akumulatorska baterija B od dva elementa) s otporom za reguliranje R , zatim normalni Westonov element, te galvanometar. mijenja se iznos otpora R dok se ne postigne da galvanometar kod pritiska tipke T ostaje na miru. Pri tomu treba da je preklopka U okrenuta u desni položaj N, kojim se galvanometar ukapča u granu s normalnim elementom. Kako je ta grana u opisivanomu aparatu priključena paralelno nekom zasebnom fiksnom otporu R_1 , protjecanom punom pomoćnom strujom I kompenzatora, a po omskom iznosu 10000 puta tolikom koliki je iznos E elektromotorne sile normalnoga elementa (u sl. 217. desno taj se otpor vidi fiksno



uđešen na iznos $10180 + 3 = 10183 \Omega$, t. j. uzeto je da upotrebljeni egzemplar normalnoga elementa ima baš $E = 1,0183 \text{ V}$), to neregiranje galvanometra uz pritisnutu tipku T znači da je postignuto točno udešešenje pomoćne struje I na iznos $0,0001 \text{ A}$, jer samo sa $I = 0,0001$ može se na $R_1 = 10000E$ postići pad napona IR_1 , koji se kompenzira sa E po relaciji $IR_1 = E$. Nakon toga može se preći na mjerenje nepoznatoga napona E_x , primijenjenoga na stezaljke X u sl. 217. U tu svrhu zakrene se preklapka U u lijevi položaj X, čime se galvanometar prekopča u granu s nepoznatim naponom. Kako je ova paralelna malo prije opisanomu spoju reostata s ručkama K_1 do K_8 , to se udešavanje kompenzacije napona E_x postizava traženjem položaja ručki K_1 do K_8 , kod kojih galvanometar G ostaje na miru kod pritisnute tipke T. Pri tomu očito zbog $I = 0,0001 \text{ A}$ svaka tisućica oma udešena sa K_1 vrijedi $0,1 \text{ V}$, svaka

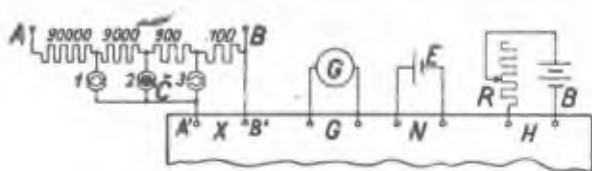
stotica udešena sa K_2 kao 0,01 V i slično desetice, jedinice i desetine oma udešene sa K_3 do K_5 vrijede po 0,001, 0,0001 ili 0,00001 V. Na pr. kod postignute kompenzacije s ručkama K_1 do K_5 u položaju kao na sl. 217. bilo bi $E_x = 0,21821$ V, i očito bi se slično ručkama K_1 do K_5 dali udesiti iznosi sve do 1,1 V točno na pet decimalnih mjesta.

Od daljih detalja spoja Rapsova kompenzatora vrijedno je spomenuti serijski otpor od 18315Ω naznačen desno gore u sl. 217. Njim se ukupni otpor kompenzatora nadopunjuje na 39505Ω , pa se, uz napone stezaljki što se mogu očekivati kod baterije B od dva akumulatorska elementa, varijabilni otpor za reguliranje R (sl. 218.) može uzeti za samo 1000Ω .

Predviđeno je nadalje da se jedinice a iznosa $10180 + a$ otpora R_1 mogu udešavati. Pojedine naime izvedbe Westonova elementa, osobito varijante s istom kod 4° C zasićenom otopinom CdSO_4 , mogu pokazivati neznatno različite vrijednosti elektromotorne sile E ako se usporede, na pr. u P.T.R. (A-5.), s »internacionalnim normalnim elementima« (amalgam Cd s kristalima CdSO_4 — koncentrirana otopina CdSO_4 — Hg s pastom Hg_2SO_4). Tako se prema egzemplaru elementa s kojim Rapsov kompenzator ima raditi iznos R_1 točnije fiksira.

Konačno se vidi da se, već prema »srednjem« ili »desnom« položaju tipke T, galvanometarski krug može priključiti po volji bilo preko »zaštitnoga otpora« od 50000Ω (za grubo prethodno udešavanje kompenzatora), bilo bez njega (za fino konačno udešavanje).

9. Da bi se opisanim kompenzatorom mogli mjeriti i naponi preko 1,1 V, što će biti potrebno na pr. kod baždarenja volt-



Sl. 218.

metara s iole višim mjernim opsezima, dovoljno je mjeriti napon priključiti na kompenzator preko »djelitelja napona«, kako je predočeno u sl. 218. Mjereni napon E_x primijeni se na stezaljke A i B, tako da se troši u ukupnom otporu

$$90000 + 9000 + 900 + 100 = 100\,000 \Omega$$

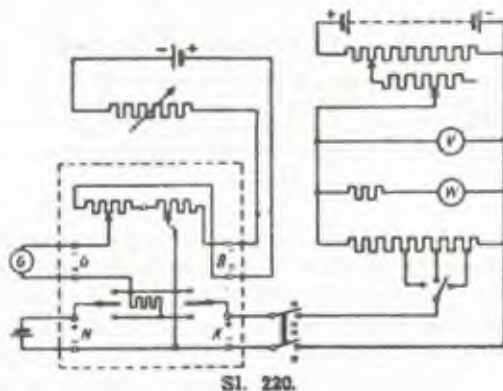
djelitelja napona. A čepom Č utaknutim kod 1, 2 ili 3 postizava se da se samo deseti, stoti ili tisući dio napona E , prenese na stezaljke A' i B' kompenzatora, na koje se inače direktno primjenjuju naponi ispod 1,1 V. Jer ako je na pr. čep utaknut kod 2, kao u sl. 218., od ukupnoga pada napona na 100000Ω

iz grupe četvorki ukupno $10 \times 4 \Omega$. A tih 10×4 oma i njima paralelnih 2×20 oma iz grupe dvadesetica daju kombinacioni otpor 20Ω , koji sa preostalih $9 \times 20 \Omega$ grupe dvadesetica izlazi na ukupno $10 \times 20 \Omega$. Ovih pak $10 \times 20 \Omega$ paralelno sa $2 \times 100 \Omega$ iz grupe stotica čini 100Ω , koji sa preostalih $9 \times 100 \Omega$ grupe po 100Ω konačno daju iznos $10 \times 100 = 1000 \Omega$ kao iznos svih otpora desno u sl. 219.

U zadnjoj liniji izlazi dakle sve na to kao da je cijeli kompenzacioni otpor iznosi $10 \times 1000 + 10 \times 100 = 11000 \Omega$ kao i kod Rapsova kompenzatora, a udešavanja se ipak dadu vršiti od tisućica do desetinki oma, s dvije jednostavne ručke za tisućice i desetinke, te tri dvostruke za stotice, desetice i jedinice.

Po shemi u sl. 219. kompenzator ima dvije preklopke; lijeva se upotrebljava kod rada s normalnim elementom priključenim kod N, a desna kod mjerenja nepoznatoga napona, primijenjenoga (direktno ili preko djelitelja napona) na stezaljke kod X. Kod obje preklopke srednji položaj jest za »grubo« udešavanje uz upotrebu zaštitnoga otpora od $100\,000 \Omega$, a gornji za »fino« udešavanje bez zaštitnoga otpora.

11. Na sl. 220. i 221. prikazan je praktički spoj kod upotrebe kompenzatora iz sl. 219. za slučaj baždarenja voltmetara i naponskih krugova vatmetara, dok sl. 221. predstavlja spoj kod



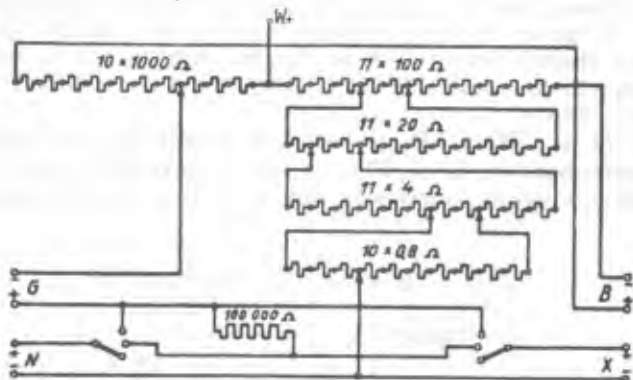
baždarenja ampermetara i strujnih krugova vatmetara. Kompenzator naznačen je pojednostavljeno u crtanom okviru, a priključci izvora pomoćne struje kompenzatora s otporom za reguliranje, te normalnoga elementa i galvanometra isti su u obje slike. Razlika je između sl. 220. i 221. samo u onomu što je priključeno na stezaljke X. U sl. 220. na njih je, preko »djelitelja napona« poput onoga iz sl. 218., prenesen smanjeno u poznatom omjeru napon primijenjen na istraživani voltmetar

djelitelja napona samo onaj dio koji se poništi u otporu $900 + 100 = 1000 \Omega$, dakle stoti dio, djeluje u kompenzatoru, pa i vrijednost dobivena kompenzacionim mjerenjem tek kad se pomnoži sa 100 pretstavlja iznos E_x . Analogno bi se rezoniralo i kod drugih položaja čepa Č. Opisanim dakle djeliteljem napona mjerni opseg kompenzatora povećava se od 1,1 V na 11, 110 i 1100 V uz položaje čepa Č kod 1, 2, odn. 3.

Tako bi na pr. položaju ručki kao u sl. 217., uz čep djelitelja napona u sl. 218. utaknut kod 3, za mjereni napon trebalo staviti:

$$E_x = 1000 \times 0,21821 = 218,21 \text{ V}$$

10. Kod kompenzatora po shemi u sl. 219. (H&B) također naročita kombinacija služi za to da se iznos kompenzacionoga otpora može udešavati na pet mjesta, od tisućica do desetinki oma, a da se ipak kod toga ništa ne promijeni ukupni otpor kruga pomoćne struje.

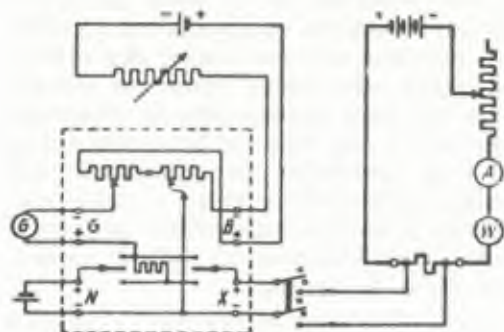


Sl. 219.

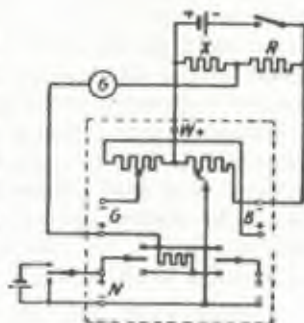
Stežaljke za bateriju B i otpor za reguliranje R iz sl. 218. ovcje su označene sa B, dok N, G i X imaju isto značenje kao i u sl. 217. Struja teče kroz $10 \times 1000 \Omega$ lijevo gore u sl. 219., a onda prelazi na kombinaciju u sl. 219. desno s grupom od $11 \times 100 \Omega$, kojoj se dvostrukom ručkom na njezine povoljne dvije susjedne stotice, dakle na iznos 200Ω , može paralelno priključiti $11 \times 20 \Omega$, a povoljnim dvjema dvadeseticama ove posljednje grupe, dakle otporu 40Ω , preko jedne nove dvostruke ručke grupa $11 \times 4 \Omega$, na koju se dalje paralelno povoljnim dvjema četvorkama te grupe dađe trećom dvostrukom ručkom nadovezati $10 \times 0,8 \Omega$. I konačno ova posljednja grupa snabdjevena je jednostavnom ručkom za udešavanje.

Sad je, analognim razmatranjima kao kod paralelnoga spoja iz sl. 216., lako vidjeti da kombinacija paralelnih grana $10 \times 0,8 = 8 \Omega$ i $2 \times 4 = 8 \Omega$ vrijedi 4Ω i čini sa preostalim $9 \times 4 \Omega$

i vatmetar; taj napon crpi se iz baterije predočene desno gore u slici, a udešava se na željene iznose reostatima priključenima na tu bateriju na naznačeni način. U sl. 221. mjeri se napon E_x između krajeva precizno poznatoga (normalnoga) otpora R_0 koji je vidljiv desno dolje u slici; R_0 protječan je strujom I_0 , koja teče i kroz ispitivani ampermetar i voltmetar, pa je kod njihova baždarenja treba odrediti; $I_0 = E_x/R_0$.



Sl. 221.



Sl. 222.

U sl. 222. prikazano je kako se kompenzator iz sl. 219. upotrebom stezaljke $W+$ u slučaju mjerenja otpora dađe pretvoriti u Wheatstoneov most za direktno isporođivanje otpora, bez upotrebe normalnoga elementa itd. Sam spoj izvede se po shemi u sl. 222.; uz malo pažnje razabire se da je on doista ekvivalentan običnom Wheatstoneovu mostu uz preklopku nacrtnu kod normalnoga elementa okrenutu na kratki spoj stezaljki N . Četiri grane mosta čine: X (nepoznati otpor), R (poznati otpor), te oba dijela na koja se rastavlja dvostrukim ručkama stotica, desetica i jedinica, te jednostrukom ručkom desetinki oma, kombinacija reostata iz sl. 219. desno ekvivalentna otporu od $10 \times 100 \Omega$; otpor $10 \times 1000 \Omega$ iz sl. 219. lijevo tu ostaje neupotrebljen. U jednoj dijagonali mosta leži izvor struje, a u drugoj galvanometar, kao i kod svakoga drugoga Wheatstoneova mosta.

Osim opisanih najpreciznijih, t. zv. normalnih kompenzatora, kojih se tolerancije dađu sniziti za više nego cijeli red veličine prema onima koje se dađu dosegnuti i najpreciznijim mjernim spravama s direktnim očitanjem, upotrebljavaju se, za nešto manje točna mjerenja, i t. zv. »tehnički kompenzatori« od kojih nekoji imaju udešavanje kliznom žicom i drugim jednostavnijim sredstvima. Takovi su kompenzatori prikladni na pr. za točnija mjerenja termoelektromotornih sila, za kemijska mjerenja (određivanja koncentracije vodikovih »iona« u ~~do~~ pinama, t. zv. pH-mjerenja) i druge svrhe.

12. Posebno grupu među napravama za kompenzaciona mjerenja čine t. zv. *stepenasti kompenzatori*, mnogo upotrebljavani u novije vrijeme. Kod njih je baždarenje nekoga instrumenta i sl. moguće izvršiti kod recimo deset unapred predviđenih ispitnih točaka ili iznosa koji se udeše na ispitivanom aparatu. Na pr. kod ampermetra do 5 A kod 10 otklona od 0,5 do 5,0 A u razmacima po pola ampera.

Jednom ručkom stepenasti kompenzator se može postepeno tako prekapčati da se postizava potpuna kompenzacija i prema tomu nula galvanometra za pojedine udešene iznose ako stvarni iznos struje ili napona odgovara udešenomu iznosu na ampermetru, voltmetru itd. Čim je pak veća razlika između stvarnoga i instrumentom pokazanoga iznosa, tim više će biti poremećeno ravnotežje kompenzatora i galvanometar će pokazivati veći otklon. Sad kod stepenastoga kompenzatora stvar je tako udešena da otkloni galvanometra pokazuju neposredno pogriješku instrumenta u %, i to u istoj skali kod *svih* 10 ispitnih točaka. U detalje ovih aparata ne ćemo se upuštati.

Kako ovim načinom otpada udešavanje kompenzatora na nulu galvanometra, koje kod rada s običnim kompenzatorima oduzimlje mnogo vremena, to rad sa stepenastim kompenzatorima, na pr. u uredima za baždarenje mjernih instrumenata i brojila, može teći udobno i brzo.

O kompenzatorima »s automatskim udešavanjem« v. na pr. ATM J 932.

III. KOMPENZACIJA KOD IZMJENIČNIH STRUJA

13. Kako je već u F-1. rečeno, u principu nema zapreke da se metoda kompenzacije primijeni i kod izmjeničnih struja. Osnovna misao kod toga mora biti da dva sinusoidna izmjenična napona mogu jedan drugomu držati ravnotežje samo ako istodobno ispunjavaju *tri* uvjeta, naime ako su: a) jednakih frekvencija, b) jednakih efektivnih iznosa i c) fazno suprotni,

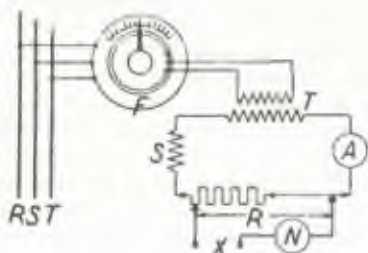
Uzevši da je jednakost frekvencija osigurana, što će automatski biti u slučajevima kad mjereni napon i napon primijenjen na kompenzacioni uređaj potječu iz istoga izvora, preostaje da se udeši dvoje, jednakost efektivnih vrijednosti i fazna suprotnost kompenzacionoga napona prema mjerenom, da bi nul-instrument (na pr. vibracioni galvanometar; E-33.) pokazao nulu. Posljedica je toga da kod kompenzacije s izmjeničnim strujama nije dovoljno jedno udešenje, nego su potrebna dva.

I sad baš po tomu, kakva su ta dva udešenja, mogu se kompenzacioni spojevi, a time i kompenzatori za izmjenične struje, klasificirati. Principno se mogu razlikovati a) oni kod

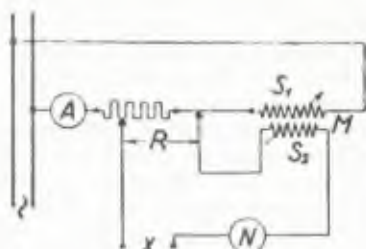
kojih se kompenzacioni napon potrebnoga efektivnog iznosa E i faznog kuta φ dobiva udešavajući posebnim sredstvom udešavanja iznos E , a posebnim fazni kut φ (na pr. iznos padom napona na više ili manje stupnjeva rotora već u E-37. opisanoga »zakretnoga transformatora« kao *pomicatelja faza*); te b) oni kod kojih se vektor napona potrebnoga za kompenzaciju mjerenoga napona proizvodi sastavljanjem u određenom iznosu i omjeru dvaju međusobno (redovno) okomitih naponskih vektora (dakle dvaju napona fazno za 90° pomaknutih, a inače povoljnih efektivnih iznosa E_1 i E_2 ; efektivni iznos E , te pomak faza φ rezultujućega napona prema onomu efektivnoga iznosa E_1 udovoljavaju relacijama: $E^2 = E_1^2 + E_2^2$; $\operatorname{tg} \varphi = E_2/E_1$).

14. Praktički se dade realizirati mnogo varijanata kompenzatora po obim spomenutim principima, a mogući su konačno i mješoviti spojevi. Od toga velikoga broja tipova neka bude izdvojeno samo nekoliko primjera za ilustraciju.

Spoj u sl. 223. (po Krukowskom) spada u kategoriju a); on radi sa zakretnim transformatorom kao pomicateljem faza. Mjereni izmjenični napon, priključen na stezaljke X, kompenzira se padom napona $\mathcal{E}$ efektivne vrijednosti E na radnom otporu poznatoga iznosa R protjecanom strujom I iz transformatora T, kojoj efektivnu vrijednost I pokazuje ampermetar A. Vrijedi relacija: $E = IR$. Iznos R udesi se na pr. na serijskoj kombinaciji jednoga dekadskoga reostata s ručkom (varijabilni kontakt lijevo u sl. 223.; udešavanje na skokove) i klizne žice (klizni



Sl. 223.



Sl. 224

kontakt desno u sl. 223.; fino udešavanje). Kako je transformator T hranjen iz mreže preko zakretnoga transformatora F, moguće je, zakrećući rotor ovoga posljednjega, udešavati fazni kut struje I , a time i napona $\mathcal{E}$. Tek kad su istodobno ispravno udešeni iznos R i zakret rotora pomicatelja faza, pokazat će nulu nulinstrument N. Svitkom bez željezne jezgre S visokoga induktiviteta treba da se potisnu harmonički gornji članovi u struji I , što je naročito potrebno ako se kao nulinstrument ne

upotrebi (samo na osnovnu frekvenciju resonantno udešeni) vibracioni galvanometar, nego na pr. galvanometar s pomičnim svitkom u kombinaciji sa suhim ispravljačem (E-36.).

Sl. 224. prikazuje spoj kategorije b) kompleksnoga kompenzatora (po Larsenu). Struja $\mathcal{I}$ kompenzatora, kružne frekvencije ω , teče redom kroz ampermetar A, koji pokazuje njezinu efektivnu vrijednost I , te kroz serijsku kombinaciju otpora za grubo i fino udešavanje iznosa radnoga otpora R (poput one iz sl. 223.), kojom se udesi pad napona $\mathcal{E}$, efektivnoga iznosa $E_1 = IR$, istofazan sa $\mathcal{I}$. No struja $\mathcal{I}$ teče i kroz svitak S_1 promjenljivoga međusobnoga induktiviteta M (v. E-20. i sl. 139.), tako da se u drugom svitku S_2 toga induktiviteta, vrtivom prema prvomu, stvara po zakonima indukcije elektromotorna sila $\mathcal{E}_2$ efektivnoga iznosa $E_2 = \omega MI$ i za 90° fazno pomaknuta prema $\mathcal{I}$, dakle i prema $\mathcal{E}_1$. Spoj je takov da, kod postignute nule instrumenta N , rezultanta $\mathcal{E}$ obih neovisno udešenih napona $\mathcal{E}_1$ i $\mathcal{E}_2$ drži ravnotežje po veličini i fazi mjernom naponu primijenjenom na stezaljke X. Vrijednosti E i φ rezultante $\mathcal{E}$ računaju se po relacijama na kraju u F-13.

15. Fazno pomicanje kompenzacionoga napona za ne prevelike fazne kuteve δ lako se postizava i s pomoću kondenzatora paralelno priključena jednomu dijelu strujnoga kruga kompenzatora.

Pomislmo hranjenu iz mreže stalnoga po iznosu i faznom kutu napona kružne frekvencije ω serijsku kombinaciju radnoga otpora R_1 i jednoga razgranjenja s radnim otporom R_2 i kondenzatorom kapaciteta C kao granama. Struja $\mathcal{I}$ (efektivnoga iznosa I) u R_1 bit će onda pomaknuta naprijed u fazi prema naponu mreže za kut δ određen veličinama R_1 , R_2 , C i ω . No istofazan sa strujom $\mathcal{I}$ jest napon utrošen na dijelu R otpora R_1 , pa ako se iznos E i fazni kut δ toga napona ispravno udeše, prikladno udešavajući s jedne strane otpor R slično kao u sl. 223. i 224., a s druge strane iznos R_2 ili iznos C (ili oba), nulinstrument N pokazat će, kod priključka mjerenoga napona na pad napona na R kao u prijašnja dva primjera, postignutu kompenzaciju, i iznos i fazni odnos mjerenoga napona moći će se izračunati. Vrijede relacije:

$$E = IR \quad \operatorname{tg} \delta = \omega C R_2^2 / (R_1 + R_2 + R_1 \cdot R_2^2 C^2 \omega^2) \quad (\text{I})$$

koje se kod neznatnih δ , odnosno zanemarivih prema $R_1 + R_2$ iznosâ trećega člana u nazivniku izraza za $\operatorname{tg} \delta$, pojednostavljuju u:

$$E = IR \quad \delta \approx \operatorname{tg} \delta \approx \omega C R_2^2 / (R_1 + R_2) \quad (\text{II})$$

S ovim formulama, i uopće s kompenzacijom kod izmjenične struje, sastat ćemo se još kod opisivanja nekih naprava za određivanje »pogrješaka« strujnih i naponskih mjernih transformatora.

G) MJERNI TRANSFORMATORI

I. OPĆENITO O INDIREKTNIM MJERENJIMA

1. Prema razlaganjima u E-85. i E-86. priključivanjem različitih aparata ili njihovih dijelova preko *mjernih transformatora* (Messwandler, instrument transformers), *strujnih* (Stromwandler, current transformers) ili *naponskih* (Spannungswandler, voltage transformers), postizava se prilagođivanje struja i napona istraživanih strujnih krugova na iznose koji leže unutar opsega mjerenja upotrebljenih raznovrsnih mjernih instrumenata i brojila, odnosno na iznose predviđene za ispravno funkcioniranje različitih »relaisa« priključenih u mrežama električkih centrala i drugim pogonima.

Medutim upotrebom mjernih transformatora mogu se postići još neke važne dalje prednosti. Tako se kod visokonaponskih pogona mjernih transformatorima s dovoljno jakom izolacijom između primarnoga i sekundarnoga namotaja postizava da priključeni aparati ostaju odvojeni od visokih napona, kao i to da se mogu smjestiti na prikladnijim mjestima, neovisno o smještaju visokonaponskoga voda. Konačno se ovakvim (potpuno ili djelomično) »indirektnim« mjerenjima, kraj usavršene gradnje savremenih mjernih transformatora i dobro razvijenih konstrukcija pripadnih mjernih sprava s prikladnim normiranim mjernim opsezima struje, odn. napona, postizavaju i znatno veće točnosti mjerenja, nego direktno priključenim instrumentima s konstruktivno možda nepovoljnijim mjernim opsezima, kakove baš diktiraju pogonske prilike postrojenja. A i na funkciju indirektno priključenih relaisa može ponašanje pripadnih mjernih transformatora u ekstremnim prilikama pogona biti od povoljnoga utjecaja.

Svaka od nabrojenih prednosti može biti dovoljna da opravda upotrebu mjernih transformatora. Tako se na pr. kod visokonaponskih postrojenja mjerenja u pravilu izvode uz upotrebu ne samo *naponskih* mjernih transformatora (koji visoki napon smanje na prikladni za instrumente niski napon), nego i *strujnih* (bez obzira na to što bi se možda pogonske struje i direktno mogle pustiti u ampermetre, u strujne svitke vatmetara i brojila, te u »strujne« relaise), jer se polaže važnost na potpunu separaciju priključenih mjernih sprava od visokih napona. Razumije se da za ovakove svrhe dolaze osim za naponske također i za strujne mjerne transformatore u obzir »visokonaponske« izvedbe, s tim jačom izolacijom (i inače većim dimenzijama), čim su viši pogonski naponi pripadnih visokonaponskih postrojenja. A slično i drugi obziri utječu na oblike izvedbe mjernih transformatora.

2. Prema gornjemu bit će shvatljivo da mjernih transformatora ima vanredno mnogo konstrukcija za različite svrhe upotrebe, vrlo raznolikih po nutarnjoj izvedbi i vanjskom izgledu, a prema tomu i cijeni.

Strujni se mjerni transformatori mogu na pr. razlikovati po sredstvu i izvedbi izolacije: ima ih sa »suhom« izolacijom (s uzduhom, porculanom, tvrdim prešanim izolacionim tvarima, tvrdim papirom), s »tekućom« (s uljem), te s izolacijom »masom« (s polukrutim, t. zv. kompaundnim izolacionim masama). A po izvedbi željezne jezgre ima ih jezgrastih (s jezgrom od limova u obliku pravokutnika), ogrnutih (s glavnim krakom, nosiocem namotaja, smještenim u sredini i nadopunjenim s obje strane u magnetski krug sporednim kracima), zatim s prstenastom jezgrom, pa s jezgrom u obliku štapa od željeznih limova. Može se nadalje razlikovati između onih kojima primarni namotaj predstavlja jedan provedeni vodič i onih s izrazito izvedenim primarnim namotajem od više zavoja. A slično je klasifikacija moguća i s obzirom na niz drugih momenata. Analogno se i naponski mjerni transformatori mogu klasificirati s vrlo mnogo gledišta: po primarnom naponu, po vrsti izolacije itd.

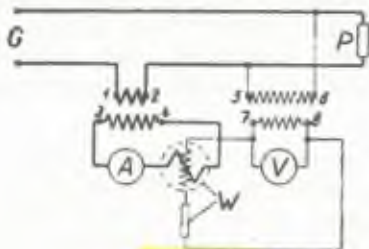
3. S gledišta mjerne tehnike od interesa su naravno poglavito način djelovanja i mjerna svojstva strujnih i naponskih mjernih transformatora. Postavljajući problem s te strane treba prije svega dobro uočiti razlike, upravo suprotnosti, u pogonskim prilikama strujnih i naponskih mjernih transformatora, koje su uvjetovane njihovim različitim načinom priključivanja s primarne strane i razlikama njihovih »tereta« (sekundarno priključenih mjernih i relejnih naprava).

Razmotrimo stvari na temelju konkretnoga primjera. U sl. 225. i 226. prikazan je za ilustraciju upotrebe strujnih i naponskih mjernih transformatora indirektni spoj ampermetra A, voltmetra V i vatmetra W; u sl. 225. spoj je, zbog lakšega snalaženja početnika, reduciran na najbitnije i sadrži detaljnije razrađene namotaje 1—2 i 3—4 strujnoga, te 5—6 i 7—8 naponskoga mjernoga transformatora, a u sl. 226. ista shema spajanja crtana je prikladnijim za praksu načinom, koji ćemo i kasnije primjenjivati, s više simboliziranim pojedinim elementima spoja, s oznakom stezaljki $K-L$, $k-l$ strujnoga i $U-V$, $u-v$ naponskoga transformatora u smislu pravila¹⁾ VDE (v. B-52.); te konačno uz dodatak propisanih »dozemnih spojeva« sekundarnih

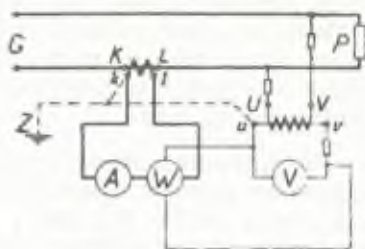
¹⁾ Pravila za mjerne transformatore VDE 0414/1932; za trofazne naponske mjerne transformatore (spojene u zvijezdu) oznake su stezaljki po istim propisima: primarno $U-V-W$, sekundarno $u-v-w$; nultočke O , odnosno o . Britanska pravila B. S. S. No. 81—1936 predviđaju velika slova primarno i sekundarno, no na sekundarnoj strani zaokružena malom kružnicom.

namotaja, kao i osigurača uz naponski mjerni transformator, na što ćemo se kasnije još povratiti.

Na primjeru iz sl. 225. i 226. razabire se odmah cio niz razlika između strujnih i naponskih mjernih transformatora. Tako se primarni namotaj strujnoga vidi ukopčan u glavni tok struje, i struja mreže I koja tim namotajem teče određena je,



Sl. 225.



Sl. 226.

obzirom na neznatnost prividnoga otpora opterećenoga strujnoga mjernog transformatora, priključenim na mrežu potrošačem P, dok mijenjanje na transformator sekundarno priključenoga »tereta« može povući za sobom tek promjenu primarnoga napona stezaljki. Naprotiv kod naponskoga mjernoga transformatora primarni namotaj je priključen paralelno potrošaču na redovno visoki napon mreže, prema kojem on treba da ima i vrlo mnogo zavoja. Tako promjene sekundarnoga opterećenja toga transformatora nemaju kao posljedicu promjene primarnoga napona, nego izazivlju promjene primarne struje.

Drugim riječima: u prvom se slučaju radi o »strujnom« transformatoru stalne primarne struje kod različitih sekundarnih opterećenja, kakov nije običan na pr. kod transformatorskih pogona jake struje, dok se u drugomu slučaju radi o »naponskom« transformatoru stalnoga kod različitih sekundarnih opterećenja primarnoga napona, a promjenljive primarne struje, dakle pogonskih prilika sličnih onima kod obične upotrebe transformatora.

I na sekundarnim stranama obih transformatora u sl. 225. i 226. prilike su upravo protivne. Kod strujnoga priključeni aparati, u konkretnom slučaju ampermetar i strujni svitak vatmetra, spojeni su u serijsku kombinaciju, i cijeli taj »teret«, protjecan istom sekundarnom strujom, predstavlja vrlo malo prividnoga otpora. Radi se tu dakle o transformatoru koji je vrlo jako opterećen (koji je skoro u »kratkome spoju«); a da se pod tim prilikama proizvede predviđena sekundarna struja, dovoljno je da i broj sekundarnih zavoja bude malen.

Kod naponskoga mjernog transformatora sekundarni napon predvidjet će se naprotiv s dosta velikim iznosom, na pr. sa

100 V, pa će i sekundarnih zavoja biti prilično mnogo. A ono što dolazi u obzir za priključivanje na takov transformator jesu »naponski« mjerni elementi i relaisi vrlo visokoga prividnog otpora; ako ih ima više, oni se priključuju na sekundarne stezaljke u paralelnim granama, kako je to učinjeno u sl. 225. i 226. s voltmetrom i naponskom granom vatmetra. I kombinacioni prividni otpori ukupnih ovakvih tereta od više grana pretstavljaju još uvijek visoke omske iznose. Tako je sekundarna struja više ili manje neznatna i pogonsko stanje naponskoga mjernoga transformatora jest vrlo slabo opterećenje skoro »prazni hod«.

4. Međutim i pored tolikih suprotnosti između strujnih i naponskih mjernih transformatora nešto se zajedničkoga svakako može reći o jednim i o drugima. A to je da kod transformiranja struje odnosno napona faktički »omjeri prenošenja« ispitivanih primarnih struja ili napona i sekundarno na priključene instrumente primijenjenih korespondentnih veličina treba da doista odgovaraju po mogućnosti što više »nominalnima« (naznačenima) omjerima prenošenja, i to a) unutar predviđenoga mjernoga opsega za mjerne instrumente, b) unutar granica opterećenja koje se kod strujnih mjernih transformatora naznačuju maksimalno dozvoljenim iznosom (u Ω) prividnoga otpora ukupnoga priključenoga »tereta«, a kod naponskih maksimalno dopuštenim »prividnim učinkom« (u VA) uzimanim od ukupnoga tereta kod nominalnoga sekundarnoga napona.

Potpuno se, naravno, zbog različitih razloga (gubici napona zbog radnih otpora i »rasipnih induktiviteta« uz primarne i sekundarne namotaje; zatim struja magnetiziranja i gubici u željezu jezgre) ne da učiniti istodobno za cijelo područje pogonskih prilika mjernih transformatora, da faktički omjer prenošenja bude jednakim nominalnom, no koliko više uspije ograničiti odstupanja faktičkoga od nominalnoga, toliko će, suponirajući instrumente koji ispravno pokazuju, biti pouzdanija mjerenja posredstvom mjernih transformatora.

Svako odstupanje faktičkoga omjera prenošenja od nominalnoga zove se *pogrješka omjera* (»ratio error« u britskim propisima za mjerne transformatore B. S. S. No. 81—1936). Više specificirano zove se ovo odstupanje, izraženo u %, kod strujnih transformatora *strujna*, a kod naponskih *naponska* pogrješka (»Stromfehler« i »Spannungsfehler« u njemačkim pravilima VDE 0414).

5. Već prema klasi točnosti nekoga mjernoga transformatora propisuju se uže ili šire granice unutar kojih moraju ostati pogrješke omjera uz predviđene granice variranja primarne veličine kao i (sekundarno priključenoga) tereta.

Tako su na pr. u verziji iz god. 1932. upravo spomenutih njemačkih pravila, koja je momentano još na snazi, za *strujne* transformatore predviđene klase 0,2; 0,5; 1,0; 3,0 i 10, pri čemu su oznakom klase odmah naznačene (slično kao kod IEC-pravila za mjerne instrumente; B-56.) i granice apsolutnoga iznosa strujne pogriješke kod nominalne struje (normirana nominalna sekundarna struja I_n jest 5 A; iznimno 1 A). Za ostale struje, od 10% pa do 120% iznosa I_n kod točnijih klasa 0,2 do 1,0, a od 50% do 100% kod grubljih (samo za relaise) klasa 3,0 i 10, strujna pogriješka ne smije prekoračiti iznose naznačene graničnim linijama iznad i ispod nul-linije u sl. 227. za pojedine klase 0,2 do 3,0. (Za klasu 10 linije bi tekle analogno onima za klasu 3,0, samo u visini iznad i ispod nul-linije koja odgovara iznosu 10%).

Pogriješka omjera se računa s pozitivnim ili negativnim brojem %, prema tomu da li faktička vrijednost sekundarne veličine leži iznad ili ispod vrijednosti koja bi na sekundarnoj strani odgovarala ispravnom omjeru mjernoga transformatora

Granice u sl. 227. vrijede kod klasa 0,2 do 1,0 za terete unutar 1/4 do 1/1 nominalnih tereta, no ne manje od 0,15 Ω kod $I_n = 5$ A (1,5 Ω kod $I_n = 1$ A); za fazni kut β tereta uzeto je da odgovara relaciji $\cos\beta = 0,8$. Kod klasa 3,0 i 10 granice pogriješke vrijede od 1/2 do 1/1 nominalne struje i za terete od 1/2 do 1/1 nominalnoga iznosa. Normirani su pak nominalni tereti za strujne transformatore s 5 A sekundarne nominalne struje: 0,2; 0,6 i 1,2 Ω .

Također već spomenuta britanska pravila iz g. 1936. predviđaju uz klase točnosti A, B, C i D za strujne mjerne transformatore za općenitu upotrebu još i osobito precizne klase AL i BL za upotrebu s laboratorijskim instrumentima, te klase AM, BM i CM za upotrebu uz električka brojila. Djelomice su granice pogriješke ovdje uže povučene (kod klase AL strujna pogriješka ograničena je iznosom 0,15% za struje od 10% do 120% nominalnoga iznosa).

6. Kod *naponskih* mjernih transformatora prema VDE 0414 klase su 0,2; 0,5; 1,0 i 3,0. Te oznake predstavljaju ujedno apsolutne iznose pripadnih granica naponske pogriješke za napone od 80% do 120% nominalnoga iznosa (sekundarno dakle od 80 do 120 V uz normirani sekundarni nominalni iznos $U_n = 100$ V), te uz prividne učine sekundarnih tereta od 1/4 do 1/1 nominalnoga iznosa, za koji je normirano da se može predvidjeti sa 15, 30 ili 60 VA (kod klase 0,2 i sa 5 VA); $\cos\beta = 0,8$.

Predviđeno područje od 80% do 120% nominalnoga napona obilno zadovoljava obzirom na uglavnom stalan napon mreže, prema kome će se prikladno udesiti omjer prenošenja mjernog transformatora.

Britanska pravila predviđaju klase naponskih mjernih transformatora A, B, C i D, te AL i BL, pri čemu je za najtočniju klasu AL granica naponske pogreške fiksirana za 0,15%.

7. Međutim zahtjev što manjega iznosa strujne ili naponske pogreške nije jedini koji se može postaviti u pogledu točnosti mjernih transformatora. Preko mjernih transformatora vrše se također, i čak naročito mnogo, vatmetrička mjerenja i registracije, te mjerenja električne radnje, a i druga kod kojih, osim iznosa napona i struje, igra ulogu i pomak faza između tih veličina.

To znači da se kod indirektnih i poluindirektnih mjerenja mora i taj pomak faza ispravno prenijeti, tako da između napona U_2 i struje I_2 , primijenjenih na pr. na vatmetar, ostane sačuvan isti pomak faza kao između korespondentnih prvobitno danih veličina U i I . Inače će, na pr. kod poluindirektnoga mjerenja jednofaznoga učina s direktno na vatmetar primijenjenim naponom ($U = U_2$), a strujom I prenesenom strujnim transformatorom omjera prenošenja recimo $200A/5A = 40$ na iznos $I_2 = I/40$ pomak faza $\varphi + \delta$ između U_2 i I_2 biti za neki makar neznatni (pozitivni ili negativni) iznos δ različit od prvobitnoga pomaka faza φ između U i I . A uz te prilike ispravan priključeni vatmetar ne može nego pokazati iznos $UI_2 \cos(\varphi + \delta)$ učina, na temelju kojega bi, uz supoziciju da je omjer prenošenja ispravan, za traženi učin faktičnoga iznosa $N = UI \cos \varphi$ izašla vrijednost:

$$N_1 = U \times 40 I_2 \times \cos(\varphi + \delta) = UI \cos(\varphi + \delta)$$

Pogrješka $p = N_1 - N = UI \cos(\varphi + \delta) - UI \cos \varphi$ lako se, upotrebom formule $\cos(\varphi + \delta) = \cos \varphi \cdot \cos \delta - \sin \varphi \cdot \sin \delta$, te relacijâ $\sin \delta \approx \delta$ i $\cos \delta \approx 1$, koje vrijede uz praktički uvijek neznatne iznose δ izražene u »lučnoj mjeri« (str. 126.), dade prikazati u obliku: $p = N \cdot \delta \cdot \operatorname{tg} \varphi$. Za pogrješku u ‰, dakle po A-13. veličinu $p\% = 100p/N$, izlazi onda konačno [ako se još umjesto δ u lučnoj mjeri stavi δ' izraženo kutnim minutama (')], dakle $10800/\pi$ puta manjim jedinicama]:

$$p\% = \pi \cdot \delta' \cdot \operatorname{tg} \varphi / 108 \quad (I)$$

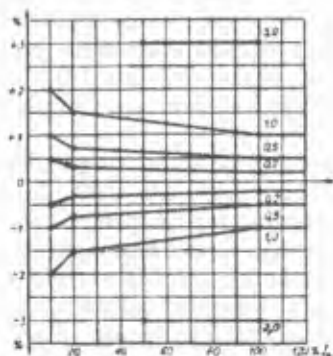
Prema tomu $p\%$ raste proporcionalno sa δ' , ali također i sa $\operatorname{tg} \varphi$, iz čega se vidi da što točnije prenošenje pomaka faza postaje tim važnije, čim je manji faktor $\cos \varphi$ mjerenoga učina. Čim naime više $\cos \varphi$ opada i prema tomu φ raste, tim više i sve naglije raste $\operatorname{tg} \varphi$, a s njim po (I) i $p\%$. Formula (I) vrijedi uostalom uopće za poremećenje faza kod mjerenja učina, pa su i (grubo zaokruženi) iznosi pogrješaka vatmetara zbog nesavršenosti naponske grane u B-23. po njoj računani.

Postoji i »nomogram« uz relaciju (I) s tri paralelna pravca na kojima su redom naneseni iznosi δ' , $p\%$ i $\cos \varphi$. Ako se na takvom

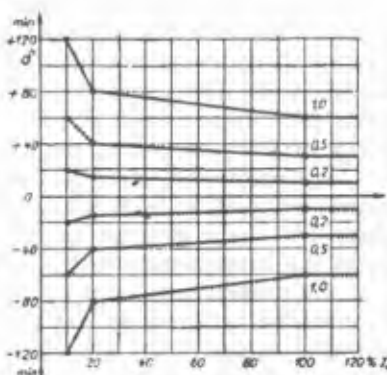
nomogramu poprečnom ravnom linijom spoje iznosi danih veličina na dva paralelna pravca, sjecište poprečne linije s trećim paralelnim pravcem daje iznos tražene treće veličine kakov bi se i računom dobio supstitucijom danih veličina u formulu (I).

8. U netom promatranom primjeru reklo bi se da strujni mjerni transformator prenosi s *kutnom pogriješkom* δ' (Fehlwinkel, phase difference). Posve analogno značenje pridavat će se pojmu »kutne pogriješke« kod prenošenja napona s pomoću naponskih mjernih transformatora.

Prema tomu treba, općenito uzevši, tražiti da ne samo pogriješke omjera nego i kutne pogriješke mjernih transformatora budu što neznatnije; tek kod grubljih mjernih transformatora, na koje se ni ne priključuju vatmetri, brojila i sl., iznos kutne pogriješke nije od važnosti.



SI. 227.



SI. 228.

Međutim kod definicije kutne pogriješke treba uzeti u obzir da bi se u teoriji transformatora kod »idealnoga« transformiranja (t. j. kad bi se mogli posvema zanemariti radni otpori i rasipni induktiviteti obih namotaja, te struja magnetiziranja i gubici u željezu) sekundarni napon računao kao fazno točno suprotan primarnom, a isto tako i sekundarna struja kao fazno suprotna primarnoj.

Kod mjerenja su istofaznost i suprotnost u fazi samo stvar ovoga ili onoga priključka stezaljki, pa se transformirani (sekundarni) napon i struja uzimlju za 180° fazno zakrenuti. Prema tomu bi kutna pogriješka kod transformatora koji bi idealno radio bila jednaka nuli, odnosno za 180° zakrenuti vektor sekundarne veličine bio bi potpuno istoga smjera s vektorom primarne veličine. Stvarno će međutim, zbog nesavršenosti transformacije, između primarne i za 180° fazno pomaknute sekundarne veličine općenito postojati neka redovno mala razlika faza δ' , prema

kojoj će i pripadni vektori činiti mali kut δ' . Iznos δ' je »kutna pogriješka« transformatora; ona se računa pozitivno ili negativno prema tomu da li je sekundarna veličina, zamišljena u gore razloženom smislu fazno pomaknuta za 180° , prema primarnoj »naprijed« ili »natrag« u fazi.

9. Već prema mijenjanju primarne veličine, te prema konstrukciji i teretu mjernoga transformatora, varirat će uz pogriješku omjera također i kutna pogriješka unutar užih ili širih granica. Ni jedna ni druga pogriješka nisu nekoga određenoga iznosa za sve pogonske prilike, i redovno se ne zna koje baš iznose imaju za neki konkretni slučaj mjerenja. Prema tomu je i praktička vrijednost formule (I) više u orijentaciji o stepenu pouzdanosti mjerenja učina i radnje kod različitih faktora učina uz pretpostavljene granice variranja kutne pogriješke.

Granice kutne pogriješke propisane su za pojedine klase točnosti mjernih transformatora. Po propisima VDE 0414 za *strujne* transformatore vrijede granice u kutnim minutama prikazane u sl. 228. graničnim linijama za klase 0,2 do 1,0; za klase 3,0 i 10, na koje se priključuju samo ampermetri i relaisi, nema propisa za kutnu pogriješku.

Za *naponske* mjerne transformatore propisane su granice kutne pogriješke kod klase 0,2; 0,5 i 1,0 sa $10'$, $20'$ i $40'$; kod klase 3,0 nema propisa za kutnu pogriješku, jer je predviđeno da se na transformatore te klase priključuju samo naponski relaisi. Navedene granice predviđene su uz ista područja variranja sekundarne veličine, te iste granice tereta, odnosno sekundarnih prividnih učina, i dr. kao kod fiksiranja granica »pogriješaka omjera« u G-5 i G-6.

Britanska pravila B. S. S. No. 81. predviđaju mjestimično uže granice za δ' . Tako je za klasu AL strujnih mjernih transformatora kutna pogriješka ograničena sa $3'$ kod struja od 60% do 120% nominalne, a sa $4'$ i $5'$ za struje od 20% do 60%, odnosno od 10% do 20% nominalne.

10. Prema gornjemu prikladni za mjerenja učina bit će samo mjerni transformatori boljih klasa, kojima su fiksirane granice ne samo za pogriješke omjera, nego i za kutne pogriješke. Pripadni indirektni ili poluindirektni spojevi, jednako oni za mjerenja radnoga učina kao i oni za mjerenja praznoga učina, lako se izvode nadovezujući na korespondentne sheme iz E-IX. i E-X. U sl. 229. do 232. donesene su za ilustraciju četiri potpune sheme spajanja za »indirektna« i »poluindirektna« mjerenja učina na jednofaznim i trofaznim sistemima.

Kako se lako vidi, sl. 229. predočuje spajanje vatmetra na jednofaznu mrežu preko jednoga strujnog i jednoga naponskog mjernog transformatora; način spajanja odgovara shemi II) u sl. 120. na str. 115., jer je naponski mjerni transformator priključen

rektne priključke I') i II') na str. 202., oznake I'') i II'') spoju za indirektna jednofazna mjerenja napona, struje i učina, prema tomu da li je taj spoj izveden s naponskim mjernim transformatorom priključenim »ispred« (protivno nego u sl. 226.) ili »iza« (kao u sl. 226.) strujnoga, lako je nadopuniti »Tabelu VIII« iz E-88. i za slučaj indirektnih (i poluindirektnih) mjerenja učina.

Ne treba naime drugo, nego ondje u toj tabeli gdje se pribraja ili oduzimaju iznosu N_0 potrošak naponskoga kruga vatmetra i onaj voltmetra zamisliti još dodan i član kojim se pribraja ili odbija i vlastiti učin *naponskoga* mjernoga transformatora, dok se kod onih slučajeva gdje se pribraja ili odbijaju potrošci strujnoga svitka vatmetra i ampermetra mora još pribrojiti ili odbiti vlastiti potrošak *strujnoga* mjernog transformatora; pod iznosom N_0 treba u svim ovim slučajevima razumijevati već na primarno preračunani (množenjem omjerom prenošenja struje i omjerom prenošenja napona) sekundarno vatmetrom pokazani iznos.

Ako je mjerenje poluindirektno, dakle bez jednoga ili drugoga od oba transformatora, otpada i član koji bi inače trebalo dodati ili oduzeti zbog potroška ispuštenoga transformatora.

Uostalom baš kod upotrebe mjernih transformatora korekcije će redovno praktički iščezavati, pa ih ne će ni trebati uzimati, jer kraj transformiranjem smanjenih struja i napona potrošci instrumenata ispadaju prema N_0 obično relativno neznačajni, a slično su maleni i potrošci mjernih transformatora.

Primjer: Po shemi tipa II'') u sl. 226. neka se mjeri a) učin potrošača, b) učin generatora. Upotrebljeni strujni mjerni transformator neka je nominalnoga omjera prenošenja $10\text{A}/5\text{A} = 2$ i nominalni teret neka mu je $0,6\ \Omega$, a naponski neka ima nominalni omjer prenošenja $6000\text{V}/100\text{V} = 60$ i nominalni učin 15 VA . Priključeni ampermetar i strujni svitak vatmetra neka predstavljaju prividne otpore $0,3 + 0,1\cdot j$ i $0,2 + 0,15\cdot j$ (v. E-11.), a voltmetar i naponska grana vatmetra neka su čisti radni otpori od 2500 , odn. $2000\ \Omega$. Strujni mjerni transformator neka kod nominalne struje od 5 A troši 7 W , a naponski kod nominalnoga napona $8,5\text{ W}$. Očitavanja instrumenata neka su: 4 A ; 100 V ; 320 W .

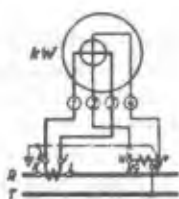
Prije svega lako je vidjeti da tereti odgovaraju upotrebljenim mjernim transformatorima. Tako teret strujnoga predstavlja ukupni prividni otpor:

$$(0,3 + 0,1\cdot j) + (0,2 + 0,15\cdot j) = 0,5 + 0,25\cdot j$$

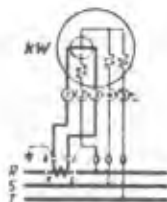
s iznosom $Z = 0,56\ \Omega$ (računanim po formuli $Z^2 = 0,5^2 + 0,25^2$) koji još ne premašuje granicu $0,6\ \Omega$. Opterećenje pak naponskoga transformatora jest $100^2/2500 + 100^2/2000 = 9\text{ W} = 9\text{ VA}$ i leži unutar područja od $1/4$ do $1/1$ nominalnoga učina toga transformatora.

iz a strujnoga. Spoj bi slijedio i iz sheme u sl. 226., u kojoj bi samo trebalo »kratko« premostiti ampermetar i otkopčati voltmetar.

Slike 230. do 232. predložuju trofazna mjerenja učina. U sl. 230. spoj je po metodi jednoga vatmetra, sa strujnim svitkom priključenim preko strujnoga mjernoga transformatora, a s naponskom granom (u kombinaciji s još dva u instrument ugrađena otpora,

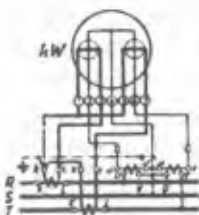


Sl. 229.

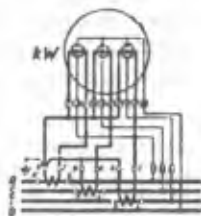


Sl. 230.

tako da se dobiva »umjetna nul-točka« neposredno. U sl. 231. spoj je po metodi dvaju vatmetara (vidi sl. 205.) sa strujnim svicima obih vatmetričkih mjernih sistema priključenima preko dvaju strujnih, a naponskim granama preko dvaju naponskih mjernih transformatora. Način priključivanja kao u sl. 231. ovih posljednjih zove se »V-spoj«. U sl. 232. tri mjerna vatmetrička sistema priključena su poluindirektno na fazne vodiče R, S, T i nulvodič O trofaznoga voda s četiri vodiča.



Sl. 231.



Sl. 232.

Mjerne sisteme u sl. 231., odn. 232., treba zamišljati s pomičnim dijelovima montiranima na zajedničku osovinu, dakle kombinirane u jedan instrument koji odmah pokazuje algebarsku sumu otklona koje bi pojedini sistemi dali svaki za sebe. No po istim shemama postupalo bi se i s dva, odnosno s tri pojedinačna vatmetra.

Osigurači i dozemni spojevi naznačeni u sl. 229. do 232. odgovaraju propisima, odn. tehničkoj praksi kod izvođenja ovakovih mjerenja; v. i G-18.

11. Upotrebom mjernih transformatora kod mjerenja učina nastaje potreba da se kod proračunavanja korekcija, u koliko te praktički uopće dolaze u obzir, uzme u račun pored vlastitoga potroška učina instrumenata također vlastiti potrošak mjernih transformatora. Pridjeljujući, po analogiji sa shemama za di-

Ukupni očitani učin, preračunan na primarnu stranu, jest:

$$N_0 = 2 \times 60 \times 320 = 38400 \text{ W} = 38,4 \text{ kW}$$

a ispravni učin, suponorajući da mjerni transformatori prenose svaki točno po svom nominalnom omjeru i da nemaju kutnih pogriješaka, te da priključeni vatmetar korektno pokazuje, bio bi (u W):

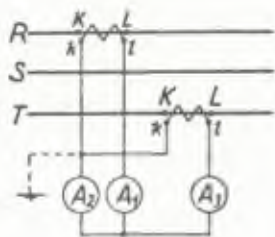
a) za potrošač: $38400 - 100^2/2500 - 100^2/2000 - 8,5 = 38400 - 17,5$

b) za generator: $38400 + 4^2 \cdot 0,3 + 4^2 \cdot 0,2 + (4^3/5^2) \cdot 7 = 38400 + 12,5$

pri čemu je kod b) vlastiti potrošak strujnoga mjernog transformatora, naveden sa 7 W za »nominalnu« struju 5 A, trebalo preračunati na faktičku struju 4 A.

Objekorekcije, $-17,5 \text{ W}$ i $+12,5 \text{ W}$, doista su neznatne prema N_0 , te ne dolaze praktički u obzir (već i zato što će tolerancije upotrebljenih mjernih transformatora i vatmetra biti znatno veće).

12. Upozorimo još na neke osobite načine primjene indirektnih mjerenja. Ako se u nesimetrično opterećenomu trofaznom sistemu s tri vodiča R, S, T žele indirektno mjeriti iznosi svih triju struja I_1 do I_3 , mogu se tri pripadna ampermetra A_1 do A_3 priključiti također i preko samo dva strujna mjerna transformatora istoga omjera prenošenja. Kod spoja po sl. 233. ampermetri A_1 i A_3 mjerit će struje I_1 i I_3 u R i T, dok ampermetar A_2 , tako spojen da njime teče geometrijska suma struja kroz A_1 i A_3 , mjeri struju I_2 (jer uopće u trofaznom sistemu s tri vodiča ma kojoj linijskoj struji odgovara geometrijska suma ostalih dviju; da se to razabere, dosta je pomisliti potrošač spojen u zvijezdu).



Sl. 233



Sl. 234.

I tri linijska napona E_1 do E_3 između vodiča R, S, T također se mogu mjeriti priključkom triju voltmetara V_1 do V_3 na samo dva naponska mjerna transformatora u već spomenutom (G-10.; sl. 231.) V-spoju. Jedan voltmetar priključi se na sekundarni namotaj prvoga, a drugi na sekundarni namotaj drugoga mjernog transformatora, dok treći voltmetar leži na serijskoj kombinaciji od oba sekundarna namotaja.

U nekim slučajevima za trofazni priključak upotrebit će se trofazni naponski mjerni transformatori primarno i sekundarno spojeni u zvijezdu, ili tri jednofazna, s namotajima također primarno i sekundarno »u zvijezdi«.

Specijalan oblik strujnoga mjernog transformatora predstavlja Dietzeov rasklopivi transformator (Dietze's Anleger). Njegova željezna jezgra montirana je poput hvataljki na neke vrsti kliješta (sl. 234.), pa se daje rasklopiti. Rasklopljenom jezgrom može se obuhvatiti vodič protjecan strujom koju treba mjeriti. Obuhvaćeni vodič djeluje kao primarni namotaj, pa kad se jezgra opet zatvori, može se struja očitati na instrumentu priključenom na sekundarni namotaj, već ugrađenom kao u sl. 234. ili izvana dodanom.

I bez naponskih mjernih transformatora mogu se obavljati mjerenja visokih izmjeničnih napona upotrebom »kondenzatorskih« provodnika kao »kapacitivnih djelitelja napona«¹⁾.

Također za mjerenja vanredno jakih istosmjernih struja (na hiljade ampera), kod kojih proširivanje mjernoga opsega porednim otporima postaje već neprilično, konstruirane su naprave, koje na ovom području vrše sličnu zadaću kao strujni mjerni transformatori kod izmjeničnih struja²⁾.

II. IZ TEORIJE MJERNIH TRANSFORMATORA

13. Upoznali smo uvjete pogona strujnih i naponskih mjernih transformatora i značenje što manjih »pogrješaka« omjera i kuta, pa možemo postaviti pitanje, na koji se način postizava da mjerni transformatori odgovaraju svojim zadacima.

Općenito se, naravno, njihovo djelovanje osniva na fundamentalnim svojstvima zajedničkim svima transformatorima, pa se specijalno i željeni odnošaj između primarnoga i sekundarnoga napona stezaljki U_1 i U_2 kod naponskih, kao i odnošaj između primarne i sekundarne struje I_1 i I_2 kod strujnih mjernih transformatora, u bitnosti postizavaju različitim brojevima w_1 i w_2 zavoja primarno i sekundarno. Pri tomu je važno, i za postizavanje zadataka postavljenih obim kategorijama mjernih transformatora povoljno, da su pogonske prilike naponskih mjernih transformatora prema onima strujnih suprotne baš u tomu smislu kako je pogodno za što točnije udovoljenje posebnih ciljeva jednih i drugih. Naime od osnovnih približnih relacija za transformatore, i to relacije

$$U_1 : U_2 \approx w_1 : w_2 \quad (I)$$

¹⁾ Više u ATM V 3333—3.

²⁾ Vidi na pr. Walter, Strom- u. Spannungswandler, München 1937., str. 151 do 155.

o *upravnoj* proporcionalnosti napona stezaljki primarno i sekundarno s pripadnim brojevima zavoja, i relacije

$$I_1 : I_2 \approx w_2 : w_1 \quad (II)$$

(ili $I_1 w_1 \approx I_2 w_2$) o *neupravnoj* proporcionalnosti struja prema brojevima zavoja, za prvu su, da bude što potpunije ispunjena, pogodna slaba opterećenja uz samo malo VA sekundarnoga prividnog učina, kakova baš i dolaze kod naponskih mjernih transformatora, a kod druge se pretpostavljaju jaka opterećenja, kakova i pretstavljaju tereti u obliku prividnih otpora neznatnih iznosa u Ω , što se priključuju sekundarno na strujne mjerne transformatore. A i za postizavanje što manjih kutnih pogriješaka mjernih transformatora, naponskih ili strujnih, također su povoljne pogonske prilike pod kakvima se baš upotrebljavaju pripadni transformatori.

14. Stvarno se mora računati s tim da će se pogriješke omjera i kuta dati samo suziti, a ne potpuno i istodobno ukloniti općenito za sve varijacije pogonskih prilika primarno i sekundarno. Detaljniji uvid u faktore koji kod toga utječu dobiva se razmatranjem točnoga vektorskoga prikaza prilika u transformatorima sa željeznom jezgrom. Kako se taj prikaz, primijenjen na primjeru naponskih i primjeru strujnih mjernih transformatora, ne razlikuje u bitnosti ničim osim kvantitativnim odnosima proizašlim iz različitih pogonskih prilika obih kategorija mjernih transformatora, mi ćemo ga u sl. 235. i 236. usporedno donijeti u dvije izvedbe, jednoj s kvantitativnim odnosima više kao kod naponskih, a drugoj s odnosima poput onih kod strujnih mjernih transformatora; ipak ćemo i u tim slikama, zbog bolje preglednosti, različite gubitke i druge utjecaje koji izvede pogriješke mjernih transformatora namjerno ponešto pretjerati prema realnim odnosima.

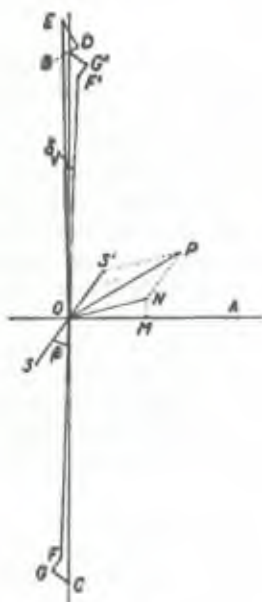
Redovno se transformatorski vektorski prikazi crtaju »reducirani« na omjer zavoja 1 : 1, da bi se lakše mogli uspoređivati transformatori različitoga načina gradnje bez obzira na slučajne razlike u omjerima njihovih brojeva zavoja, te da bi jedan prikaz vrijedio za transformatore istih karakteristika s kakvimgod omjerima broja zavoja. Pri tomu se veličine s jedne strane transformatora crtaju onakve kakve jesu, a one s druge strane preračunane na prvu stranu na omjer zavoja 1 : 1. Tako su i sl. 235. i 236. crtane uz omjer 1 : 1, i to s preračunanim primarnim veličinama na sekundarnu stranu. U tu svrhu na sl. 235. i 236. primarne napone treba zamišljati da su crtani pomnoženi omjerom w_2/w_1 , primarne struje omjerom w_1/w_2 , primarne radne i prazne otpore (kao kvocijente napona i struje) sa

$$(w_2/w_1) : (w_1/w_2) = w_2^2/w_1^2$$

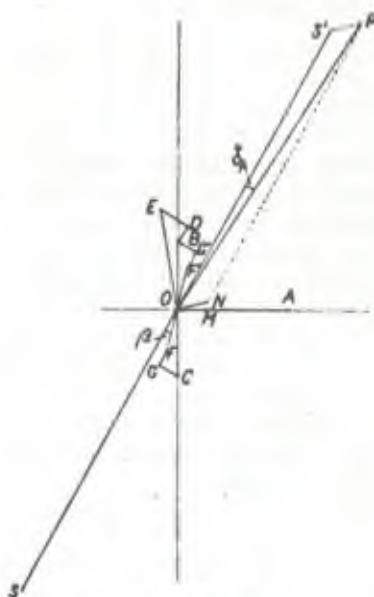
(a obrnuto bi se, kod danoga vektorskoga prikaza, primarni

naponi, struje i otpori za ma koji zamišljeni omjer brojeva zavoja dobili množenjem pripadnih reducirano na sekundarnu stranu crtanih veličina s recipročnim izrazima w_1/w_2 , w_1/w_1 , odnosno w_1^2/w_2^2 faktorā upotrebljenih kod crtanja »na sekundarno« reduciranoga prikaza).

15. Odaberimo u sl. 235. i 236. po volji kao smjer vektora OA »glavnoga« toka efektivnoga iznosa Φ smjer apscisne osi. Kako će biti poznato, pod glavnim magnetskim tokom (Hauptfluss) razumijeva se tok zajednički primarnom i sekundarnom namotaju transformatora; naprotiv ono nešto magnetskih linija koje se mogu uzeti kao vezane samo s primarnim, odnosno samo sa sekundarnim namotajem, čine »rasipne« tokove (Streuflüsse):



Sl. 235.



Sl. 236.

primarni efektivnoga iznosa Φ_{11} i sekundarni efektivnoga iznosa Φ_{21} . Variranjem (s frekvencijom f Hz izvora struje) »glavnoga toka« stvaraju se u primarnom i u sekundarnom namotaju elektromotorne sile E_1 i E_2 , s efektivnim iznosima u voltima određenim formulama $E_1 = 4,44 \cdot \Phi_m \cdot f \cdot w_1$ i $E_2 = 4,44 \cdot \Phi_m \cdot f \cdot w_2$; u njima $\Phi_m = \Phi_1 \cdot \sqrt{2}$ znači »maksimalnu« (tjemenu) vrijednost glavnoga toka u voltsekundama (Vs), tako da vrijedi relacija $\Phi_m = B_m \cdot S$ gdje B_m i S znače maksimalnu magnetsku indukciju uteslama(T)iprerez u m^2 željezne jezgre transformatora.

Izrazi za E_1 i E_2 tako su građeni da rezultira *tačno*, a ne samo približno kao za napone stezaljki U_1 i U_2 , upravni odnos veličina E_1 i E_2 s brojevima zavoja:

$$E_1 : E_2 = w_1 : w_2 \quad (\text{III})$$

pa ako se, kao u sl. 235. i 236., crta vektorski prikaz za omjer brojeva zavoja 1 : 1, pripadne vektore OB i OC elektromotornih sila proizvedenih variranjem glavnoga toka trebat će uzeti tačno jednake duljine. A s druge strane trebat će ih crtati u smjeru ordinatne osi, okomito na smjer vektora OA glavnoga toka, jer su po zakonima elektromagnetske indukcije sinusoidni naponi inducirani sinusoidno promjenljivim magnetskim tokom fazno za 90° pomaknuti prema tomu toku.

Dalje je iz elektrotehnike poznato da se struja efektivnoga iznosa I_0 za magnetsko uzbuđivanje željezne jezgre kod sekundarno otvorenoga transformatora može zamisliti sastavljena od dvije komponente: jedne, efektivnoga iznosa I_g , koja je istofazna s glavnim tokom, pa joj je i vektor OM istosmjernan sa OA (t. zv. »čista« struja magnetiziranja), i druge, efektivnoga iznosa I_h , fazno prema glavnom toku za 90° pomaknute i prema tomu predočene vektorom MN okomitim na OA, kojom se uzimlju u račun gubici učina od »histereze« i »vrtložnih struja« što nastaju kod izmjeničnoga magnetiziranja željezne jezgre transformatora (»gubici u željezu«). Tako izlazi struja predočena vektorom ON, geometrijskom sumom od OM i MN, kojoj je efektivni iznos I_0 vezan sa I_g i I_h relacijom: $I_0^2 = I_g^2 + I_h^2$.

Kod opterećena transformatora, uz sekundarnu struju OS povoljnoga efektivnoga iznosa I_2 , i povoljnoga faznog kuta, primarnu struju I_1 treba shvatiti kao geometrijsku razliku OP od ON i OS, odnosno kao geometrijsku sumu od ON i (vektoru OS protivnoga vektora) OS'.

No uz nacrtane vektore OP i OS primarne i sekundarne struje određeni su i smjerovi vektora »gubitaka napona« unutar transformatora, primarnih i sekundarnih, koji na primarnoj strani geometrijski pribrojeni vektoru OB daju primarni napon stezaljki OE efektivnoga iznosa U_1 , dok oni na sekundarnoj strani moraju biti geometrijski oduzeti od OC da preostane sekundarni napon stezaljki OF efektivnoga iznosa U_2 . U te gubitke možemo s jedne strane ubrojiti one od svladavanja radnih otpora R_1 i R_2 obih namotaja; oni su istofazni s pripadnim strujama i njihovi vektori BD i FG efektivnih iznosa $I_1 R_1$ i $I_2 R_2$ paralelni su sa OP, odnosno OS. A s druge strane tu su i gubici napona zbog svladavanja elektromotornih sila induciranih od sinusoidno (s numeričkom frekvencijom f , odnosno kružnom $\omega = 2\pi f$) promjenljivih rasipnih tokova Φ_{1s} i Φ_{2s} , koji se mogu tako uzeti u račun da se zamisle pripadni »rasipni induktiviteti« L_{1s} i L_{2s} .

odnosno njima korespondentni prazni induktivni otpori $X_1 = L_{11}\omega$ i $X_2 = L_{22}\omega$ (E-7.), na kojima nastupaju padovi napona $I_1 X_1$ i $I_2 X_2$, koji su fazno za 90° pomaknuti prema pripadnim strujama i mogu se predočiti vektorima DE i GC, okomitima na BD, odnosno FG.

16. Kad su tako svi elementi vektorskoga prikaza nacrtani, lako je pregledati pojedine utjecaje koji stvaraju pogriješke omjera p_V i p_A , odn. pogriješke kuta δ_V i δ_A , mjernih transformatora iz sl. 235. i 236.

Tako u sl. 235. treba samo zamisliti zakrenuto OFGC oko O za 180° u položaj OF'G'B (zbog OC = OB padne C u B), pa naponska pogriješka p_V i kutna δ_V pripadnoga naponskoga mjernoga transformatora slijede iz odnosa vektora OE i OF': prva je jednaka u % izraženoj razlici dužine vektora OF' prema onoj vektora OE, a druga u kutnim minutama izraženom kutu između vektora OF' i OE.

A pogriješke strujnoga mjernoga transformatora s vektorskim prikazom kao u sl. 236. dadu se izraziti: strujna p_A kao u % izražena razlika dužine OS' prema dužini OP, a kutna δ_A kao u kutnim minutama izraženi šiljasti kut vektora OS' i OP.

17. Kako se vidi, da pogriješke *naponskih* mjernih transformatora budu što neznatnije, potrebno je da gubici napona u transformatoru, primarni BD i DE kao i sekundarni F'G' i G'B, budu što neznatniji; drugim riječima: da budu malenoga iznosa s jedne strane struje, primarna i sekundarna, a s druge strane također i iznosi R_1 i R_2 , te X_1 i X_2 (dakle da namotaji nemaju mnogo otpora i da transformator ima magnetski krug željezom što savršenije zatvoren, t. j. s malo »rasipnih« magnetskih linija primarno i sekundarno). Naprotiv nije toliko bitno da struja OM kod naponskih mjernih transformatora bude naročito neznatna, pa se u praksi magnetska opterećenja željezne jezgre mogu tjerati do sličnih iznosa kao kod običnih transformatora (na pr. B_m uzme se oko 6000 ili 10000 gaussa ili slično).

U vezi sa zahtjevom malene sekundarne (a po tomu i primarne) struje, dakle zahtjevom malenoga opterećenja, vrijedno je primjetiti da se kod naponskih mjernih transformatora baš s obzirom na pogriješke *nominalni* iznos učina u VA (G-6.) uzimlje znatno niži od iznosa t. zv. *graničnog* učina u VA, koji bi transformator još podnio bez pretjeranoga ugrijavanja; u praksi je redovno granični učin nekoliko puta toliki kao nominalni.

Uostalom ne samo variranja iznosa sekundarnih VA, odnosno iznosa sekundarne struje OS, nego i variranja *pomaka faza* β između struje OS i sekundarnoga napona stezaljki OF imaju za posljedicu varijacije obih pogriješaka naponskoga

mjernoga transformatora. Promjena smjera vektora OS nužno naime povlači za sobom promjenu smjera od FG i GC, odnosno od F'G' i GB; a kako se istodobno promijene i smjer i veličina vektora OP, nastaju korespondentne promjene i kod BD i DE, pa na pr. kod određenoga porasta kuta β može strujna pogriješka narasti, a kutna spasti ili čak promijeniti predznak. Kako se vidi, svi se navedeni odnosi, i još drugi, dadu pregledati varirajući prikaz u sl. 235. prema danim prilikama, no držeći uvijek na umu da se radi o »naponskom« transformatoru (G-3.)

Kratki spoj, i uopće prejake primarne i sekundarne struje, mogu škoditi naponskom mjernom transformatoru; odatle osigurajući u sl. 226., 229. i 231. Naprotiv nema štete ako se naponskom mjernom transformatoru, koji je primarno pod naponom, otvori sekundarni krug, tako da transformator dođe u potpuni »prazni hod«; stvar je baš suprotna, nego kod strujnih mjernih transformatora koji, kako ćemo odmah vidjeti, primarno priključeni ne smiju doći u prazni hod, a smiju biti sekundarno kratko spojeni.

18. Kod *strujnih* mjernih transformatora pogriješke će, prema sl. 236., biti tim neznatnije, čim struja uzbuđivanja ON = S'P bude neznatnija prema sekundarnoj OS. Time se OS' i OP veličinom i smjerom sve više približuju, pa relacija (II) iz G-13. točnije vrijedi, a i kutna pogriješka postaje neznatnija.

Gornji zahtjev izlazi na to, da s jedne strane strujni mjerni transformatori moraju biti opterećeni vrlo velikom strujom OS, a s druge strane da treba struju ON nastojati po mogućnosti učiniti što manjom. Zbog prvoga se na strujne mjerne transformatore priključuju samo neznatni sekundarni prividni otpori, pa je zato i naznačeno »nominalnim teretom« (G-5.) kod tih transformatora, koji mali iznos Ω ukupni sekundarni prividni otpor smije najviše dosegnuti. Da se pak uzbudna struja učini što manjom, dolaze u obzir kod strujnih mjernih transformatora slabo magnetizirane i magnetski dobro zatvorene jezgre od magnetski po mogućnosti odličnih željeznih slitina (koje se do željenoga B_m , na pr. do samo nekoliko stotina ili tisuću gausa, magnetiziraju već neznatnim iznosom »amperzavoja« i koje imaju neznatne gubitke od histereze i vrtložnih struja).

I ovdje, naravno, utječu na iznos pogriješaka različite pogonske prilike: varijacije primarne struje, promjene sekundarno priključenoga tereta, itd. Uz ostalo osim omskoga iznosa tereta utječe njegov fazni kut. Njime je određen pomak faza β između sekundarne struje OS i sekundarnoga napona stezaljki OF. Svi se ti utjecaji dadu pregledati varirajući, već prema danim prilikama, prikaz u sl. 236., no uvijek držeći u vidu da se radi o »strujnom« transformatoru (G-3.).

Baš ova činjenica, da su »strujni«, odlučna je i za vladanje strujnih mjernih transformatora kod tereta od mnogo Ω , odnosno

ekstremno kod »praznoga hoda« (otvorenoga sekundarnog kruga). Kako je primarna struja određena pogonskim prilikama mreže, i sekundarno opterećenje praktički ne može na nju utjecati, to se kod sve manjega OS, a time i OS', geometrijska diferencija $ON = S'P$ između OP i OS' sve više približava minuendu OP. Konačno kad OS u slučaju praznoga hoda iščezne, ON postane identično sa OP. Dolazi dakle do vanredno jakoga uzbuđenja jezgre transformatora, koje prate: a) pojavi vanredno jakoga magnetiziranja i magnetske zasićenosti jezgre, te s njima u vezi b) jaki gubici i ugrijavanje željeza zbog histereze i vrtložnih struja, i c) efekt da naponi stezaljki, primarni i (naročito) sekundarni, kraj silno povećanoga magnetskoga toka postanu relativno vrlo visoki, i u tomu smislu »nesinusoidni« da imaju pogotovo visoke tjemene vrijednosti, tako da kod spomenutoga efekta može nastati pogibelj od visokih napona. Prema tomu se prazni hod strujnih mjernih transformatora ne može dopustiti, dok naprotiv nema zapreke da ih se ostavi primarno priključene uz kratko spojene sekundarne stezaljke, na pr. u slučajevima kad se priključeni ampermetri itd. moraju privremeno iskopčati (zbog popravka i sl.).

Prema rečenomu bit će također shvatljivo, što u sl. 226., te 229. do 232., nema osigurača sekundarno uz strujne mjerne transformatore. Svi mjerni transformatori u sl. 226., 229. i 231. spojeni su po propisima sekundarno sa zemljom. Od dozemnoga spoja strujnih mjernih transformatora odustaje se (da bi se izbjegli nepoželjni naponi između strujnoga i naponskoga svitka vatmetra) tek kod poluindirektno strujnim transformatorom na izmjeničnu mrežu priključenih vatmetara. Kod trofaznih priključaka s »umjetnom nultočkom« po sl. 230. i 232. dozemni spoj stezaljki k naprotiv je predviđen.

Preglednije se utjecaji različitih faktora, na pr. utjecaji variranja kuta β između vektora sekundarne struje i sekundarnoga napona stezaljki, dadu kod obih kategorija mjernih transformatora slijediti iz naročito kombiniranih diagrama po Möllingeru i Geweckeu, u koje međutim ovdje ne ćemo bliže zalaziti. U bitnosti su tu samo spretno raspoređeni odnosi već sadržani u vektorskom diagramu po sl. 235., odn. 236.

Primjetimo konačno da se pogreške omjera mogu smanjiti uzimajući namjerno omjer brojeva zavoja ponešto drugi od »nominalnoga« omjera prenošenja mjernoga transformatora, na pr. kako je to najpovoljnije uz $1/4$ do $1/1$ nominalnoga tereta.

19. Ima i drugih odlučnih momenata kod konstrukcije i izbora mjernih transformatora. Tako je kod strujnih od velike važnosti njihovo vladanje kod (praktički više ili manje kratkotrajnih) ekstremno visokih struja, što nastaju kod kratkih spojeva u mreži. Kod tih prilika, zbog pojava magnetske zasićenosti, strujna pogreška raste (sekundarna struja izlazi prema-lena), pa je, da se karakterizira strujni mjerni transformator u u tom pogledu, uveden pojam »konstante prejake struje« (Überstromziffer) n ; to je broj koji kaže kod kojega višekratnika

nominalne primarne struje strujna pogriješka dosegne iznos 10%. Ako se na pr. uz nominalni omjer prenošenja 30A/5A prenese 600 A sa samo 90 A umjesto sa 100 A, n iznosi $600/30 = 20$.

Osim toga strujni mjerni transformatori moraju pokazivati čvrstoću protiv kratkih spojeva i to a) s gledišta ne prejakoga ugrijavanja, te b) obzirom na to da ne nastanu mehaničke sile (od elektrodinamičkih utjecaja između vodiča i namotaja protjecanih ekstremno visokim strujama) u tolikom iznosu da dođe do oštećenja mjernoga transformatora. Za karakterizaciju u jednom, odnosno drugomu pogledu služe »termička« i »dinamička« granična struja strujnoga mjernog transformatora.

Za termičku graničnu struju u amperima, supponirajući da joj je trajanje 1 sekunda, uzimlje se po VDE 0414 180-kratnik prereza primarnoga (bakrenog) namotaja u mm^2 . Kod predviđenoga kraćega ili duljega trajanja može se uzeti da toplina raste s kvadratom struje i s prvom potencijom vremena; na pr. struja $I = 12000$ A u trajanju od 2 sekunde može biti nadomještena strujom $I\sqrt{2} = 17000$ A u trajanju od 1 sekunde i najmanji prerez primarnoga namotaja bio bi $17000/180 \approx 95 \text{ mm}^2$.

III. ODREĐIVANJE POGRJEŠAKA MJERNIH TRANSFORMATORA

20. Za određivanje pogriješaka omjera i kuta nekoga mjernoga transformatora u određenim pogonskim prilikama ne dolazi praktički u obzir metoda uspoređivanja direktno i zasebno izmjerenih primarnih i sekundarnih veličina, jer bi na pr. kod određivanja pogriješke omjera dobiveni iznosi $p\%$, iz sličnih razloga kao u primjeru iz A-17., i kod uskih postotnih tolerancija izmjerenih primarnih i sekundarnih iznosa, bili na mnogo $\%$ nepouzdati, kako se lako razabire na konkretnom primjeru.

Recimo da bi se mjerila strujna pogriješka $p\%$ mjernoga transformatora s nominalnim omjerom prenošenja 20A/5A, no koji stvarno griješi 1% uz određene pogonske prilike, tako da 20 A prenosi sa 4,95 A. Ako bi se sada primarna struja izmjerila ampermetrom tolerancije 0,5% u seriji s primarnim namotajem, ampermetar bi mogao pokazati sve vrijednosti od 19,9 A do 20,1 A. Ampermetar na sekundarnoj strani neka mjeri struju 4,95 sa 0,2% tolerancije, t. j. iznosi koje bi on mogao pokazati neka se kreću od 4,94 A do 4,96 A. Kao ekstremne iznose, između kojih omjer primarne i sekundarne struje može ležati, trebalo bi dakle smatrati $19,9/4,96 = 4,01$ i $20,1/4,94 = 4,07$, a ovi se razlikuju za 0,25% i za 1,75% od nominalnoga omjera prenošenja $20/5 = 4,00$. Drugim riječima za faktičku pogriješku prenošenja od 1% bilo bi i uz upotrebljene vrlo dobre instrumente nesigurno, koji iznos između 0,25% i 1,75% ona stvarno ima!

21. Zbog navedenih razloga upotrebljavaju se za istraživanje pogriješaka mjernih transformatora naročite naprave kojima je moguće dostići dovoljnu točnost. Po svome principu te se naprave mogu klasificirati: a) u one po »apsolutnim« metoda, kod kojih se pogriješke mjere s pomoću preciznih radnih otpora, kapaciteta i sl., i b) one kod kojih se ispitivani mjerni transformator uspoređuje s vanredno preciznim, t. zv. »normalnim«, kome su pogriješke ispitivanjem apsolutnom metodom pronađene kao zanemarive (ili se uzmu kao poznate u račun). Razumije se da s druge strane treba razlikovati i ispitne naprave za naponske mjerne transformatore od onih za strujne.

Ima vrlo mnogo tipova naprava za ispitivanje mjernih transformatora i neprestano se donose nove u mjernu tehniku. Na ovom mjestu može biti samo od interesa, da se na primjerima ilustrira kako se ovakvim napravama, većinom uz primjenu metode kompenzacije kod izmjenične struje, postizava cilj.

22. Od apsolutnih postupaka uzmimo kao primjer spojeve po Scheringu i Albertiu za strujne i naponske mjerne transformatore, prikazane u sl. 237. i 238. u najbitnijim linijama. Tu se primjenjuje postupak kompenzacije s proizvođenjem pomaka faza po već u F-14. opisanoj metodi s kondenzatorom.

Po shemi za strujne mjerne transformatore u sl. 237. izmjenična struja, regulirana na željeni iznos I_1 , koji pokazuje ampermetar A_1 , pušta se osim kroz primarni namotaj $K-L$ ispitivana transformatora još i kroz neki čisti radni otpor neznatnoga iznosa R' , dok sekundarna struja, efektivnoga iznosa I_2 , ide redom kroz povoljni na $k-l$ priključeni »teret« (v. u sl. 237. ampermetar A i strujni svitak vatmetra W), u komu međutim mora biti sadržan i neki čisti radni otpor neznatnoga iznosa R'' .

Odnos otpora R' i R'' neka je tako odabran da kraj predviđenoga nominalnoga omjera prenošenja primarne i sekundarne struje, na pr. $u = 200A/5A = 40$, od gubitaka napona $I_1 R'$ i $I_2 R''$ ovaj posljednji bude dosta znatno manji. Uz supoziciju da nema nikakve kutne pogriješke između primarne i sekundarne struje mjernoga transformatora, postoji onda mogućnost da se napon $I_2 R''$ kompenzira jednim dijelom napona $I_1 R'$.

U tu svrhu potrebno bi bilo dodati kao granu paralelnu otporu R' neki čisti radni otpor $R_1 + R_2$ od vrlo mnogo Ω , tako da kraj neznatnoga R' struja I kroz $R_1 + R_2$ bude neznatni dio od I_1 , odnosno da struja kroz R' praktički ostane I_1 , pa praktički vrijedi relacija: $I : I_1 = R' : (R_1 + R_2)$, iz koje se I može izraziti sa I_1 . Udešavajući sada na dijelu R_1 grane sa $R_1 + R_2$ postepeno sve finije iznos R uz koji vrijedi jednadžba:

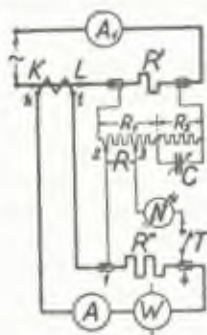
$$I_2 R'' = IR = I_1 R R' / (R_1 + R_2) \quad (I)$$

postigla bi se konačno, u kompenzacionom spoju 1-2-3-N-T-4-1

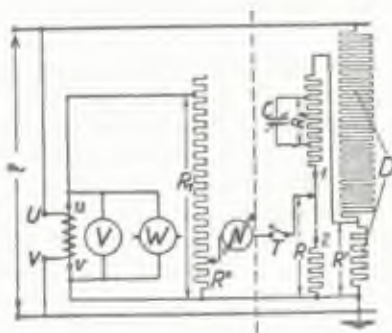
po sl. 237. s nul-instrumentom N (vibracioni galvanometar s uključenim regulatorom osjetljivosti) i s tipkom T , željena kompenzacija napona $I_1 R''$ kod posve izvjesnoga iznosa R .

Taj iznos R određen je međutim po (I) osim sa R' , R'' i $R_1 + R_2$ samo još kvocijentom $I_1/I_2 = u$, dakle *faktičkim* omjerom prenošenja struja I_1 i I_2 [jer se u (I) može I_1 zamijeniti sa $u \cdot I_2$, pa I_2 ispada skraćivanjem i ostaje samo u]. Specijalno *nominalnom* omjeru prenošenja u odgovara posve određeni R , i postizavanje kompenzacije kod iznosa R više ili manje različitih od onoga koji odgovara nominalnom omjeru prenošenja ukazivalo bi na veću ili manju strujnu pogrješku ispitivanoga transformatora kod odabranih pogonskih prilika. Tu bi pogrješku lako bilo i matematski izraziti.

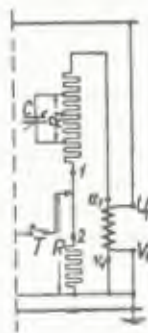
No samim udešavanjem otpora R kompenzacija napona $I_2 R''$ ne će se redovno dati postići, jer će općenito ispitivani mjerni transformator imati, već prema pogonskim prilikama, veću ili manju kutnu pogrješku. Zato se za potpunu kompenzaciju struja kroz R_1 , a time i napon na R , moraju fazno pomaknuti za maleni iznos δ te kutne pogrješke. U tom cilju spoj u sl. 237. nadopunjen je tim da je u grani $R_1 + R_2$ dio R_2 premošten varijabilnim kondenzatorom kapaciteta C (poput onoga iz E-22.), čime se samo neznatno poremeti omjer struja I i I_1 . Time nastaje spoj već razmotren u F-15. i potpuna nula u nul-



Sl. 237.



Sl. 238.



Sl. 239.

instrumentu N postizava se dvostrukim udešavanjem, naime varirajući otpor R i kapacitet C do iznosa potrebnih za potpunu kompenzaciju. Za kutnu pogrješku vrijede pri tomu relacije za $\delta \approx \text{tg} \delta$ desno u (I), odnosno u (II) u F-15., iz kojih δ samo treba preračunati iz lučne mjere u iznos δ^* u kutnim minutama.

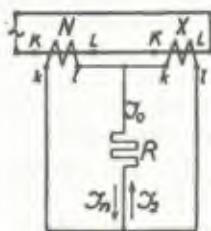
23. Kod spoja u sl. 238. za naponske mjerne transformatore primijenjen je isti princip kompenzacije s udešavanjem faznoga kuta varijabilnim kapacitetom C . Primarni namotaj ispitivanoga

transformatora $U-V$ dobiva nominalni (redovno visoki) primarni napon iz prikladne mreže izmjenične struje, a na sekundarni $u-v$ uz teret u obliku paralelno priključenih povoljnih instrumenata i dr. (voltmetar V i naponska grana vatmetra W u sl. 238.) priključena je i jedna grana u obliku čistoga radnoga otpora R_1 od mnogo Ω (na pr. 10000 Ω kod nominalnoga sekundarnoga napona 100 V). Kao napon koji se ima kompenzirati odvoji se pad napona s jednoga dijela R' toga otpora R_1 . Na isti visoki izmjenični napon, na koji je priključen primarno ispitivani transformator, priključen je međutim također i »djelitelj napona« D u obliku po mogućnosti čistoga radnog otpora od vanredno mnogo oma (t. j. izveden praktički neinduktivno i nekapacitivno, odnosno sa što neznatnijom »vremenskom konstantom«; E-14.). Za mjerenje upotrebi se napon na malom dijelu R' oma djelitelja napona D . Paralelno otporu R' priključena je grana analogna grani paralelnoj otporu R' u sl. 237. Naponu kojim se kompenzira napon na R' varira se iznos udešavajući na kapacitetom nepremoštenomu dijelu te grane veći ili manji iznos otpora R , a fazni kut udešavajući kapacitet C . Veće ili manje odstupanje, očitano na kliznoj žici 1—2, za kompenziranje stvarno potrebnoga iznosa R od onoga koji bi odgovarao nominalnomu omjeru prenošenja ispitivanoga transformatora ukazuje na veću ili manju naponsku pogriješku, a udešenje kapaciteta C pokazuje kutnu pogriješku ispitivanoga transformatora.

24. Kako se visokonaponski djelitelj napona D dade razmjerno vrlo teško izvesti u obliku praktički doista čistoga radnoga otpora, u praksi je obično umjesto opisane apsolutne metode za naponske mjerne transformatore prikladnija metoda gdje se smanjenje primarnoga napona ne postizava djeliteljem napona D , nego transformiranjem naročito preciznim »normalnim« naponskim mjernim transformatorom s namotajima U_1-V_1 i u_1-v_1 . Tom se promjenom desni dio sheme u sl. 238. (desno od crtkane linije) preobražava onako kako je naznačeno u sl. 239. Novi spoj može odmah poslužiti kao primjer metode za ispitivanje naponskih mjernih transformatora usporedbom s »normalnim«.

25. Od novijih prenosivih naprava s uspoređivanjem s normalnim mjernim transformatorom spomenimo onu po Hohleu za strujne mjerne transformatore. U principu se tu, uz istu struju poslanu po shemi u sl. 240. redom kroz primarne namotaje normalnoga transformatora N i ispitivanoga X istoga omjera prenošenja, puštaju upotrebom spoja kao u sl. 240. u suprotnom smislu kroz neki neznatni radni otpor R sekundarne struje I_n i I_x obih transformatora N i X , pa se iskorišćuje za kompenzaciju gubitak napona u R proizveden »diferencijskom« strujom

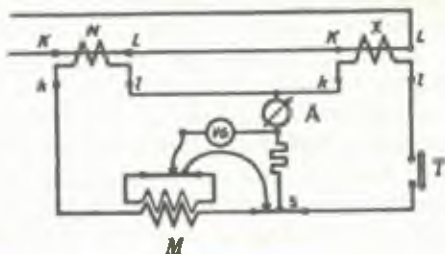
$\mathcal{I}_0$, t. j. geometrijskom diferencijom struja $\mathcal{I}_0$ i $\mathcal{I}_1$. Uz pretpostavku da normalni transformator N prenosi idealno, t. j. bez strujne i kutne pogreške, struja $\mathcal{I}_0$ bit će međutim identična sa »na sekundarno« (dijeljenjem s nominalnim omjerom prenošenja) reduciranom primarnom strujom $\mathcal{I}_1$. To znači da će se struja $\mathcal{I}_0$ moći shvatiti kao diferencija od $\mathcal{I}_2$ i $\mathcal{I}_1$, a njezino postojanje kao znak pogrešaka prenošenja struje $\mathcal{I}_1$, dakle u zadnjoj liniji pogrešaka ispitivanoga transformatora X, strujne $p\%$ i kutne δ' . Čak se, po prikazu u sl. 241. odnosa između $\mathcal{I}_1$, $\mathcal{I}_2$ i $\mathcal{I}_0$, ove pogreške mogu pojedinačno predočiti. Projekcije naime OM i ON ($\approx ON'$) vektora $\mathcal{I}_0$ u smjer $\mathcal{I}_1$ (koji je približno i smjer od $\mathcal{I}_2$), odnosno *okomito* na taj smjer, očito su vrlo približno proporcionalne malim procentnim razlikama iznosa I_2 i I_1 vektora $\mathcal{I}_2$ i $\mathcal{I}_1$, odnosno malim kutevima δ tih vektora, i u prikladnim mjerilima mogli bi OM i ON upravo predočivati $p\%$ i δ' .



Sl. 240.



Sl. 241.



Sl. 242.

Na temelju toga kompenzacija napona proizvedenoga strujom $\mathcal{I}_0$ na otporu R iz sl. 240. vrši se kod Hohleove naprave po shemi u sl. 242. (izvedba: H&B) po metodi b) »kompleksne« kompenzacije u F-13. s pomoću dva projekcijama OM i ON korespondentna, fazno za 90° pomaknuta napona iznosa E_1 i E_2 . Iznos E_1 udešava se na kliznoj žici s , protjecanoj sekundarnom strujom (onom iz transformatora N ili onom iz transformatora X, već prema predznaku od $p\%$), a napon E_2 na kliznoj žici protjecanoj strujom induciranom posredstvom prikladnoga međusobnoga induktiviteta M (transformatora bez željezne jezgre), tako da se može smatrati da je prvi od oba udešena napona istofazan sa strujom $\mathcal{I}_1$, a drugi za 90° fazno pomaknut prema njoj. E_1 i E_2 se variraju dok nulinstrument (vibracioni galvanometar VG) ne pokaže nulu. Kliznoj žici s može se odmah pridružiti skala s iznosima $p\%$, a onoj drugoj skala s iznosima δ' .

Kod T se može ispitivanomu transformatoru priključiti povoljan teret. A je kontrolni ampermešar (koji pokaže dvostruku sekundarnu struju u slučaju da se sekundarni namotaji od N i X

krivo jedan prema drugom priključe, tako da kroz otpor R iz sl. 240. teče geometrijska suma, a ne diferencija struja I_1 i I_2).

Aparatura Hohlea daje se prikladnom nadopunom proširiti i u spoj za određivanje pogrješaka na ponskih mjernih transformatora. A može se upotrebiti i kod spojeva za određivanje (omskoga iznosa i faznoga kuta) »tereta«.

H) IZ VISOKONAPONSKE MJERNE TEHNIKE

I. NAPRAVE ZA VISOKONAPONSKA ISPITIVANJA

1. U vezi s upotrebom sve viših napona u elektrotehnici postepeno se sve jače osjećala potreba da se razrade u jednu ruku postupci mjerenja prikladni za primjenu kod visokih napona, a u drugu ruku metode i propisi ispitivanja, obzirom na pogonsku sigurnost i čvrstoću izolacije, naprava upotrebljivanih u visokonaponskim postrojenjima. Nastalo je tako zasebno područje visokonaponske mjerne tehnike, vrlo opširno i djelomično još danas u živahnom previranju, tako da unutar opsega ovoga djela može biti samo vrlo sumarno obrađeno¹).

Neka mjerenja važna i kod visokih napona (na pr. određivanja kuta dielektričkih gubitaka, mjerenja kapaciteta, mjerenja izolacionoga otpora i mjerenja dielektričke konstante, zatim mjerenja u visokonaponskim postrojenjima naponā, struja itd. posredstvom naponskih i strujnih mjernih transformatora, pa mjerenja napona iskorišćivanjem elektrostatskih sila u elektrometarskim napravama, i različita druga) mogu se smatrati obrađena u vezi s pripadnim već uzetim temama, jer se principno odnosne metode mjerenja mogu primijeniti, uz nužne mjere opreza, više ili manje i kod najviših danas upotrebljivanih napona.

Bit će tako dovoljno ako se na ovom mjestu još doda nešto o napravama koje služe specijalno za visokonaponska ispitivanja čvrstoće izolacije električkih izolatora, kabela, strojeva, transformatora, kondenzatora, mjernih naprava itd., više ili manje stroga, već prema predviđenomu pogonskom naponu, te ako se uzme jedan primjer određivanja električke čvrstoće izolacionih tvari; s tim u vezi bit će prilike da se govori i o nekim

¹ Više na pr. u mnogobrojnim člancima o visokonaponskim mjerenjima i ispitivanjima u ATM, ili u otsjeku (preko 60 stranica) »Hochspannungsmessungen« u Brion-Vleweg, Starkstrommesstechnik, Berlin 1933, s preko 250 citiranih novijih radova uz teme načete u tekstu; vidi i VDE-propise za različita ispitivanja, osobito one grupā 3 (Isolierstoffe) i 4 (Messung und Prufung), pa propise za kabele u VDE 0255 i slične.

još neuzetim direktnim mjerenjima visokih napona, na primjer s pomoću iskrišta.

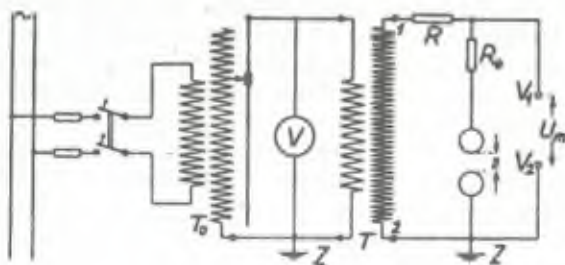
2. U pravilu se kod visokonaponskih ispitivanja nastoje proizvesti naprezanja izolacije doduše znatno pooštrena prema onima u pogonu, ali ipak po vrsti uglavnom sličnoga karaktera kao u pogonu, uzimajući u obzir i izvanredna pogonska stanja kod vrlo kratkotrajnih prenapona, t. zv. »udarnih napona« što nastaju iz različitih uzroka u visokonaponskim mrežama. Ako se pak katkad iz praktičkih obzira ispituje i s naponima drugoga tipa nego odgovara pogonskim prilikama, pa se recimo ispitivanja već položenih kabela za izmjenične pogonske napone vrše istosmjernim naponima, ili ispitivanja izolatora za uzdušne vodove visokofrekventnim naponima, pazi se da ispitivanje bude primijenjeno dovoljno kritično, tako da dopušta zaključak na vladanje ispitivane naprave u pogonu, odnosno da se smetnje koje bi mogle nastati u pogonu bolje manifestiraju.

Tako ima visokonaponskih ispitivanja: a) izmjeničnim naponima niske pogonske frekvencije (normalno 50 Hz u Evropi), b) istosmjernim naponima, c) udarnim naponima (Stossspannungen, surges), d) visokofrekventnim naponima (grupama pri-
gušenih naponskih titraja).

3. Od ovih daleko najobičnija jesu ispitivanja pod a). Potrebni izmjenični naponi, često vanredno visoki, crpu se na sekundarnim stezaljkama visokonaponskoga »ispitnoga transformatora« (T u sl. 243.) s vanredno jakom izolacijom¹). No kako se u pravilu kod ispitivanja postavlja zahtjev da se ispitni visoki napon primjenjuje postepenim povišivanjem do predviđenoga konačnog iznosa, spomenuti ispitni transformator redovno se ne priključuje na mrežu neposredno, nego preko naprave s pomoću koje se primarni, a s njime i sekundarni napon ispitnoga transformatora može varirati. To može biti na pr. »regulacioni transformator« kao T₀ u sl. 243. (s varijabilnim brojem zavoja sekundarno, ili s mnogo odvojaka sekundarno, ili konačno u izvedbi kao t. zv. »zakretni transformator«). A može se ispitivani transformator primarno hraniti iz posebnoga generatora izmjenične struje (alternatora), tjeranoga motorom, u kome slučaju za reguliranje napona ispitnoga transformatora dostaje da se varira istosmjerna »struja uzbuđenja« magnetâ alternatora. I reguliranje otporima može se kod malih visokonaponskih naprava iskoristiti za udešavanje primarnoga napona ispitnoga transformatora. Osim toga se zavoji obih namotaja ispitnoga transformatora mogu porazdjeliti u grupe koje se dadu spajati paralelno ili u seriju, čime se po potrebi također dobivaju viši ili niži naponi.

¹ Kod ekstremno visokih napona može biti ekonomičnije upotrebiti »kaskadni spoj« od dva ili više transformatora (po Dessaueru); v. na pr. Elektrotechn. Z. (ETZ), 1924, str. 177 do 180.

4. Osim osigurača, automatske rasklopke (sl. 243.), te drugih sigurnosnih mjera, ispitna naprava mora još imati i uređaj za mjerenje *iznosa* ispitnoga napona. I to *tjemenoga* iznosa, jer kod ispitivanja na čvrstoću izolacije odlučni su najviši (maksimalni ili tjemeni) iznosi primijenjenoga napona, budući da u momentima kad oni djeluju dielektrikum mora da izdrži najveća električka naprezanja. U prvi mah moglo bi se pomisliti da će u tu svrhu, kod poznatoga omjera $k = w_2/w_1$, brojeva sekundarnih i primarnih zavoja ispitnoga transformatora, biti dovoljno mjeriti voltmetrom, spojenim kao V u sl. 243., efektivni primarni napon U_1 ispitnoga transformatora, pa iz njega množenjem sa k zaključiti na efektivni sekundarni U_2 , a množenjem ovoga posljednjega s »tjemenim faktorom« za sinusoidne veličine $\sqrt{2}$ (E-3.) konačno na maksimalni ili tjemeni iznos U_m ispitnoga napona, tako da bi u zadnjoj liniji iznosi očitani na V pomnoženi određenom konstantom predstavljali U_m . No stvarno će ovakvo zaključivanje iz podataka voltmetra V na iznos U_m biti samo grubo ispravno, jer kod obično jakoga magnetskoga »rasipanja« transformatora T i velikih kapacitivnih tereta što ih često pretstavljaju ispitivani objekti, na pr. dugački komadi visokonaponskih kabela, relacija (I) iz G-13. može vrlo netočno vrijediti (kod priključenih velikih kapaciteta može računanje U_2 po (I) u G-13. voditi na prevelike iznose. A i za prelaz od U_1 na U_m faktor $\sqrt{2}$ može odgovarati samo netočno zbog često znatno izobličenih krivulja napona uz opterećenja kakva dolaze kod visokonaponskih ispitivanja.



Sl. 243.



Sl. 244.

5. Ne preostaje dakle nego da se U_m mjeri neposredno. Tu je najvažnija metoda mjerenja U_m s pomoću *iskrišta* između (jednakih) kugala. Osnov joj je činjenica da razmak s dviju kugala (sl. 244.) kod koga nastupa električki proboj uzduha atmosfere gustoće u obliku električke iskre ovisi, osim o promjeru kugala D i nekim nuzgrednim faktorima (barometrički pritisak b mm stupca Hg, temperatura t° C) koji se mogu uzeti u račun, o *tjemenoj* vrijednosti U_m primijenjenoga napona.

Međutim za iznose na bazi Peekove formule kakvi su preuzeti u stilizaciju iz g. 1926. pravila VDE 0430, koja je momentano još na snazi, našlo se da odstupaju mjestimično prilično znatno od pravih iznosa, kako slijede iz pouzdanih metoda, pa su već dulje vremena u toku radovi¹⁾ da se fiksiraju točnije tabele iznosa U_m , odnosno U , koje će biti uzete u obzir u pravilima VDE i IEC (B-56.). Ova posljednja predviđaju kao normirane promjere kugala: 20; 62,5; 125; 250; 500; 750; 1000 mm. Krivulje u sl. 245. crtane su na bazi baš nedavno (u lipnju 1938.) prethodno prihvaćenih IEC-vrijednosti. Izvučene linije vrijede za iskrišta s jednom kuglom spojenom sa zemljom za naznačene različite promjere D , a crtkane daju iznose U_m u ovisnosti od probojnih razmaka s za iskrište s obje izolirane kugle promjera $D = 2000$ mm, odnosno 1500 mm.

Pored iskrišta s kuglama upotrebljavaju se, naročito u Americi, i iskrišta između oštih šiljaka (realizirana iglama za šivanje). Iskrišta sa šiljcima mnogo su manje pouzdana od onih s kuglama, ali pružaju prednost da ih je lako improvizirati. Ona daju nekoliko puta dulje probojne razmake s . Na pr. daljina $s = 90$ mm postizava se već kod $U = 50$ kV (U_m oko 70 kV) između šiljaka »novih dvostruko dugih igala za šivanje br. 00« kod 25° C, 760 mm stupca Hg, te 80% vlage, dok bi uz isti napon proboj između kugala promjera 100 mm po VDE 0430 nastao već kod razmaka s nešto ispod 25 mm. I njemačka pravila VDE 0431/1934 (za mjerenja visokih napona u Röntgen-uređajima) predviđaju upotrebu iskrišta sa šiljcima, i to za iznose U_m iznad 100 kV na bazi približne formule:

$$U_m = 15,4 + 4,74 \cdot s \quad (U_m \text{ u kV, } s \text{ u cm}).$$

7. Za mjerenja tjemenih iznosa U_m osim mjerenja iskrištima ima i drugih metoda. Relativno jednostavna je na pr. ona po shemi u sl. 246. s »kapacitivnim dijeljenjem napona« upotrebom dvaju u seriju spojenih kapaciteta iznosa C (fiksno) i C_1 (varijabilnoga). Paralelno kondenzatoru varijabilnoga kapaciteta priključena je neonska tinjalica N, koja se »zapali« (zasvijetli) kad se kontinuiranim smanjivanjem varijabilnoga kapaciteta tjemeni iznos njezina napona povisi do vrijednosti U_0 . »paljbenoga napona«, posve određenoga za neki određeni egzemplar neonke. Ako se neznatni kapacitet neonke zamisli zanemaren ili već uračunan u iznosu C_1 , može se smatrati da se ukupni (mjereni) napon U_m porazdjelio proporcionalno iznosima kapacitivnih otpora $1/C\omega$ i $1/C_1\omega$, odnosno proporcionalno iznosima $1/C$ i $1/C_1$; t. j. U_m prema U_0 stoji u relaciji:

$$U_m : U_0 = (1/C + 1/C_1) : 1/C_1 = (1 + C_1/C) : 1$$

iz koje odmah slijedi: $U_m = U_0(1 + C_1/C)$, tako da se svakom C_1 može lako naći pripadni U_m .

Mjesto s paljbenim naponom U_0 može se raditi i s »naponom gašenja« (koji je znatno niži od U_0).

¹⁾ Vidi Elektrotechn. Z. (ETZ) 1938, str. 1029 do 1032 i 1064 do 1070.

Ako se dakle radi s kuglama poznatoga promjera D , te ako su poznate vrijednosti b i t koje dopuštaju da se izračuna po formuli $d = 0,386b/(273+t)$ t. zv. relativna gustoća d uzduha, može se iz eksperimentalno određenoga razmaka s zaključiti na tjemenu iznos mjerenoga napona U_m , odnosno na efektivni U sinusoidnoga napona istoga tjemena iznosa U_m . U tu svrhu može se upotrebiti bilo (teorijom i eksperimentima fundirana) formula F. W. Peeka (za 20°C vidi formulu za U u VDE 0430, § 11.), bilo tabela koja veže različite iznose U ili U_m s iznosima s za kugle različitih promjera D (VDE 0430), bilo niz krivulja kao u sl. 245. Utjecaj vlage neznatan je i može se redovno zanemariti kod mjerenja iskrištima s kuglama.

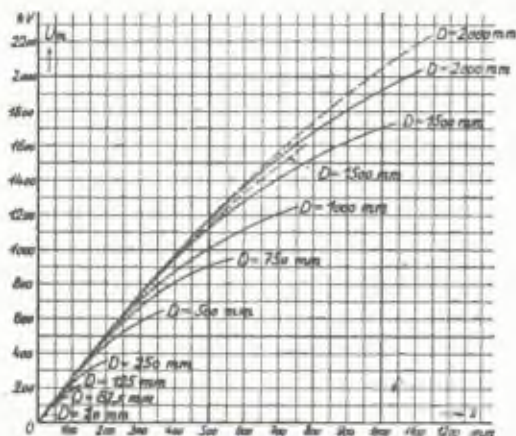
Po sl. 243. zbog sprječavanja prejakih struja u slučaju »proboja« (Durchschlag, puncture) ili »preskoka« (Überschlag, flashover) ispitivanoga objekta struja se ograniči »zaštitnim otporom« R , koji se kod sistema kao u sl. 243. jednopolno spojenih sa zemljom Z stavi u neuzemljeni dovod, a kod obopolno izoliranih »simetričkih« raspoređaja se najednako porazdijeli na oba dovoda (stavi se $R/2$ oma u svaki dovod). Iznos zaštitnoga otpora R može biti 5 do 50 Ω na svaki kV napona U (VDE 0442; § 13.).

Za iskrište s kuglama ograničenje struje može biti znatno jače. Zato se doda još u dovod iskrištu otpor ograničavanja R_0 (sa R_0 u jednom dovodu kao u sl. 243. ili porazdijeljeno u $2 \times R_0/2$ kod simetričkih raspoređaja). Za otpor ograničavanja struje iskrišta s kuglama pravila VDE 0430 predviđaju 0,2 do 1 Ω/V (dakle 200 do 1000 Ω na svaki kV iznosa U).

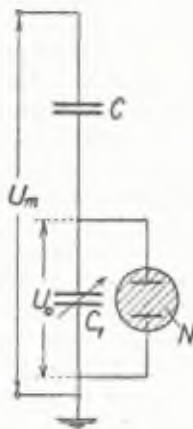
6. Glede samoga mjerenja iskrištem s kuglama treba primjetiti da za što točnije rezultate treba kugle odabrati prema području mjerenja napona. Tako će se za mjerenja iznosa U od relativno malo kV upotrebiti kugle manjih promjera, a kod iznosa U od stotina ili čak tisuća kV sve veće i veće kugle. Na pr. s kuglama promjera $D = 250 \text{ mm}$ dobro bi se mjerili iznosi U_m od kojih 70 do 300 kV (dakle iznosi U od oko 50 do preko 200 kV), pa bi recimo daljini kugala $s = 8 \text{ cm}$ (80 mm) po Tabeli I) u VDE 0430 odgovarali naponi U_m 206,3 i 208,8 kV (prema iznosima $U = 146,0$, odn. $U = 147,8 \text{ kV}$), već prema tomu da li je jedna kugla spojena sa zemljom ili su obje izolirane (uz uzemljenu sredinu visokonaponskoga namotaja transformatora). Naprotiv iznosi U_m oko 700 kV (iznosi U oko 500 kV) mjerili bi se dobro kuglama promjera oko 1 m, pa bi na pr. probojnom razmaku 30 cm takvih kugala odgovarao iznos $U_m = 732 \text{ kV} = 0,732 \text{ MV}$, odnosno $U = 518 \text{ kV} = 0,518 \text{ MV}$ (kod jedne kugle spojene sa zemljom). Najbolje je ako s/D ne prekoračuje iznos 0,5.

¹⁾ Za uzduh pod »normalnim« prilikama ($b = 760$ »tor« ili »mm stupca Hg«; $t = 20^\circ \text{C}$) gustoća d ima iznos $0,386 \cdot 760 / (273 + 20) = 1$.

Isto kapacitivno dijeljenje napona može se primijeniti i kod mjerenja efektivnih iznosa U visokih napona. Ako se naime u sl. 246. neonka zamijeni elektrostatskim voltmetrom, koji mjeri efektivni iznos U_1 , iznosi U mjenoga napona slijede iz relacije: $U = U_1 \cdot (1 + C_1/C)$, u kojoj C , znači sumu kapaciteta varijabilnoga kondenzatora i elektrostatskoga voltmetra.



Sl. 245.



Sl. 246.

Aparata koji direktno pokazuju vrlo visoke napone, a osnivaju se na elektrostatskim silama, ima cio niz. Spomenimo samo visokonaponske voltmetre po Abrahamu i Villardu, odnosno po Starkeu i Schröderu, te napravu po Hueteru koja se može dodati iskrištu s kuglama. U bitnosti ove sprave mjere efektivne iznose U (na tjemene U_m dolazi se samo posredno množenjem s tjemnim faktorom); elektrostatske sile izvode kod njih mehanička djelovanja na prikladno odabrane elastično pomične sisteme, kojih se pomaci kod voltmetra po Abrahamu i Villardu direktno prenose na materijalno kazalo, a kod ostala dva se učine vidljivi metodom zrcalnoga očitavanja (B-8.). Poblize: Arch. Elektrotechn. 23 (1929), str. 258 do 260; 20 (1928), str. 115 do 122; Elektrotechn. Z. (ETZ) 1934, str. 833 do 835; 1935, str. 1319/1320; ATM J 762-1.

8. Za proizvođenje istosmjernih visokih napona dovoljno bi bilo nadovezati na stezaljke 1—2 u sl. 243., uklonivši ono što je desno od 1—2 u toj slici priključeno, prikladni ispravljački uređaj po shemama u sl. 25. ili 26. iz B-37., pri čemu bi visoki napon proizveden na stezaljkama ispitnoga transformatora bio ispravljen u prvom slučaju »poluvalno«, a u drugom »punovalno« (B-37.). U obje sheme treba M zamisliti nadomješteno objektom koji se ispituje visokim istosmjernim naponom.

Sami ispravljači (A u sl. 25., odn. A_1 do A_4 u sl. 26.) mogli bi principno biti ma kakvi, uz uvjet da su kadri zadržavati

prolaz struje još kod najviših napona koji na njih djeluju u smjeru protivnom od njihova smjera propuštanja.

Tomu uvjetu moglo bi se udovoljiti suhim ispravljačima sastavljenima od vanredno mnogo u seriju spojenih kombinacija $\text{Cu}-\text{Cu}_2\text{O}-\text{Pb}$ iz B-37. (od kojih svaka pojedina može izdržati samo napone do najviše nekoliko V), pa se u novije vrijeme doista izvode po ovom principu naprave za proizvođenje istosmjernih napona do mnogo kV (za visokonaponska ispitivanja, za pogon Röntgen cijevi i sl.).

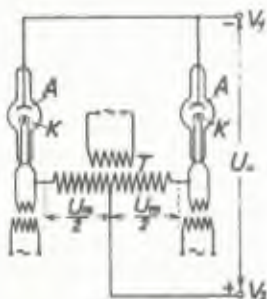
Ipak se obično kao ispravljači u ovakvim napravama upotrebljavaju vanredno visoko evakuirane »ispravljačke cijevi«, t. zv. »kenotroni«, s dvije elektrode: s »vrućom« (strujom grijanom) katodom K i hladnom anodom A (sl. 247.). Malim ovakvim ispravljačkim cijevima proizvode se, kako je poznato, u prijemnicima radija s priključkom na rasvjetnu mrežu istosmjerne anodne struje, potrebne za pogon ostalih cijevi u aparatu (v. i cijev RGN 354 u sl. 146. na str. 146.). Njihovo ispravljačko djelovanje osniva se na činjenici da struju u ovakvoj cijevi prenose samo elektroni što izlaze iz usjane katode K i idu na anodu A. Prema tomu u ovakvim cijevima struja može teći samo u smjeru A—K (jer se pod »smjerom« električke struje uvijek razumijeva smjer protivan onomu kojim električko polje tjera negativne električke čestice: elektrone); naprotiv prolazu struje u smjeru K—A ispravljačka cijev suprotstavlja potpunu zapreku, dok god iznos napona primijenjenoga između K i A ne prelazi neki granični iznos, iznos »zapornoga napona« upotrebjene cijevi.

9. Ispravljačke cijevi za visokonaponske ispitne naprave, Röntgen i sl., nazivane i »visokonaponski ventili«, moraju naravno biti naročito građene za vanredno visoke zaporne napone (i cijena im je prema tomu visoka). S ovakvim visokonaponskim ventilima, stavljenima umjesto A u sl. 25. ili umjesto A_1 do A_4 u sl. 26., lako bi se već spomenutim priključkom na visokonaponski transformator T iz sl. 243. realizirali poluvalno ili punovalno ispravljeni visoki ispitni naponi.

Međutim punovalno ispravljanje, odnosno po potrebi još i podvostručenje napona, može se postići i sa samo dva visokonaponska ventila, odnosno s dva visokonaponska ventila i dva visokonaponska kondenzatora, ako se upotrebe sheme u sl. 247. i 248.

Kod spoja po sl. 247. kod kojega, kako se vidi, visokonaponski namotaj ispitnoga transformatora T mora imati odvojak u sredini, maksimalni iznos dobivenoga istosmjernoga napona (koji pulzira) u bitnosti je jednak polovici tjemennoga iznosa U_m (odnosno 0,7-kratniku efektivnoga iznosa U) izmjeničnoga napona proizvedenoga transformatorom T.

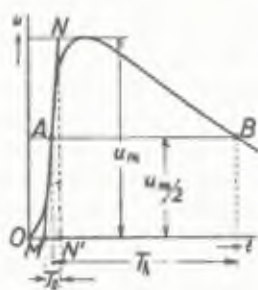
Naprotiv kod spoja po sl. 248. (Liebenow-Greinacher-Delon) naponi čias preko ventila trajno nabijanih, čias opet izbijanih kondenzatora C_1 i C_2 pribrajaју se, u momentima izbijanja, naponu transformatora T, tako da uglavnom rezultira ispravljeni napon maksimalnoga iznosa $2 \times U_m$, dakle grubo zaokruženo iznosa $3 \times U$.



Sl. 247.



Sl. 248.



Sl. 249.

Ima još i drugih spojeva s visokonaponskim ventilima za jedno-fazni priključak (Villard, Witka) i trofazni (sa 3 i sa 6 ventilnih cijevi); no ti se manje susreću u ispitnim napravama. Prije su se mnogo upotrebljavale (pa i danas se još upotrebljavaju) i mehaničke ispravljačke naprave, t. zv. mehanički ispravljači, koji svojim gibanjem sinhrono s ritmom izmjeničnoga napona transformatora T izvode prekapčanja spoja ispitnoga transformatora s ispitivanim objektom, tako da na ovaj posljednji djeluju samo ispravljeni naponi.

Za mjerenja (maksimalnih iznosa) istosmjernih napona proizvedenih različitim ispitnim napravama s ispravljačima mogu i opet poslužiti iskrišta s kuglama.

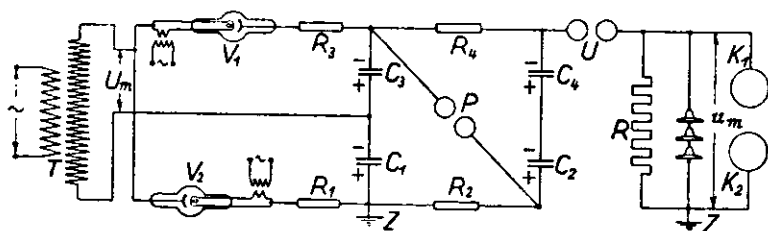
Neka još bude spomenuto da za dobivanje ekstremno visokih istosmjernih napona, sve do više MV, stoje na raspolaganju naročiti »elektrostatski generatori« po Van de Graaffu (i dr.); v. Physic. Rev. 43 (1933) i 51 (1937).

10. Kod proizvodjenja *udarnih napona* osnovni je princip da se relativno polagano iz visokonaponskoga izvora struje nabije neki kondenzator, ili običnije baterija od više kondenzatora, pa da se energija nakrcana kod ovoga nabijanja iskoristi za vrlo brzo izbijanje (na pr. kroz mjerno iskrište i sl.). Naponski »udarni val«, koji se kod toga na iskrištu, ispitivanomu izolatoru itd. stvori, naraste pri tomu vanredno brzo, na pr. u dijelu »mikrosekunde« ($1 \mu s = 10^{-6} s$), do nekoga maksimalnoga ili tjemena iznosa u_m ; zatim napon u znatno polaganije opada, kako odgovara izbijanju kondenzatora. Krivulja napona u u ovisnosti od vremena t ima pri tomu oblik kao u sl. 249.; ona

ima strmo »čelo« (uzlazni dio) i mnogo manje strma »leda« (silazni dio).

Za karakteriziranje nekoga naponskoga udara upotrebljavaju se (VDE 0450) osim u_m još i vremena T_s i T_h izražena u μs , pri čemu T_h (»vrijeme polovice iznosa«) znači interval vremena kad iznos momentanoga napona u leži *iznad* $u_m/2$, dok je T_s (»trajanje čela«) definirano razlikom MN' apscisâ OM i ON' sjecišta M i N tangente u točki A čela (ordinate $u = u_m/2$) s osi apscisa i s paralelom s osi apscisa u visini $NN' = u_m$. »Normirani« na pr. udarni val po VDE 0450 jest onaj sa $T_s = 0,5 \mu s$ i $T_h = 50 \mu s$. Drugdje (IEC) se T_s i T_h drukčije definiraju.

Kako se kod ispitivanja udarnim naponima zapravo imaju imitirati relativno vrlo visoki i vrlo kratkotrajni »prenaponi« u visokonaponskim postrojenjima, na pr. oni proizvedeni električkim ispražnjivanjima u atmosferi, koji izazovu na pr. na izolatorima »preskok«, no ne dovedu do »proboja«, to udarni ispitni naponi moraju često biti vrlo visoki. Usprkos toga ispitni transformatori mogu biti izvedeni samo za umjereno visoke napone, ako se upotrebe »udarni spojevi« (po Marxu) s više kondenzatora, otpora, te pomoćnih ili paljbenih iskrišta, spojenih tako da nastaju umnogostručivanja napona.



Sl. 250.

Kod tih spojeva može se raditi s jednom ventilnom cijevi i s dvije. U posljednjem slučaju broj pomoćnih iskrišta opada za više nego polovicu. Tako se spojem s dvije ventilne cijevi i jednim »pomoćnim« (»paljbenim«) iskrištem P u sl. 250. sa 4 visokonaponska kondenzatora C_1 do C_4 nabijana preko 4 otpora (od vanredno mnogo oma) R_1 do R_4 može proizvesti udarni napon iznosa u_m okruglo četiri puta tolikoga, koliki je tjemeni iznos U_m sekundarnoga napona ispitnoga transformatora T . Spoj je naime ventila V_1 i V_2 u sl. 250. takav da se preko otpora R_1 do R_4 kondenzatori C_1 do C_4 relativno polagano sve više nabijaju s polaritetima naznačenima u slici. A kad su dovoljno nabijeni, nastaje proboj iskrišta P i time spajanje u seriju svih četiriju kondenzatora po shemi $C_1-C_3-P-C_2-C_4$, tako da preko (takoder probijenoga) »uklopnoga« iskrišta U dobiveni

novije vrijeme i u IEC-propisima. Evo za ilustraciju nekoliko primjera postupanja kod visokonaponskih ispitivanja.

Kod jednostavnih ispitivanja čvrstoće izolacije po propisima VDE dovoljne su jednostavne naprave za izmjenični napon od 50 Hz s ispitnim transformatorima za malo kV, dimenzioniranim za prividne učine koji ne moraju prelaziti 0,5 kVA. Ispitivanje se u tim slučajevima sastoji obično u tomu da se ispitivana izolacija podvrgne naprezanju ispitnim naponom određenoga efektivnoga iznosa U kroz vrijeme od 1 minute (po VDE 0442 1933, § 18., ima se početi s najviše 50% ispitnoga napona i upotrebiti za postepeno povećavanje do punoga iznosa ispitnoga napona vrijeme od bar 10 sekundi; trajanje ispitivanja računa se od momenta postignutoga punoga napona).

Ovako s transformatorom od samo 0,5 kVA ispitivala bi se na pr. izolacija između mjernoga sistema i kućišta električkih brojila, i to po VDE 0418/1932 sa 1 kV ispitnoga napona kod istosmjernih brojila, a sa 2 kV kod izmjeničnih (jednofaznih i trofaznih) brojila. Slično se jednostavno ispituju na izolaciju po pripadnim propisima mjerni instrumenti, naprave s malim motorima, itd. Kod transformatora propisi za ispitivanje izolacije namotaja (VDE 0532/1934, § 46. i d.) već traže napone od 2,5 kV pa na više (te predviđaju još neka druga ispitivanja), dok se za uklopne naprave do 500 V izmjeničnoga napona i 3000 V istosmjernoga traže već ispitni transformatori od 2 kVA i ispitni naponi od 2 do 11 kV (VDE 0660/1933, § 67.).

13. Još veći ispitni naponi potrebni su kod objekata za više pogonske napone. A kod većih kapaciteta ispitivanih objekata i potrebni prividni učini ispitnih transformatora rastu sve više.

Kao primjer uzmimo ispitivanje visokonaponskih kabela za jaku struju, izoliranih impregniranim papirom i oklopljenih olovom. Po propisima kabeli moraju biti nakon dovršenja podvrgnuti određenom ispitivanju u tvornici izmjeničnim naponom (50 Hz), a nakon polaganja (i prije puštanja u pogon) ponovnom ispitivanju, alternativno s izvjesnim izmjeničnim ili s izvjesnim istosmjernim visokim naponom. Propisima po Tabeli VI u VDE 0255/1934 za trofazni kabel s tri vodiča za linijski napon od E volta zadovoljilo bi se na pr. s tri ispitivanja u tvornici po 10 minuta i s tri ispitivanja nakon polaganja po 20 minuta po ovoj shemi (1, 2, 3 znače vodiče, a Pb olovni oklop kabela):

S h e m a I)

Spoj na V_1 i V_2 u sl. 243., odn. 247.	Ispitivanje u tvornici:		Ispitivanje nakon polaganja:	
	izmjen. nap.	trajanje	istosmj. nap.	trajanje
(1 + 2) : (3 + Pb)	$2E + 1000$ V	10 min	$3E$ V	20 min
(1 + 3) : (2 + Pb)	$2E + 1000$ V	10 min	$3E$ V	20 min
(2 + 3) : (1 + Pb)	$2E + 1000$ V	10 min	$3E$ V	20 min

vanredno visoki udarni napon biva primijenjen na ispitivani objekt i proizvede, ako je dovoljno visok, preskok (na pr. ispitivanoga izolatora) ili proboj »mjernoga« iskrišta s kuglama K_1 i K_2 za mjerenje udarnoga napona u_m . S još više kondenzatorâ, otporâ i iskrištâ mogli bi se, analogno, proizvesti još viši udarni naponi, uz isti iznos U_m napona ispitnoga transformatora T.

Zbog silno nagloga uspona na vrijednost u_m i odmah iza toga nagloga opadanja k nuli iznosa u udarnoga napona moraju se iznosi U_m navedeni za izmjenične napone od 50 Hz kod iskrišta s kuglama (ponešto korigirati da bi se dobio ispravan iznos u_m udarnoga napona¹). Slično i iznosi u_m kod kojih nastaju na pr. preskoci izolatora ne odgovaraju iznosima U_m napona od 50 Hz potrebnima za preskok; iznosi u_m su, već prema T_s i T_h , »polaritetu« impulsa (+ ili — prema zemlji) i drugim okolnostima, viši na pr. za 20 do 50% kod ispitivanja »obješenih izolatora«. Iznosom otpora R, paralelnoga ispitivanomu objektu, može se udešavati »vrijeme polovice iznosa« T_h proizvedenoga udarnoga napona. Slično ima sredstava da se udesi i »trajanje čela« T_s .

11. Za visokofrekventna ispitivanja upotrebljavaju se redovno naprave za proizvođenje prigušenih visokofrekventnih titraja građene po poznatim principima radiotehnike: visokonaponski ispitni transformator, primarno priključen na 50 Hz, premošten je sekundarno iskrišten s brzim gašenjem iskara. Svake polovice periode kroz iskrište preskoči iskra, koja uzbuđi na niz prigušenih titraja visokofrekventni »titrajni krug« nadovezan na iskrište. Frekvencija tih titraja dana je relacijom (I) iz E-29. Proizvedeni visokofrekventni titraji dalje se transformiraju na vanredno visoki napon s pomoću t. zv. Teslina transformatora, i tako transformirani primjenjuju se na ispitivani objekt, na pr. porculanski izolator.

Obično se ispituje s frekvencijama od 30 do 100 kHz. Kod tih visokih frekvencija nastaju jaki dielektrički gubici, a prema tomu i ugrijavanja, pa kod postojanja eventualnih slabih mjesta lakše dolazi do proboja.

II. O IZVOĐENJU VISOKONAPONSKIH ISPITIVANJA

12. Kod praktičkoga izvođenja visokonaponskih ispitivanja dolazi do izražaja toliko različitih utjecaja da je neku jedinstvenost, odnosno mogućnost uspoređivanja rezultata dobivenih kod različitih ispitivanja, bilo moguće postići samo točnim specifikacijama načina postupanja kod pojedinih ispitivanja. Te specifikacije mogu se, u društvu s propisima za ostala ispitivanja, naći na pripadnim vrlo brojnim mjestima u knjizi VDE-propisa, kao i u britskim, američkim, francuskim itd. propisima, a u

¹ Roth, Hochspannungstechnik, II. izd., Wien 1938, str. 372.

14. Praktički ispitivanja u tvornici kraj redovno velikih fabrikacionih duljina kabela, koje znadu iznositi na pr. mnogo stotina m, zahtijevaju skupocjene visokonaponske naprave. Suponirajući naime da ispitivani komad kabela ima kapacitet C , dakle kapacitivni otpor $1/C\omega$, kod ispitnoga napona $U = 2E + 1000$ volta po E-52. kabel će iz ispitnoga transformatora uzimati struju $I = UC\omega$ ampera, t. j. transformator će morati dati prividni učin $N'' = UI = U^2C\omega$ voltampera. A ako se u ove formule supstituiraju iznosi kakvi dolaze u praksi, izlaze kod iole većih ispitivanih duljina kabela i iole viših pogonskih (i po tomu pogotovo ispitnih) napona iznosi za I od mnogo ampera i za N'' od mnogo hiljada VA, dakle od mnogo kVA. Tako sama narav kabelskih ispitivanja izmjeničnom strujom vodi na ispitne transformatore ne samo visokih napona, nego i velikih prividnih učina.

Primjer: Neka se ispituje trofazni kabel s tri vodiča za pogonski napon 10 kV. Uz dani prerez vodiča, danu izolaciju i danu duljinu ispitivanoga komada neka iziđe za ukupni kapacitet kod ispitivanja iznos $C = 0,318 \mu F = 0,318 \cdot 10^{-6} F$. Uz $\omega = 314$ izlazi onda $C\omega = 0,0001$, pa I i N'' kod propisanoga ispitnoga napona $2 \times 10 + 1 = 21$ kV ($= 21000$ V) poprimaju iznose:

$$I = 21000 \cdot 0,0001 = 2,1 A \quad N'' = 21000^2 \cdot 0,0001 = 44100 VA = 44,1 kVA$$

15. Ako se i može očekivati da će u tvornicama stajati na raspolaganju naprave velikih prividnih učina za ispitivanja izmjeničnim naponima, ne može se uzeti da će takve naprave biti obično raspoložive na mjestima ispitivanja položenih kabelskih vodova. Kako će se kod ovih često još raditi o znatno većim kapacitetima nego kod ispitivanja u tvornici, jer će se morati na pr. ispitivati položeni kabelski vod sastavljen od nekoliko fabrikacionih duljina, to se kod ispitivanja položenih kabela danas općenito prešlo na upotrebu istosmjernih napona, makar da su — kako je već rečeno — u propisima kao alternativa ispitivanja s istosmjernim naponom iznosa $3E$, desno u shemi I), predviđena i kod položenih kabela ispitivanja izmjeničnim naponom, također u trajanju 3×20 minuta i čak samo s efektivnom vrijednošću u iznosu $1,5E$.

Kod istosmjernoga napona kabelski kapacitet ima prilike da se polagano nabije do punoga napona, a nakon toga naprava za istosmjerni napon mora podržavati samo relativno neznačajnu struju, koju će ipak propuštati izolacija kabela, jer će izolacioni otpor R'' (D-24.) njezina dielektrikuma imati doduše vanredno visoku, ali ipak konačnu vrijednost.

Primjer: Današnji kabeli imaju izolacione otpore na stotine megoma po km duljine. Ako se dakle ispituje 2 km duljine kabela za 10 kV sa $3 \times 10 = 30$ kV istosmjernoga napona, pa ako kabel ima kod toga napona izolacioni otpor po km duljine 200 MΩ,

dakle na cijelu duljinu $100 \text{ M}\Omega = 10^8 \Omega$, struja propuštena od izolacije kabela bila bi $30000/10^8 = 0,0003 \text{ A} = 0,3 \text{ mA}$.

Naprave za visokonaponska ispitivanja istosmjernim naponima mogu prema tomu biti dimenzionirane za relativno malene učine. Ipak se one uzimlju s nešto većim učinima, po nekoliko kVA (da bi se mogle dovesti do izražaja skrivene pogriješke kabela, koje se »isprže«). Pri tomu one još uvijek ostaju prenosive, odnosno prevozive.

I kod traženja »mjesto pogriješke« (D-9.) visokonaponskih kabela vrlo dobro dolaze naprave s ispravljenim visokim naponom s pomoću ventilnih cijevi (kenotrona), jer kod traženja s niskim naponima mogu pogriješke, koje se kod visokih napona odmah pokazuju, ostati neprimjećene (sakrivene), na pr. ako kabelska masa, rastaljena ugrijavanjem zbog pogriješke nastale kod visokoga napona, kod skrućivanja mjesto pogriješke prekrije.

Što se kod visokonaponskih ispitivanja visoki naponi primjenjuju kroz dulje vrijeme, tomu je razlog komplicirani mehanizam električkoga proboja u krutim dielektričkim tvarima, zbog kojega proboj često nastupa tek iza dulje primjene visokoga napona. Općenito, ako neki dani napon proizvede proboj na pr. komada kabela iza recimo 10 minuta, sve viši i viši naponi izvesti će proboje jednakih komada u sve kraćim i kraćim vremenima. Najbolju informaciju o kvaliteti kabela daju međutim po današnjem shvaćanju visokonaponska mjerenja kuta gubitaka, na što je već u E-57. i E-61. bilo upozoreno.

O smislu i načinu primjene ispitivanja udarnim naponima, kao i onih visokofrekventnim prigušenim naponskim titrajima (ove posljednje propisi dosad ne predviđaju), bilo je već govora kod opisivanja pripadnih naprava

16. Kao posljednji primjer uzmimo određivanje električke čvrstoće ulja za transformatore i sklopke. U bitnosti se tu na izolacionu sposobnost ulja zaključuje po električkoj čvrstoći (E-61.) ulja, preračunanoj iz napona kod koga nastupa proboj ulja uz dani razmak elektroda, ili iz razmaka kod koga nastupa proboj uz dani napon. U prvomu se slučaju polagano povećava napon dok ne dođe do proboja, a u drugomu se smanjuje razmak.

Razlike su između pojedinih nacionalnih propisa za ispitivanje ulja najviše u specifikacijama o obliku i dimenzijama elektroda. Tako se na pr. u VDE 0370/1936 kao elektrode propisuju međusobno okrenute bakrene kalote polumjera zakrivljenosti 25 mm; za dovode kalotama zahtijeva se da imaju promjer bar 5 mm; ulja u posudi mora biti barem 250 cm^3 ; itd. Kod mjernoga rasporedaja sa fiksnim razmakom elektroda taj razmak mora iznositi barem 1,5 mm (obično se uzme 3 mm), a kod rasporedaja s varijabilnim razmakom kao stalni napon ispitnoga transformatora uzimlje se $U = 30 \text{ kV}$ efektivne vrijednosti. Iz izmjerena probojnoga napona U u kV, odnosno probojnoga

razmaka s u mm (uzeti sredinu od 6 opažanja), tražena električka čvrstoća u kV/cm dobiva se množeći napon u kV s jednim faktorom, koji se očitava iz propisima dodane krivulje (za iznose s 1,5; 3; 3,5; 4; 5 i 7,5 mm taj faktor ima vrijednosti $F = 6,8; 3,5; 3,0; 2,7; 2,2$ i 1,5).

Primjer: Kod $U = 30$ kV postepenim smanjivanjem razmaka s proizveden je proboj ulja kod razmaka $s = 3,5$ mm. Kako iznosu $s = 3,5$ mm pripada vrijednost $F = 3,0$, to električka čvrstoća istraživanoga ulja iznosi $30 \times 3,0 = 90$ kV/cm. Ova bi vrijednost zadovoljavala kod ulja u pogonu (na pr. uzetoga iz uljnoga transformatora), za koje se traži minimalno 80 kV/cm, no bila bi premalena za svježe za punjenje spremljeno ulje, za koje se traži bar 125 kV/cm. Već vanredno neznatne količine vlage u ulju silno snižuju električku čvrstoću ulja; kod naročito pomno osušenih ulja dađu se postići električke čvrstoće do 300 kV/cm ili slično.

Britski propisi B. S. S. No. 148—1927 zahtijevaju da se radi s kuglama promjera 13 mm, fiksno udaljenima 4 mm.

Bolji podaci o električkim svojstvima ulja dobivaju se uostalom mjereći »kut gubitaka« ulja (v. E-57.).

II O MAGNETSKIM MJERENJIMA

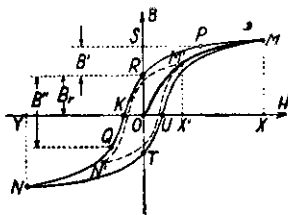
I. METODE S ISTOSMJERNOM STRUJOM

1. Područje mjerenja magnetskih veličina veoma je opsežno; potpuno obrađeno ono bi dalo veliku monografiju. Ovdje će se uzeti samo odabrane, tehnički najvažnije teme. Uglavnom će to biti mjerenja ovisnosti magnetske indukcije B u Vs/cm² odn. u Vs/m² ili T (resp. s EMJ B^* u G) od jakosti magn. polja H u A/cm odn. u A/m (resp. s EMJ H^* u Oe), i mjerenja gubitaka energije kod izmjeničnoga magnetiziranja željeza. Ova posljednja prirodno će se vršiti izmjeničnom strujom, dok za ona prva ima metoda i s istosmjernom i s izmjeničnom strujom; razmotrit ćemo najprije mjerenja s upotrebom istosmjerne struje.

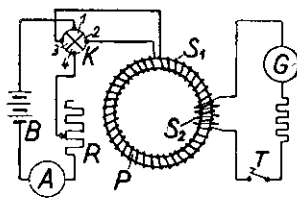
2. Klasična metoda za snimanje krivulje koja predočuje ovisnosti iznosa B (B^*) od iznosa H (H^*) jest »metoda balističkoga galvanometra«. Zapravo se ovom metodom dobivaju, već prema tomu kako se kod mjerenja postupa, bilo a) t. zv. *krivulja histereze* (zatvorena petlja MRKNTUM u sl. 251, sa »silaznim« dijelom MRKN, koji odgovara mijenjanju magnetskoga polja od nekoga maksimuma OX do suprotne vrijednosti (minimuma) OY, te »uzlaznim«, proizvedenim mijenjanjem magnetskoga polja od minimuma OY do maksimuma OX); bilo b) t. zv.

komutaciona krivulja, u elektrotehnici zvana također *krivulja (prvoga) magnetiziranja*¹⁾ (krivulja OM'M u sl. 251., geometrijsko mjesto točaka M', M itd. pojedinih krivulja histereze za različito velike iznose OX', OX itd. maksimalnih magnetskih polja. Praktički po krivulji OM'M raste magnetska indukcija kod magnetiziranja, postepenim povišavanjem jakosti magnetskoga polja od nule prema gore, željeza koje još nije bilo magnetizirano (ili je povraćeno u stanje kao da nikad nije bilo magnetizirano).

3. Jednostavnije je balistički snimiti komutacionu krivulju. U tu svrhu najbolje je probu od istraživanoga željeznoga materijala izraditi u obliku zatvorenoga prstena. U slučaju limova, na pr. za armature električnih strojeva ili za jezgre transformatora, uzeo bi se svežanj od recimo 50 koluta iz istraživanoga lima, s nutarnjim promjerom d_1 na pr. 18 cm i vanjskim d_2 21 cm, tako da bi se za srednji put l magnetskih linija u prstenu moglo staviti $l = (d_1 + d_2)\pi/2$ cm (u konkretnom primjeru okruglo 62 cm).



Sl. 251.



Sl. 252.

Prerez S željeza prstena neka je također određen, na pr. iz debljine i širine prstena; odnosno kod limova iz broja i širine koluta, te debljine željeza u upotrebljenom limu; ili kako drukčije. Tako će kod poznate indukcije B u željezu biti odmah poznat i magn. tok $B \cdot S$ (u V-A-s-cm i V-A-s-m: V_S ; u EMJ: M).

Na ovakav ili sličan prsten P neka su sad namotani, po shemi u sl. 252., svici S_1 i S_2 (»primarni« i »sekundarni«) sa

¹⁾ Zapravo je ispravnije pod krivuljom prvoga magnetiziranja i krivuljom histereze razumijevati, kako se u fizici i čini, krivulje srodne krivuljama OM'M i MRKNTUM iz sl. 251., i poput njih s iznosima (u EMJ) H^* kao apscisama, ali s iznosima »jakosti magnetiziranja« I^* (a ne magnetske indukcije B^*) kao ordinatama. Međutim s jedne strane vrijedi relacija:

$$B^* = H^* + 4\pi I^* \quad (I)$$

a s druge strane u elektrotehnici se magnetiziranja izvode redovno poljima H^* neznatnima (na pr. samo malo Oe) prema B^* (na pr. više hiljada G), tako da se H^* u (I) može zanemariti. Unutar naznačenih ograničenja može dakle kao mjera magnetičnosti poslužiti ne samo I^* , nego i njoj proporcionalna veličina B^* (koja je u elektrotehnici i inače vanredno važna).

w_1 , odn. w_2 zavoja. Da se odredi par vrijednosti B i H (H^*) koordinata na pr. točke M na krivulji $OM'M$ iz sl. 251., ne treba onda nego komutirati (naglo obrnuti) komutatorom K struju poslanu kroz S_1 iz akumulatorske baterije B , prije komutiranja nareguliranu varijabilnim otporom R na iznos I pokazan od ampermetra A i tako odabran da baš izide, po formuli $H = w_1 I / l$ A/cm odnosno A/m ili $H^* = 0,4 \pi w_1 I / Oe$, vrijednost magnetskoga polja u prstenu koja odgovara snimanoj točki M , odnosno njezinoj apscisi OX . Spomenutim obrtanjem struje I promijenit će se magnetska indukcija od vrijednosti $B = XM$ slijedeći krivulju $OPRKQN$ na protivni iznos $-B = YN$, čime će se i magnetski tok kroz prsten promijeniti od vrijednosti $\Phi_1 = B \cdot S$ na $\Phi_2 = -B \cdot S$, dakle ukupno za iznos $\Phi_1 - \Phi_2 = 2 \cdot B \cdot S$. A ova promjena toka može poslužiti za određivanje ordinate $B = XM$ točke M , ako se izmjeri ukupna množina elektricitete Q As koja trenutno prođe kroz balistički galvanometar G konstante C_B (za »aperiodski granični slučaj«; D-52. i dalje), priključen u strujni krug svitka S_2 zajedno s nekim dodanim otporom tolikoga iznosa da izide u k u p n i otpor $R_2 = R_g + R_a$ koliko odgovara aperiodskom graničnom stanju (B-10.) galvanometra G . Za Q vrijedi najme s jedne strane formula: $Q = C_B \cdot \alpha_1$ iz D-51. (pri čemu C_B može biti naznačeno na galvanometru ili određeno na pr. po metodi u D-56.), a s druge strane formula:

$$Q = w_2 (\Phi_1 - \Phi_2) / R_2 = 2BSw_2 / R_2,$$

tako da izlazi relacija: $B = (C_B R_2 / 2Sw_2) \cdot \alpha_1$, iz koje se B , uz očitani balistički otklon α_1 i određene ostale veličine desno u toj relaciji, daje izračunati u gausima.

Slično bi se komutacijom prikladno po podacima ampermetra A udešenih struja kroz S_1 i motrenjem pripadnih balističkih otklona galvanometra G odredile i ostale točke krivulje $OM'M$. Da se na pr. odrede polje i indukcija koji pripadaju točki M' , trebalo bi samo udesiti kroz S_1 struju I' koja odgovara apscisi OX' točke M' i motriti otklon α' na galvanometru G , proizveden komutacijom struje I' .

Kako se vidi, vrijednosti polja i indukcije proporcionalne su kod ovakvih mjerenja podacima očitanim na ampermetru A i na balističkom galvanometru G ; faktori proporcionalnosti mogu se za neki stalni mjerni rasporedaj unaprijed proračunati i vrijede za različite parove vrijednosti komutacione krivulje.

Komutator K ima dvije kefice, koje u određenom položaju njegove ručke kratko spoje kvadrante 1—2 i 3—4, a u položaju ručke zakrenutom za 90° kvadrante 1—3 i 2—4. Za vrijeme udešavanja struje kroz S_1 , kao i za vrijeme prethodnih komutiranja struje kroz S_1 prije samoga mjerenja (da se izbriše »magnetska

prošlost« probe P) tipka T ostaje otvorena, da galvanometar G ne pravi suviše titraje. Kad dođe do mjerenja, I se očita, T se zatvori, K se naglo zakrene i otklon α_1 se pažljivo motri.

Primjer: $S = 7 \text{ cm}^2$; $l = 62 \text{ cm}$; $w_1 = 376$, $w_2 = 40$, $C_B = 3 \cdot 10^{-6}$ As po dijelu skale; $R_2 = 1500 \Omega$. Komutacija struje $I = 1,5 \text{ A}$ neka proizvede balistički otklon $\alpha_1 = 156,8$ dijelova skale. Izlazi, kad se supstituiraju vrijednosti, da se kod istraživanoga željeza pri polju $9 \text{ A/cm} = 900 \text{ A/m} = 11,3 \text{ Oe}$ postizava indukcija $0,000126 \text{ Vs/cm}^2 = 1,26 \text{ T} = 12600 \text{ G}$. Permeabilnosti tog željeza kod te indukcije bile bi:

apsolutna: $0,000014 \text{ Vs/Acm} = 0,0014 \text{ Vs/Am}$; relativna: 1115.

4. Nešto je manje jednostavan postupak kod snimanja krivulje histereze. Recimo da treba snimiti petlju MRKNTUM; zbog simetrije je dovoljno snimiti MRKN. Aparatura i bitno u postupku ostaju isti, samo su pojedinosti drukčije.

Najprije se odredi točka M kao gore, t. j. odredi se indukcija XM. A zatim se ponovno udesi struja kroz S_1 koja odgovara točki M, pa se K samo toliko zakrene da se ta struja prekine (a ne komutira). Tim indukcija padne od iznosa XM na iznos OR; ova ordinata OR, t. zv. »remanencija« B_r , može se proračunati na temelju obih očitanih otklona balističkoga galvanometra.

Iznosom B_r određena je ne samo točka R, nego je dobiven i podatak za određivanje ostalih točaka. Ako na pr. treba odrediti indukciju OS točke P na dijelu MPR snimane krivulje, poći će se i opet od struje kroz S_1 koja odgovara točki M i ona će se najprije otporom R, uz otvorenu tipku T u sl. 252., slabiti do iznosa koji odgovara točki P. Istom tako udešena struja prekinut će se, uz zatvorenu tipku T. Iz pripadnoga otklona galvanometra G moći će se proračunati razlika indukcija $OS - OR = B'$, koja prbrojena već određenom iznosu B_r daje traženu indukciju točke P.

Kod točaka na dijelu RKQN snimane krivulje mjerio bi se balistički otklon izazvan promjenom struje kroz S_1 od nule do iznosa koji odgovara istraživanoj točki, na pr. točki Q na sl. 251., i iz pripadnoga balističkoga otklona zaključilo bi se na B'' . A odbijanjem iznosa B'' od B_r dobila bi se tražena ordinata.

Treba kod ovih mjerenja, gdje se balistički otkloni izvode variranjima struje kroz S_1 od nekoga pozitivnoga iznosa na nulu, ili od nule na neki negativni iznos, držati na umu da se kod proračunavanja pripadnih promjena indukcije balistički otkloni množe dvostrukim faktorom prema onom kod »komutiranja«.

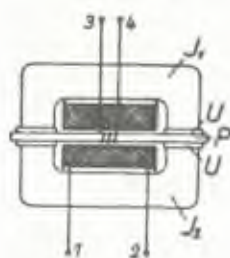
5. Prstenaste su probe po teoriji najispravnije, jer kod njih nema polova, pa nema ni poremećenja magnetskoga polja proizvedenoga strujom kroz S_1 . Međutim nije udobno priređivati

prstenaste probe, niti na njih namatati svitke S_1 i S_2 . Zato se, kod manjih zahtjeva na točnost, nastoji raditi s probama u obliku dugoljastih štapova, odnosno svežnjeva uskih limenih pruga. Da magnetski krug bude ipak dobro zatvoren, doda se kao put zanemariva »magnetskoga otpora« (reluktancije) za magnetske linije naročiti »jaram«, koji treba da je vanredno velikoga presjeka i od magnetski odličnoga materijala (balistička metoda s jarmom).

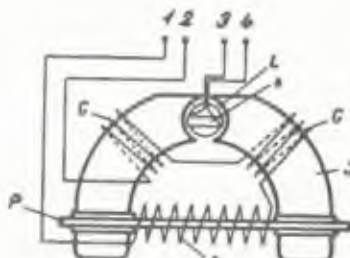
U sl. 253. jaram zbog boljšega djelovanja čak ima dva kraka J_1 i J_2 . Kroz veliki svitak sa stezaljkama 1—2 pušta se struja iz baterije, a na mali, sa stezaljkama 3—4, priključi se balistički galvanometar s dodanim otporom i tipkom kao u sl. 252.

Umeci U moraju biti takovi da se priljube što bolje s jedne strane udubini u jarmu, a s druge strane probi P . Po potrebi uzmu se korekcije mjerenja na temelju vrijednosti dobivenih u sličnim prilikama metodom s prstenom.

6. Poput opisanih balističkih metoda duĝo je poznato i mjerenje krivulje histereze *Koepselovim* aparatom. U bitnosti



Sl. 253.



Sl. 254.



Sl. 255.

se i tu radi s jarmom J (sl. 254.), u koji se učvrsti proba P u obliku tankoga dugoga štapa ili svežnja limova od istraživanoga materijala. Magnetizam se uzbudi istosmjernom strujom kroz svitak S sa stezaljkama 1—2, a magnetska indukcija ne mjeri se balistički, nego po otklonu vrtivoĝa svitka s sa stezaljkama 3—4, smještenoga u naročitoj udubini jarma J na način poznatih instrumenata s pomičnim svitkom (B-7.; sl. 2 na str. 17.).

Zapravo se Koepselov aparat osniva na obratu principa instrumenata s pomičnim svitkom u toliko, što kod ovih posljednjih magnetsko polje, koje otklanja pomični svitak s , potječe od permanentnoga magneta i prema tomu je stalno, pa je otklon pomičnog svitka određen jačom ili slabijom strujom kroz taj svitak, dok se kod Koepselova aparata struja kroz pomični svitak udesi na stalan iznos, a otklon varira prema jakosti polja u udubini

jarma, dakle i prema variranju magnetske indukcije proizvedene u probi P strujom kroz svitak S.

Zbog kompenzacije polja što bi ga svitak S proizveo sam za sebe doda se, simetrično porazdijeljen na kraku J, »kompenzacioni namotaj« C s protivnim smislom namatanja. Zbog nesavršenosti magnetskoga kruga, naročito zbog uzdušne pukotine L, primijeni se na očitane iznose otklonâ svitka s korekcija

7 Za mjerenja jakosti polja, odnosno magnetske indukcije u uzduhu, na pr. u uzdušnim pukotinama električkih strojeva, može se iskoristiti svojstvo bizmuta (Bi) da se njegov specifički električki otpor dosta jako poveća, ako se Bi stavi u prostor gdje vlada jako magnetsko polje, odnosno jaka indukcija. Ako se dakle izmjere (na pr. u Wheatstoneovu mostu) otpori »bifilarno« (D-5.) motane plosnate spirale S (sl. 255.) od Bi, stavljene jednom u istraživani prostor, a drugi put u prostor gdje nema magnetskih pojava, moći će se iz diferencije izmjerenih iznosa zaključiti na $H(H^*)$, i dalje na $B(B^*)$, u danom prostoru.

Promjene otpora Bi-spirale u ovisnosti od iznosa B idu po određenoj krivulji; kod jačih indukcija otpor raste za 50% na svakih 0,1 T (1000 G) povećavanja magnetske indukcije B .

Umjesto Bi-spiralom može se B u pukotinama itd. mjeriti i svitkom motanim na običan način (s w zavoja površine S), na koji se priključi balistički galvanometar. Ako se taj svitak naglo izvadi iz istraživane pukotine indukcije B , padne tok od iznosa BwS na nulu i balistički galvanometar dađe neki otklon α . Iz α se može zaključiti na B .

II. MJERENJA IZMJENIČNOM STRUJOM.

8 U prvom redu mjere se izmjeničnom strujom »gubici« zbog histereze i vrtložnih struja (E-44.) kod magnetiziranja željeza (točnije: željeznih limova) određenom frekvencijom f Hz. Najbliža metoda za to, predviđena i u »Propisima za ispitivanje željeznoga lima« VDE 0522/1914, jest *vatmetrička* (Epsteinov aparat).

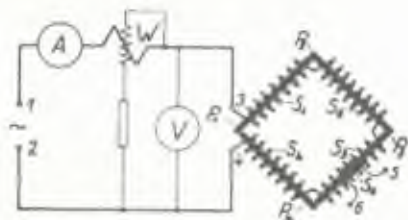
Osnovna ideja vatmetričkoga određivanja gubitaka vrlo je jednostavna. Po VDE 0522 izreže se iz ploča istraživanoga lima određene kvalitete i debljine oko 10 kg pravokutnih pruga duljine 50 cm i širine 3 cm. Te se pruge po sl. 256 slože u četiri jednaka svežnja P_1 do P_4 (s prerezom željeza $S \text{ cm}^2$) na način naznačen u slici i podvrgnu magnetiziranju izmjeničnom strujom koja teče svicima S_1 do S_4 .

Između stezaljki 1—2 izvora struje i 3—4 serijske kombinacije svitaka S_1 do S_4 (ukupnoga radnoga otpora R i ukupnoga broja zavoja w) ukopčani su još ampermetar A , voltmetar V (ukupnoga otpora R_V) i vatmetar W (s naponskom granom ukupnoga otpora R_W).

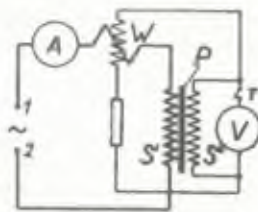
Ako se sad napon na 1—2 priključenoga izvora izmjenične struje tako naregulira, da V pokaže iznos E , vezan sa B_m (tjemenim iznosom indukcije uz koju se žele mjeriti gubici), te S , f i w formulom iz G-15. [u kojoj 4,44 znači $4 \times \xi$ uz suponirano, kod danoga B_m , sinusoidno E s faktorom oblika (E-3.) $\xi = 1,11$]:

$$E = 4,44 \cdot B_m \cdot S \cdot f \cdot w \text{ volta} \quad (I)$$

te ako se očitaju i iznosi I ampera i N_0 vata na A i W , sakupljeni su svi podaci da se može odrediti ukupni učin N što se gubi u sva četiri svežnja P_1 do P_4 istraživanog željeznog lima. Vatmetar W pokazuje naime sumu N_0 a) učina N , b) učina I^2R zbog Jouleove topline u bakru svitaka S_1 do S_4 , te c) i d)



Sl. 256.



Sl. 257.

učina E^2/R_V i E^2/R_W zbog vlastitih potrošaka voltmetra V i naponske grane vatmetra. Ako se dakle svi ovi gubici osim N izračunaju i oduzmu od N_0 , ono što preostane mora biti traženi učin N (koji podijeljen s težinom G željezne probe u kg daje odmah iznos gubitaka u W po kg težine željeza). Vrijedi dakle relacija:

$$N = N_0 - (I^2R + E^2/R_V + E^2/R_W) \text{ vata} \quad (II)$$

Obično se gubici mjere kod $B_m = 1 \text{ T (10000 G)}$ i $1,5 \text{ T (15000 G)}$; preračunani u W/kg oni daju konstante gubitaka (V_{10} ili V_{15} , već prema B_m odabranom sa 10 ili 15 kilogausa).

Na sl. 256. vidi se još neki svitak S_0 (malo zavoja). Njime se po VDE 0522 mogu komutacionom metodom (I-3.) izmjeriti za istraživanu probu indukcije B_{25} , B_{50} , B_{100} ili B_{300} kod polja 25, 50, 100 ili 300 A/cm, odn. 1500, 5000, 10000 i 30000 A/m.

9. Kod mjerenja opisanim jednostavnim Epsteinovim aparatom, i sličnima koji se upotrebljavaju drugdje u svijetu, neudobno je što u članove koji se odbijaju od N_0 ulazi i I^2R , pogotovo jer je R teško odrediti, budući da na pr. iznos otpora R_0 kombinacije svitaka S_1 do S_4 od debele bakrene žice određen istosmjernom strujom ne će biti jednak iznosu radnoga otpora R kod izmjenične struje, koji treba supstituirati u formulu (II).

Točnije i udobnije je raditi s poboljšanom aparaturom po sl. 257. Željezna proba iz sl. 256. sa četiri svežnja limova P_1 do P_4 složena u kvadrat naznačena je u sl. 257. pojednostavljeno sa P , a i četiri svitka S_1 do S_4 naznačena su sa S' ; preko ovih poslijednjih kao »primarnih« namotana su još četiri druga, »sekundarna« svitka S'' istoga broja zavoja s primarnima, tako da se napon E praktički nepromijenjeno prenese sa S' na S'' . Kod mjerenja se sad priključe na S'' (a ne na S') voltmetar V i naponska grana vatmetra W . Tim se postizava da član I^2R ispadne iz formule (II). No može se, kad je iznos napona E upotrebom voltmetra V jednom udešen prema željenom iznosu maksimalne indukcije B_m na temelju formule (I), iskopčati i voltmetar V tipkom T . Otklon vatmetra time padne za iznos potroška voltmetra, pa ako je N_0 preostali pokazani iznos na W , vrijedi relacija:

$$N = N_0 - E^2/R_W \quad (II')$$

Primjer: Visoko legirani (sa silicijem) limovi debljine 0,35 mm. Ukupna težina 10,26 kg. Specifička težina 7,55 (VDE 0522, § 6.). Uz $l = 200$ cm, kod dane ukupne i specifičke težine, izlazi $S = 6,8$ cm². Neka treba odrediti V_{10} . Po (I) uz $w_1 = w_2 = 4 \times 200 = 800$ zavoja i $f = 50$ Hz izlazi, kad se stavi $B_m = 10000$ G, kao potrebni iznos napona: $E = 121$ V. Vatmetar W , s naponskom granom otpora 3000 Ω , neka uz iskopčan voltmetar daje očitanje $N_0 = 18,53$ W. Za ukupne gubitke dobiva se:

$$N = 18,53 - 121^2/3000 = 13,65 \text{ W}$$

i prema tomu izlazi: $V_{10} = 13,65/10,26 = 1,34$ W/kg. Kod $B_m = 15000$ G stavi se u (I) $4 \times 1,14$ umjesto $4,44 = 4 \times 1,11$.

10. Kako je spomenuto, N predstavlja iznos ukupnih gubitaka u željezu. Ako treba *razlučiti* gubitke, t. j. odrediti, koji dio od N čine gubici zbog histereze N_h , a koji gubici zbog vrtložnih struja N_v , izmjerit će se gubici kod dviju različitih frekvencija f_1 i f_2 .

Gubici N_h rastu naime s prvom potencijom frekvencije f , a gubici N_v s drugom f^2 , tako da se može pisati: $N = a \cdot f + b \cdot f^2$ (gdje a i b znače konstante). Vrijedi dakle formula:

$$N/f = a + b \cdot f \quad (III)$$

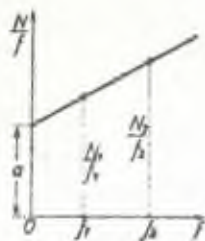
koja nije drugo nego jednadžba pravca s iznosima f kao apscisama, a N/f kao ordinatama; a bi bio odsječak toga pravca na ordinatnoj osi. Ako su sad N_1 i N_2 ukupni gubici u željezu izmjereni kod frekvencija f_1 i f_2 , pa ako se po sl. 258. nanese ordinate N_1/f_1 i N_2/f_2 uz apscise f_1 i f_2 , dobivene točke (i druge slične) bit će na pravcu (III). Produženjem toga pravca

do ordinatne osi dobiva se a , a iz a i traženi $N_h = a \cdot f$, te $N_v = N - N_h$ za ma koju frekvenciju f .

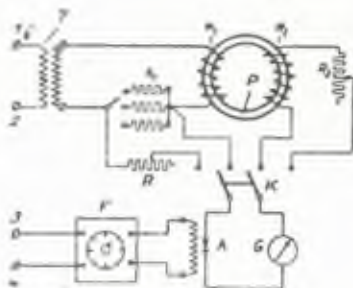
Primjer: Kod probe armaturnih limova nađeni su ukupni gubici $N_1 = 10,2$ W kod $f_1 = 20$ Hz i $N_2 = 35,4$ W kod $f_2 = 50$ Hz. Kroz točke s apscisama 20 i 50 i ordinatama 10,2/20 i 35,4/50 povuče se pravac. Taj pravac siječe ordinatnu os u visini $a = 0,38$. Prema tomu bi izašlo (za 50 Hz):

$$N_h = 0,38 \times 50 = 19,0 \text{ W i } N_v = 35,4 - 19,0 = 16,4 \text{ W.}$$

11. U novije vrijeme usavršene su znatno naprave za magnetska mjerenja izmjeničnom strujom, tako da se istraživanja mogu udobno vršiti i s probama od malo magnetskog materijala i mogu se dobiti ne samo gubici, nego i krivulja histereze kod izmjenične struje, te drugi podaci od interesa u magnetskom pogledu. Uostalom principno je ispravno vršiti mjerenja izmjeničnim strujama na materijalu koji je određen za upotrebu kod takvih struja, kao što je to slučaj na pr. kod limova za jezgre transformatora.



Sl. 258.



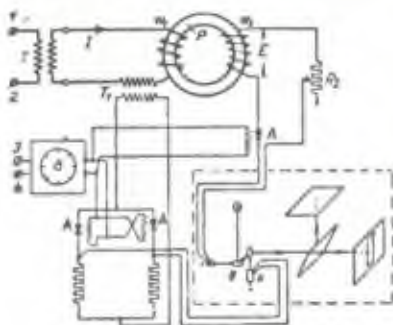
Sl. 259.

Naročito zanimljiv aparat ove kategorije, iznesen tek prije nekoliko godina, jest *ferometar* (Ferrometer; S&H). Osnovna misao snimanja kod izmjenične struje ovisnosti iznosa B_m gaussa u ovisnosti od magnetskoga polja (efektivnoga iznosa) H A/cm počiva na teoriji »svitka sa željeznom jezgrom«.

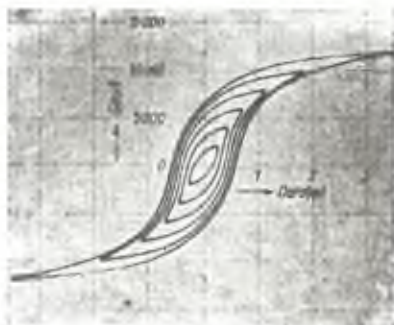
Baš po toj teoriji za prsten duljine l cm od istraživanoga magnetskog materijala, na koji je namotan svitak sa w zavoja (može se uzeti i proba u obliku svežnja pruga od lima, koja se učvrsti u jaram; I-5.) vrijedi relacija (I) iz I-8., po kojoj je B_m određeno naponom E , dok je $H = wI/l$ određeno strujom I svitka na prstenu. Drugim riječima iznosi B_m i H bili bi određeni iznosima E i I i prema tomu bi njihovo mjerenje bilo svedeno na mjerenja volta E i ampera I svitka na prstenu.

Od ovih jednostavnih razmatranja pa do današnjega ferometra bio je međutim još dugačak put. Prije svega u formuli

(I) E je zapravo elektromotorna sila, proizvedena mijenjanjima s frekvencijom f magnetskoga toka prstena (između iznosâ $+B_m \cdot S$ i $-B_m \cdot S$, ako je S prerez željeza prstena), a ne napon stezaljki svitka na prstenu. Zato je bolje predvidjeti na prstenu dva svitka s brojevima zavoja w_1 i w_2 i, uz struju I poslanu kroz prvi svitak, mjeriti uz $w_2 = w_1$ E na stezaljkama drugoga svitka. A uz to se, da praktički ne bude smetnji od vlastitih potrošača instrumenata, po shemi u sl. 259. mogu za mjerenja uzeti vanredno osjetljivi istosmjerni instrumenti G (galvanometri sa svijetlom markom; B-11.), dakako u kombinaciji s ispravljačem A . Već prema lijevom ili desnom položaju preklopke K mjeri se sa G bilo I (djeluje pad napona IR_1 na radnom otporu R_1), bilo E .



Sl. 260.



Sl. 261.

Kao ispravljač A uzet će se »titrajni ispravljač« (E-37.) s »pomicateljem faza« F , koji se stezaljkama 3—4 priključi na istu mrežu frekvencije f , na koju se stezaljkama 1—2 priključi i transformator T , izvor struje I . Ovakvim ispravljačima, odnosno mogućnostima koje otvaraju njihova svojstva u vezi s pomicateljem faza, mogu se na željeznim probama P izvesti i različita druga mjerenja, u koja na ovom mjestu ne možemo pobliže ulaziti¹⁾.

Ako se još ferometar u prikladnom spoju s titrajnim ispravljačima kao u sl. 260. kombinira u zajedničku aparaturu s t. zv. *pisarom koordinata*, jednom napravom koja općenito fotografski registrira krivulje odnosa između dvije električke veličine (u sl. 260. naprava je u crtkanom okviru), mogu se automatski snimati krivulje histereze za različite maksimalne indukcije (ATM J 36—3 i J—60). Jednu takovu snimku s cijelim nizom krivulja histereze kod izmjenične struje (magnetski odlični legirani lim) prikazuje sl. 261.

¹⁾ Potanje u ATM J-60; v. i Electrotechn. Z. (ETZ), 1936, str. 81 do 94.

J) BROJILA ISTOSMJERNE I IZMJENIČNE STRUJE

I. MJERNI SISTEMI ELEKTRIČKIH BROJILA

1. Pod *električkim brojilima* (zvanima također *strujomjerima*) razumijevaju se različite naprave konstruirane da neposredno pokazuju »zbrojeni« ili »integrirani« (za interval vremena od ukapčanja naprave do momenta očitavanja) potrošak bilo električke radnje, dakle Wh , bilo množine elektricitete, dakle Ah , bilo koje druge električke veličine od važnosti kod obračunavanja između dobavljača i konzumenta električke struje.

Množinom tipova, različitih po principu funkcioniranja, po pokazivanoj veličini, po vrsti struje za koju su određeni, te po specijalnim zahtijevanim funkcijama prema intencijama politike različitih prodajnih (na pr. dvostrukih itd.) tarifa električke struje, brojila su se dovinula do zasebnoga vrlo velikoga područja elektrotehnike, pa se redovno obrađuju u posebnim djelima¹⁾. S općenitog stajališta električkih mjerenja bit će dovoljno, ako se ovdje samo u najbitnijim linijama razmotre praktički važniji mjerni sistemi brojila, te postupci i propisi kod ispitivanja i baždarenja električkih brojila.

2. Ima mnogo gledišta po kojima se mogu klasificirati brojila, odnosno njihove funkcije. Obzirom na pokazivanu veličinu treba, pored slučajeva kad se, kako je već spomenuto, broje ampersati, odnosno vatsati, dakle kad brzina funkcioniranja brojila ostaje proporcionalna jakosti struje I , odnosno (pravom) učinku N [tako da brojilo pokazuje preko cijeloga vremena ukapčanja t uzeti »integral« $\int I \cdot dt$, odnosno $\int N \cdot dt$], razlikovati na pr. još slučajeve kad, kod izmjenične struje, brojilo treba da pokazuje »prazni potrošak«, ili također »prividni potrošak« [naime da brzina vrtnje brojila varira proporcionalno »praznom učinku« N' , odnosno proporcionalno »prividnom učinku« N'' (E-87.) tako da brojilo pokazuje $\int N' \cdot dt$, odnosno $\int N'' \cdot dt$]. K tomu sve funkcije brojila kod izmjenične struje mogu biti zahtijevane uz supoziciju jednofaznih ili trofaznih, odn. općenitije višefaznih, sistema.

Obzirom pak na princip funkcioniranja treba razlikovati brojila elektrolitička (prikladna, neposredno, samo kao Ah -brojila istosmjerne struje) od brojila po motornom ili kojem

¹⁾ Na pr. Krukowski, *Zahlertechnik*, Berlin 1930; Wallmüller, *Elektrizitätszähler*, Berlin 1935.

drugom principu osnovanom na mehaničkom gibanju (brojila s oscilacijama armature, brojila s njihovima po Aronu i dr.), pri čemu se opet dalje na pr. motorna brojila mogu podijeliti na kolektorska s permanentnim magnetom, koja kao i elektrolitička pokazuju, neposredno, samo Ah kod istosmjerne struje, zatim na elektrodinamska, koja su također kolektorska i pokazuju Wh kod istosmjerne i izmjenične struje, te na indukciona, koja su beskolektorska i reagiraju samo na izmjeničnu struju, ni ne uzimajući u obzir danas već uglavnom iščezle sisteme (kao onaj motornih beskolektorskih Ah-brojila istosmjerne struje sa živom po principu t. zv. unipolarnih strojeva).

U praktičkoj upotrebi danas se mogu naći uglavnom od ampersatnih sistema elektrolitički i motorni kolektorski s permanentnim magnetom, a od vatsatnih elektrodinamski i (kod izmjeničnih struja danas gotovo isključivo upotrebljavani) indukcioni.

3. *Elektrolitički* princip primjenjivan je već kod prvih brojila (iz osamdesetih godina prošloga stoljeća). Kasnije su doduše elektrolitički sistemi potisnuti od različitih drugih s gibanim dijelovima, naročito od onih po motornim principima, no ipak se i danas kod istosmjerne struje pored motornih brojila susreću, poimence u Njemačkoj, također elektrolitička, i to a) ona s izlučivanjem žive Hg (Stia-brojila; Schott & Gen., Jena), te b) s izlučivanjem vodika H_2 (E2- i HE3-brojila; SSW).

Kod brojila sa živom fine kapljice žive, izlučene kod prolaza struje na ugljenoj katodi iz otopine živinoga jodida HgJ_2 (u vodi, kojoj je dodano kalijskoga jodida KJ), padaju u kalibriranu staklenu »mjernu cjevčicu« brojila, pa se iz visine stupca žive skupljene u cjevčici zaključuje na broj proteklih Ah; anodu čini ovdje u naročito konstruiranom rezervoaru smještena živa, koja se elektrolizom troši u istoj mjeri, u kojoj se živa na katodi izlučuje, dok sama elektrolitička tekućina ostaje, u zadnjoj liniji, nepromijenjena. Kad se s vremenom cjevčica napuni živom, brojilo se mora »izvrnuti«, tako da živa iz mjerne cjevčice oteče k onoj na anodi, pa registriranje Ah može nanovo početi.

Kod brojila s vodikom tekućina podvrgnuta elektrolizi jest voda zakiseljena (orto)fosfornom kiselinom H_3PO_4 , dok katoda i anoda sadrže vanredno fino porazdijeljenu (v. E-68.) plemenitu kovinu, platinu (Pt) ili rodij (Rh), pa kako je na prikladan način udešeno da su obje elektrode uvijek djelomično u vezi i s vodikom, vladaju se i katoda i anoda u elektrokemijskom pogledu kao »vodikove elektrode«. Nema dakle polarizacije i konačni je rezultat da se samo vodik na katodi izlučuje i na anodi troši, a tekućina ostaje nepromijenjena. Vodik s katode hvata se u prikladnoj staklenoj »mjernoj cijevi« i iz očitane visine njegovoga stupca zaključuje se na broj proteklih Ah. Kad se

mjerna cijev napuni vodikom, mora se E2-brojilo izvrnuti, da vodik iz mjerne cijevi izidje: brojilo može ponovno početi raditi; kod HE3-brojila naročitom kombinacijom cjevčica na principu »teglice« postignuto je da se automatski nakon dovršenoga jednoga ciklusa elektrolize uspostavi početno stanje i bez izvrtanja').

Da se mjerne cijevi elektrolitičkih brojila ne bi prenaplo punile, šalje se kroz samu elektrolitičku stanicu od cijele struje potrošača I samo određeni mali dio I_1 , dok se preostali daleko najveći dio $I_2 = I - I_1$ pušta kroz poredni otpor (shunt). Postupa se dakle kao kod ampermetara sa shuntom, po D-38., odnosno po sl. 106. na str. 108. Medjutim kao otpor R_1 iz sl. 106. ne uzimlje se redovno elektrolitička stanica sama za sebe, nego u seriji s nekim dodanim metalnim otporom, tako da nastaje grana s ukupnim otporom R , određenoga temperaturno neovisnoga iznosa, pa vrijedi relacija iz D-38.: $Y : R_1 = I_1 : (I - I_1)$, u kojoj Y predstavlja otpor shunta.

Obično se kod brojila sa Hg omjer $Y : R_1$ otpora obih grana tako udesi da kod pune (nominalne) struje brojila, na pr. 10 A, kroz elektrolitičku stanicu teče samo struja od recimo 0,02 A (i prema tomu ostatak od 9,98 A kroz shunt), dok se kod brojila sa H_2 kod punoga opterećenja pušta kroz elektrolitičku stanicu čak samo 0,0001 A ili slično. Kako po zakonima elektrolize 1 Ah izlučuje žive 3870 miligrama (285 mm^3), odnosno vodika 37,6 miligrama (oko 450 cm^3 plina H_2 kod normalnoga pritiska 760 »tora« i temperature 20° C), to se kraj navedenih neznatnih struja kroz elektrolitičke stanice i relativno malene mjerne cijevi prilično polagano pune, pa između susjednih izvrtanja brojila mogu proći mjeseci, ili čak godina ili dvije, pogotovo jer brojila većinom rade samo s dijelom nominalnoga opterećenja.

4. Kolektorska motorna Ah-brojila s permanentnim magnetom (kraće nazivana: magnetna motorna brojila) građena su i rade na principu jednostavnih, iz elemenata elektrotehnike poznatih elektromotora s armaturnim namotajem tipa »trostruko T«, te s dovodom struje k armaturnom namotaju po shemi u sl. 262. i 263. preko »kefica« K_1 i K_2 i kolektora K od tri lamele.

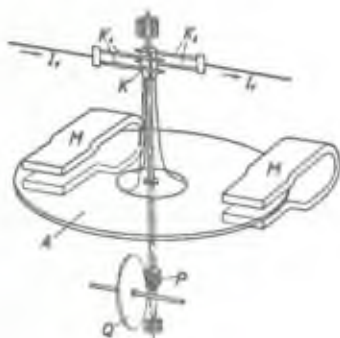
Armaturu podržavaju u vrtnji mehaničke sile proizvedene djelovanjem magnetskih polja na pr. dvaju permanentnih magnetâ M (sl. 262.) na vodiče triju svitaka S_1 do S_3 armature, protjecane istosmjernom strujom. Najčešće permanentni magneti imaju plosnati oblik s uskom pukotinom između krajeva (sl. 262); u tom slučaju i svici S_1 do S_3 (sl. 263.) također moraju biti izvedeni »plosnato«, tako da nastaje »plosnata armatura«, koja se po sl. 262 smjesti unutar aluminijskog oklopa A kao nosioca. Taj aluminijski nosilac služi ujedno kod kočenja gibanja armature vrtložnim strujama, induciranim kod gibanja armature u aluminiju A obim magnetima M (»elektromagnetsko kočenje«;

¹⁾ VDE-Fachberichte 8 (1936), str. 58 do 60.

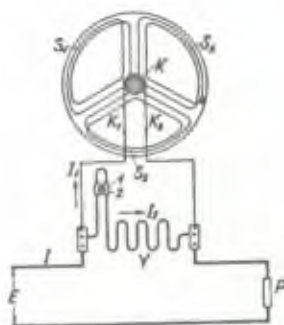
B-27.). Prema tomu magneti M istodobno izvode, djelujući na strujom protjecani namotaj armature, moment vrtnje potreban za gibanje armature i, djelujući na aluminijsku ploču A koja rotira zajedno s armaturom, kočenje gibanja, pa se brzina vrtnje u pravilu u svakom momentu sama udesi proporcionalno jakosti struje što teče kroz armaturu.

Ima i tipova magnetnih motornih brojila s »cilindrički« izvedenim armaturnim namotajem (i prema tomu cilindričkim prostorom između polnih nastavaka magneta).

I kod magnetnih motornih brojila šalje se samo malen dio ukupne struje potrošača kroz armaturu, a glavni dio teče kroz poredni otpor Y (sl. 263.) kome se omski iznos daje adjustirati metalnim mostićem 1 (fiksiranjem toga mostića u pravom položaju vijkom 2).



Sl. 262.



Sl. 263.

Gibanje armature prenosi se kod motornih brojila preko pužnoga vijka P na zupčani kotačić Q i s ovoga preko daljih zupčanika na mehanizam za »brojenje«, koji sumira okretaje armature brojila. Redovno se prenos tako udesi da naprava za brojenje odmah pokazuje potrošene Ah , ili čak, u smislu onoga što će biti odmah rečeno ($J-5$), kWh uz suponirani stalni napon mreže E .

5. Iako su opisana brojila, elektrolitička kao i magnetna motorna, zapravo *ampersatna*, kod kojih je brzina funkcioniranja određena samo jakošću struje, ipak se ona najčešće upotrebljavaju kao *vatsatna* brojila za registriranje potroška kWh kod istosmjernne struje. Kod toga se iskorišćuje činjenica da su naponi mreže E u V električkih potrošača uglavnom stalni, na pr. 110 V ili 220 V , pa variranjima opterećenja izazvana variranjima brzine funkcioniranja brojila nisu proporcionalna samo variranjima jakosti struje I u A , nego također i variranjima E puta veće veličine, električkoga učina EI , tako da se registracije brojila mogu smatrati proporcionalnima ne samo množini elektricitete Q Ah , nego također još i električkoj radnji $A = EQ$ $Wh = EQ/1000$ kWh . Prema tomu kod stalnoga napona mreže

E može svako brojilo koje pokazuje ampersate poslužiti i kao (kilo)vatsatno brojilo te se, uz suponirani posve određeni iznos *E*, može i skala kod elektrolitičkih brojila, odnosno prenos s pužnika na napravu za brojenje kod motornih Ah-brojila, tako udesiti da brojilo, priključeno na mrežu baš toga suponiranoga napona *E*, čak pokazuje direktno kWh.

Prema tomu su podaci ampersatnih brojila upotrebljavanih za brojenje (kilo)vatsati točni samo u toliko, u koliko su odstupanja stvarnoga napona mreže od suponiranoga iznosa *E* zanemariva. U slučaju pak da se brojilo ampersatnoga sistema, s direktnim pokazivanjem kWh uz suponirani stalni napon *E*, upotrebljava uz mrežu drugoga napona *E*₁, očitavanja brojila moraju se uzeti u obzir pomnožena s pripadnim konstantnim faktorom (koji u ovom slučaju ima iznos $C = E_1/E$). Na pr. ako se magnetno motorno brojilo, snabdjeveno prenosom za pokazivanje kWh uz *E* = 110 V, priključi na mrežu napona *E*₁ = 220 V, te dade očitavanje 18,2 kWh, stvarni potrošak električke radnje mora se računati sa $2 \times 18,2 = 36,4$ kWh; brojilo samo ne reagira na to što je napon 220 V mjesto suponiranih 110 V.

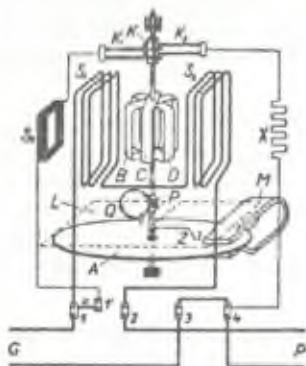
Principno je moguće dodatkom ispravljača (str. 38.) Ah-brojila istosmjerne struje ma kojega sistema osposobiti i za brojenje Ah kod izmjeničnih struja, no praktički se ta mogućnost rijetko iskorišćuje. Za brojenje pak kWh kod izmjenične struje Ah-brojila istosmjerne struje s ispravljačem uopće nisu prikladna, jer ne reagiraju na faktor učina cos φ.

6. Savršenija, zbog toga što reagiraju i na napon mreže, jesu *vatsatna* (odn. kilovatsatna) brojila. Za istosmjernu struju dolaze u toj kategoriji u obzir danas uglavnom samo *elektrodinamska* brojila (koja međutim reagiraju i mogu biti upotrebljavana također kod izmjeničnih struja, samo što se tamo radije uzimlju specijalna brojila izmjenične struje, indukciona, kao praktički najprikladnija).

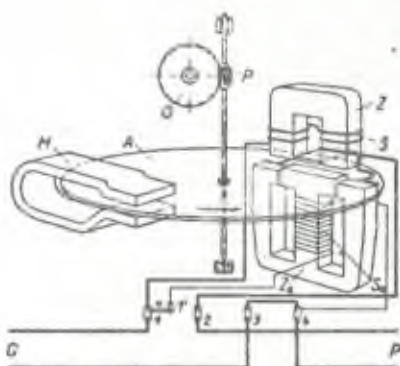
Princip funkcioniranja elektrodinamskih brojila jest princip kolektorskih motora, kojima je magnetsko polje proizvedeno »strujnim svitkom«, ukopčanim u glavni tok struje (na sl. 264. taj je svitak crtan razdijeljen u dvije polovice *S*₁ i *S*₂), a armatura, na sl. 264 predložena s tri svitka B-C-D cilindričkoga tipa, snabdijevana je strujom preko trodjelnoga kolektora *K* i kefića *K*₁ i *K*₂ i priključuje se (u serijskoj kombinaciji s jednim »pomućnim svitkom« *S*₀ i »dodanim otporom« *X* analognim onomu kod voltmetara i naponskih grana vatmetara) paralelno na mrežu. Drugim riječima, u strujni se svitak pušta struja mreže *I*, a u armaturu struja *I*₀ određena naponom mreže *E*, pa kako je magnetsko polje proizvedeno strujnim svitkom, t. zv. g l a v n o polje, proporcionalno struji *I*, dok se struja kroz vodiče svitaka armature može smatrati određena naponom *E*, to se, po zakonima o djelovanju magnetskih polja na vodiče protjecane stru-

jom, moment vrtnje koji nastoji proizvesti vrtnju armature može uzeti kao proporcionalan (istosmjernim veličinama) I i E , dakle proporcionalan učinku $N = EI$. Spomenutim momentom vrtnje izazvano gibanje armature koči se elektromagnetski kao kod magnetnih motornih brojila djelovanjem naročitoga (»kočnog«) magneta M na jednu aluminijsku (»kočnu«) ploču A , koja rotira zajedno s armaturom, pa se brzina vrtnje armature uvijek udesi proporcionalno učinku $N = EI$ u W , i prema tomu brojilo registrira radnju A u Wh , odnosno u kWh . Obično se prenos s pužnika P na napravu za brojenje tako udesi da očitani brojevi daju odmah iznose kWh .

Svitak S_0 ima funkciju da proizvede »pomoćno« magnetsko polje (koje se superponira »glavnomu«, proizvedenom od strujnoga svitka). Ovo je polje potrebno da brojilo ne bi ostalo, zbog trenja, nepokretno kod vrlo slabih struja kroz strujni svitak (i prema tomu neznatnih jakosti »glavnoga« polja). Kako struja kroz S_0 , a s njom i pomoćno polje, ne ovise o opterećenju brojila, nego o naponu E , koji je uglavnom stalan, očito će biti moguće postići da se poljem pomoćnoga svitka kompenziraju učinci trenja, tako da će se brojilo okretati i kod vrlo slabih opterećenja, na pr. još kod 1% nominalne struje I_N .



Sl. 264.



Sl. 265.

Da pak ne bi djelovanjem pomoćnoga polja došlo do t. zv. praznoga hoda brojila (vrtnje brojila i bez potroška struje po potrošaču), montira se na armaturu željezna zastavica (Z na sl. 264.), koju kod neznatnih momenata vrtnje armature može zadržati u gibanju privlačenje magneta M (kad Z dode u blizinu od M).

Zaštitni željezni lim L (na sl. 264. crtkano naznačen) stavlja se da se spriječe međusobni utjecaji između magnetskoga polja u motornom dijelu brojila i polja permanentnoga magneta u kočnom dijelu brojila.

Kod brojila za vrlo jake struje (na pr. od 300 A prema gore) stavljaju se paralelno strujnomu svitku poredni otpori, tako da kroz spomenuti svitak teče samo određeni dio trošene struje.

7. Kao kod elektrodinamskih ampermetara, voltmetara i vatmetara, tako i kod elektrodinamskih brojila nema, principno, zapreke da ih se upotrebi i kod izmjeničnih struja. Pri tomu treba za dodani otpor X uzeti po mogućnosti čisti radni otpor tolikoga omskoga iznosa da izide ukupno tako velik radni otpor naponske grane brojila da prema njemu praktički iščezavaju induktivni otpori armaturnoga namotaja i pomoćnoga svitka. Onda će (iz analognih razloga kao kod otklona elektrodinamskih vatmetara u B-23.) brojilo rotirati uvijek proporcionalno izmjeničnomu učinku $N = EI \cos \varphi$ i prema tomu registrirati i kod izmjenične struje (pravu) električku radnju A u Wh, odn. kWh.

Uglavnom će se kod izmjeničnih struja elektrodinamska brojila upotrebljavati samo iznimno, u pogonima s vrlo niskim ili vrlo promjenljivim frekvencijama. U običnim prilikama prikladnija su kod izmjenične struje (jer su bez kolektora, a i inače jednostavnije i manje osjetljive konstrukcije; jer nisu tako osjetljiva na utjecaje vanjskih magnetskih polja; itd.) indukciona brojila, na koja sada prelazimo.

8. Na princip *indukcionih* brojila, koja se mogu upotrebiti s a m o kod izmjeničnih struja, dolazi se nadovezujući na princip instrumenata s induciranim vrtložnim strujama iz B-32. Kako je naime već u B-33. rečeno, na spomenutom principu mogu se graditi upotrebom dvaju elektromagneta, jednoga »strujnoga« (uzbuđivanoga strujom I mreže) i jednoga »naponskoga« (uzbuđivanoga strujom I_0 proporcionalnom naponu mreže E i fazno prikladno pomaknutom prema tomu naponu), također i brojila bez kolektora, nazvana indukciona brojila. Kod ispravnoga adjustiranja ova se brojila brzinom rotiranja prilagođuju pravomu učinku $N = EI \cos \varphi$ izmjenične struje i prema tomu registriraju pravu radnju (pravi potrošak) A u Wh, odn. kWh.

Sl. 265. prikazuje primjer praktičke realizacije indukcionoga motornog kilovatsatnog brojila. Struja I mreže pušta se kroz serijski priključeni »strujni svitak« S , namotan na »strujnom željezu« Z , a struja I_0 naponske grane brojila, proporcionalna naponu mreže E , pušta se kroz svitak S_0 namotan na »naponskom željezu« Z_0 . Zbog variranja fazno pomaknutih magnetskih tokova Φ_1 i Φ_2 , uzbuđenih strujama I i I_0 , induciraju se u vrtloj aluminijskoj ploči A vrtložne elektromotorne sile E_1 i E_2 , koje stvaraju vrtložne struje I_1 i I_2 . Ove posljednje kruže okolo naokolo oko mjesta na ploči A probijanih od tokova Φ_1 i Φ_2 (dakle mjesta zgađanih od krakova željeza Z i Z_0 koji nose namotaje proljećane strujama I i I_0). Kako kod toga struje inducirane variranjem ma kojega od oba promatrana magnetska toka prolaze i područjima zgađanima od onoga drugoga toka, to dolazi (učincima sila što se stvaraju međusobnim utjecajima između Φ_2 i I_1 s jedne strane, te Φ_1 i I_2 s druge strane) do stva-

ranja momenata vrtnje na ploču A, a prema tomu i do vrtnje te ploče. Brzina ploče A ograničuje se, kao i kod elektrodinamskih brojila, elektromagnetskim kočenjem s pomoću permanentnoga magneta M.

Kako se vidi, rotor je kod indukcionih brojila naročito jednostavan, jer u bitnosti sadržaje samo jednu vrtivu ploču A, koja služi i kao motorna i kao kočna ploča, a i inače je konstrukcija indukcionih brojila naročito jednostavna; odatle i njihova općenita upotreba kod izmjeničnih struja.

9. Za ispravno registriranje Wh kod različitih $\cos\varphi$ mora međutim motorni sistem indukcionih brojila biti tako izveden, odnosno adjustiran, da kut pomaka faza ψ između tokova Φ_1 i Φ_2 bude baš »komplement« ($90^\circ - \varphi$) kuta pomaka faza φ između struje I i napona E.

Po detaljnijoj teoriji djelovanja indukcionih brojila, na kojoj se ovdje ne ćemo zadržavati¹⁾, ukupni moment vrtnje kod indukcionih brojila može se smatrati kao proporcionalan (osim sa E i sa I) uz ostalo i sa $\sin\psi$, pa prema tomu taj moment u zadnjoj konsekvenciji može biti samo onda proporcionalan sa $E I \cos\varphi$, ako se doista ψ i φ nadopunjuju na pravi kut i $\sin\psi$ se smije nadomjestiti sa $\cos\varphi$. Kočeno u svome gibanju (brzini ploče A proporcionalnim) protumomentom vrtnje, proizvedenim djelovanjem permanentnoga magneta M, brojilo će uz spomenute pretpostavke rotirati s brojem okretaja na minutu n proporcionalnim pravom učinku $N = E I \cos\varphi$ i prema tomu će, kod ispravna prenosa vrtnje rotora s pužnika P na zupčanik Q i na dalje dijelove naprave za brojenje, stvarno pokazivati pravi potrošak u Wh, odn. u kWh.

S praktičkoga gledišta mogu se o udešavanju iznosa kuta ψ dodati ove potankosti. Uz supoziciju da su gore uvedeni »motorni« magnetski tokovi Φ_1 i Φ_2 (koji »tjeraju« ploču A) identični s ukupnim magnetskim tokovima Φ i Φ_0 proizvedenima od struja I i I_0 (dakle uz supoziciju da nema magnetskoga »rasipanja«), jednu od mogućnosti da se približno udovolji uvjetu $\psi = 90^\circ - \varphi$ dalo bi zakretanje u fazi za oko 90° struje I_0 naponskoga svitka S_0 prema mrežnom naponu E. Jer ako I prema E fazno zaostaje za kut φ , a I_0 za kut približno 90° , pomak faza između I i I_0 iznosil će približno $90^\circ - \varphi$. No toliki će onda biti približno i pomak faza između tokova $\Phi_1 = \Phi$ i $\Phi_2 = \Phi_0$, jer će se ovi kraj pretpostavljenih odnosa, moći smatrati kao približno istofazni s pripadnim strujama I, odn. I_0 .

Stvarno su u prvo vrijeme i udešavana indukciona brojila da ispravno funkcioniraju i kod opterećenja s promjenljivim $\cos\varphi$ time da se nastojalo dovesti I_0 više ili manje približno »u kvadraturu« (u fazni pomak 90°) sa E. A kako su se direktnim priključkom svitka S_0 na E dali doduše postići veliki pomaci faza između I_0 i E,

¹⁾ Više u monografijama citiranim na str. 273. Vidi i ATM J 752.

ali ipak (već zbog radnoga otpora svitka S_0 kod redovno tanke žice upotrebljavane za realiziranje toga svitka) ne još dovoljno veliki, to su se kod većih zahtjeva na točnost morali upotrebljavati »umjetni« (na pr. »mosni« spojevi), koja je mogućnost već u B-33. bila spomenuta.

Danas se ispravni iznos $90^\circ - \varphi$ kuta ψ postizava jednostavnijim sredstvima, na pr. namjerno proizvedenim »rasipanjem« jednoga dijela toka Φ_0 . Konkretno govoreći, od ukupnoga toka Φ_0 proizvedenoga strujom I_0 kroz S_{00} , samo jedan dio pusti se da prolazi kroz ploču A kao motorni tok Φ_2 , a preostalom dijelu se daje prilika da se zatvori kroz »magnetski shunt« (na pr. kroz oba nena-motana kraka na naponskom željezu Z_0 u sl. 265.), tako da se Φ_0 razgrana u »motorni« tok Φ_2 i »rasipni« Φ_s . Ako se sad motorni tok Φ_2 optereti sekundarnim strujama (već strujni vrtlozi struje I_s , inducirani u ploči A variranjem toka Φ_2 , djeluju kao kratko spojeni i sekundarnom strujom protjecani zavoji), rezultira zaostajanje u fazi toka Φ_2 prema toku Φ_s , pa se iznos $90^\circ - \varphi$ faznoga kuta ψ između Φ_1 i Φ_2 može postići i kod faznih zaostajanja ispod 90° struje I_0 (odnosno i ukupnoga toka Φ_0 , geometrijske sume tokova Φ_2 i Φ_s) prema naponu E .

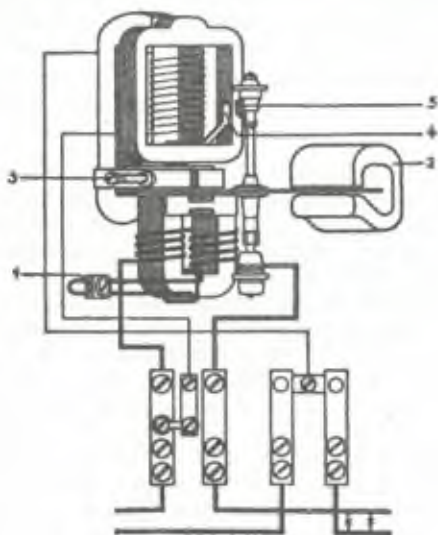
U praksi se redovno kut ψ između Φ_1 i Φ_2 samo uglavnom udesi na opisani način prikladnim dimenzioniranjem magnetskoga shunta na naponskom željezu, dok se konačno (fino) udešavanje postizava posebnom regulacionom napravom, na pr. takvom koja dopušta udobno kontinuirano variranje faznoga kuta motornoga toka Φ_1 (također i Φ_2 je samo dio pripadnoga ukupnog toka Φ proizvedenoga na jezgri Z strujom I ; ostatak se i ovdje razaspe). U spomenutu svrhu dosta je na strujnom željezu Z predvidjeti, pored glavnoga namotaja u obliku svitka S iz sl. 265., jedan drugi (sekundarni) namotaj od vrlo malo zavoja, na koji se priključi kao varijabilni otpor petlja, na pr. od »konstantana«, premostiva na povoljnom mjestu pomičnim metalnim mostićem koji se fiksira vijkom (vidi 1 na sl. 266.). Već prema položaju mostića varira otpor ukupnoga dijela petlje, pa se mijenja i struja pripadnoga strujnog kruga. A to mijenjanje ima za posljedicu da varira i fazni kut toka Φ_1 , dakle i pomak faza ψ između Φ_1 i Φ_2 , koji se time fino adjustira na vrijednost $90^\circ - \varphi$ (dakle na iznos 90° kod $\varphi = 0^\circ$, odakle i ime »fazno adjustiranje na 90° « za operaciju udešavanja ispravnoga položaja mostića 1 iz sl. 266.

Ima i konstrukcija indukcionih brojila s faznim adjustiranjem s pomoću variranja faznoga kuta toka Φ_2 , koje se može postići raznim metodama (pomičnim bakrenim limovima ili kolutima uz Z_0), kaošto su uopće različita kod različitih fabrikata i ostala regulaciona sredstva, oblici naponskoga i strujnoga željeza (uspor. razlike tih željeza kod tipa AEG u sl. 266. prema tipu SSW iz sl. 265.) i druge konstruktivne pojedinosti.

10. Od ostalih sredstava za adjustiranje — pored opisanoga »faznog adjustiranja« i pored adjustiranja veće ili manje općenite osjetljivosti brojila pomicanjem krajeva kočnoga magneta

(M na sl. 265.; 2 na sl. 266.) bliže osovini ili bliže perferiji rotora — indukciona brojila imat će još, analogno elektrodinamskima, uređaj za stvaranje »pomoćnoga« momenta vrtnje, potrebnoga za kompenziranje trenja, odn. za podržavanje vrtnje brojila kod malenih potrošačkih opterećenja. A da ne dodje do »praznoga hoda« (J-6.), predvidi se (i opet u analogiji s elektrodinamskim brojilima) na osovini brojila željezna »zaporna zastavica«, koja kod određenoga položaja rotora dođe u blizinu jednoga magnetiziranoga elementa, pa magnetsko privlačenje između zastavice i toga elementa sprječava prazni hod brojila.

Za pomoćni moment vrtnje kod indukcionih brojila nije potreban »pomoćni svitak«, poznat od elektrodinamskih brojila; željeno djelovanje postizava se već prikladno proizvedenom »nesimetrijom«, na pr. a) time da se obuhvati, u blizini rotorske ploče,



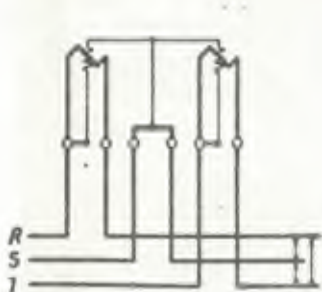
Sl. 266.



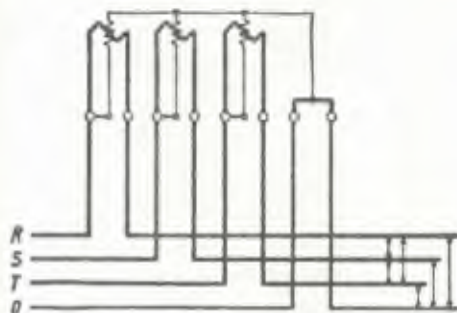
Sl. 267.

jedan dio prereza željeznoga kraka koji nosi naponski svitak bakrenim prstenom (kratko spojenim zavojem), pri čemu se jave sile koje rotorsku ploču tjeraju u smjeru od neobuhvaćenoga prstenom dijela prema obuhvaćenom dijelu; ili b) tim da se naponski motorni tok pusti da prelazi u rotorsku ploču dijelom preko uža, a dijelom preko šire uzdušne pukotine (što se može postići bilo osobitim oblikom dijela željezne jezgre uz rotorsku ploču, bilo stavljajući u dio pukotine nešto željeza, pri čemu nastaju sile koje tjeraju rotorsku ploču u smjeru mjesta užeg, odnosno željezom snabdjevenog dijela pukotine); nadalje c) tim da se, u blizini rotorske ploče, prisloni (ili inače kako doda, uz krak koji nosi naponski svitak, komadić željeza.

U kategoriju mogućnosti navedenih pod c) spada na pr. nesimetrično »proširivanje pola« ilustrirano u sl. 267., kod kojega se željeni dodani moment vrtnje postizava upotrebom vijka 1, koji okomito probada naponsko željezo 2, a orijentiran je prema rotor-skoj ploči A kako je nacrtano. Već prema tomu kako se vijak fiksira u naponskom željezu, nastat će veća ili manja nesimetrija pola, na pr. kod slike 267. u slučaju a) s prevlašću strane gore u slici, a u slučaju b) s prevlašću donje strane, pa će i pripadni moment vrtnje djelovati u jednom ili drugom smislu, kako je naznačeno u sl. 267., i varirati prema veličini proizvedene nesimetrije. Ovim načinom se na pr. kod AEG-brojila vrše adjustiranja pomoćnoga momenta vrtnje na ispravni iznos [vidi regulacioni vijak 3 na sl. 266. za »adjustiranje kod malenih opterećenja«; nasuprot tome regulacija pomicanjem kočnoga magneta (2 u sl. 266.) vršit će se kod »velikih opterećenja« (na pr. kod punoga.)].



Sl. 268.



Sl. 269.

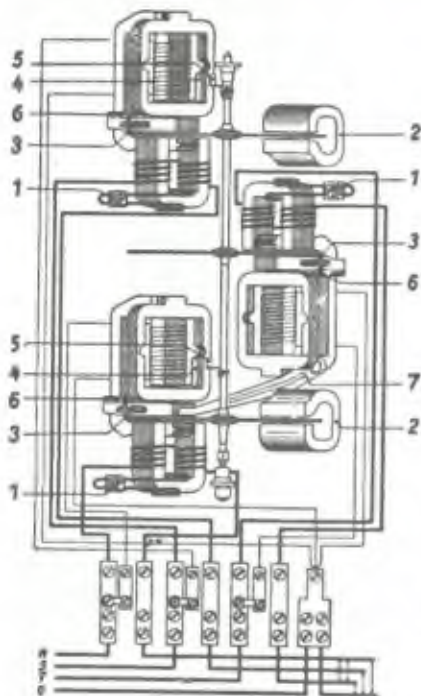
Za sprječavanje praznoga hoda mogla bi se zaporna željezna zastavica montirati na takvom mjestu osovine rotora da bi kod vrtnje prolazila tik uz kočni magnet (tako se kod elektrodinamskih brojila doista i postupa). Međutim kod indukcionih brojila radije se, po sl. 266., takva zastavica 5 pušta da prolazi pokraj posebnoga jezičca od željeznog lima 4, vezanoga na naponsko željezo. Magnetizam toga jezičca zadržava zapornu zastavicu, pri čemu je povoljno da je (zbog jače magnetičnosti jezičca) djelovanje jače kod viših mrežnih napona, kod kojih je baš i tendencija praznoga hoda veća.

O frekvenciji, po približnoj teoriji, djelovanje indukcionih brojila ne bi uopće ovisilo. Međutim zbog nuzgrednih učinaka ipak se opažaju u praksi utjecaji vrlo jakih varijacija frekvencije.

11. Za mjerenja električke radnje kod *trofaznih* mreža mogu se upotrebiti isti mjerni sistemi kao kod jednofaznih indukcionih brojila, priključeni po istim principima po kojima se priključuju kod mjerenja radnoga učina u trofaznim sistemima vatmetri. Specijalno će se kod mjerenja potroška u nesimetrično opterećenim sistemima s 3 i 4 vodiča moći upotrebiti spojevi s *dva*, odnosno s *tri* sistema indukcionih brojila, analogni spojevima s dva i tri vatmetra po shemama u sl. 205. i 206. na str. 210.,

odnosno po E-94. i E-95. Treba u spomenutim shemama samo umjesto strujnih svitaka vatmetara zamisliti strujne svitke brojila, a mjesto naponskih grana vatmetara (dakle kombinacija: naponski svitak + dodani radni otpor) naponske svitke brojila (i to bez ikakvoga dodanog radnog otpora u slučaju indukcionih sistema).

Obično se pojedini sistemi brojila ne upotrebljavaju kao samostalna brojila, nego kombinirani u jedno zajedničko *trofazno brojilo*, sastavljeno od dva ili tri jednofazna sistema s rotorskim



Sl. 270.



Sl. 271.

pločama na istoj osovini (već prema tomu da li se želi upotrebiti spoj *dva*ju brojila po sl. 205. ili *triju* po sl. 206.). Nastaju tako sistemi s priključcima na stezaljke kao u sl. 268., odnosno 269. Ukupni moment vrtnje i brzina rotacije udese se kod ovakvih kombiniranih brojila prema ukupnom trofaznom učinku i ona pokazuju ukupni pravi potrošak trofaznoga sistema u kWh.

Na sl. 270. i 271. vide se prostorni rasporedaj sistema i vanjski izgled (otvorenoga) kombiniranoga brojila s tri mjerna indukciona sistema (DU8; AEG) za priključak po »metodi triju brojila« na trofazni vod s četiri vodiča R, S, T, O.

Dobro se razabiru tri rotorske ploče na istoj osovinu, tri strujna i tri naponska željeza s pripadnim svicima, itd. Kočne magnete bilo je dovoljno primijeniti samo kod dvije rotorske ploče. Regulacioni elementi 1, 2, 3, te uređaji s elementima 4 i 5 za adjustiranje sprječavanja praznoga hoda (također predviđeni samo kod dva sistema), isti su, i jednako su označeni, kao u sl. 266.; elementi 6 i 7, u koje ne ćemo pobliže ulaziti, služe također za adjustiranje cijele kombinacije na dobro funkcioniranje.

Detaljnije o različitim načinima spajanja brojila, također i posredstvom mjernih transformatora, v. na pr. u normiranim shemama spajanja (Schaltungsbilder) u »Pravilima za električka brojila« VDE 0418/1932 (§§ 21. i 22.).

12. Od brojila za specijalne svrhe praktički su, osobito kod trofaznih sistema, naročito važna brojila *praznoga* potroška, koja treba da rotiraju brzinom proporcionalnom praznomu učinku, te brojila *privednoga* potroška, s brzinom rotiranja proporcionalnom privednom učinku (J-1.).

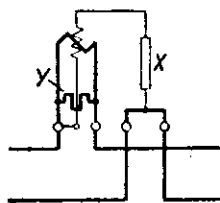
Za brojila *praznoga* potroška kod jednofaznih sistema trebalo bi moment vrtnje proizveden od oba motorna toka Φ_1 i Φ_2 , iz J-9. učiniti proporcionalnim izrazu $E I \sin \varphi$, dakle proporcionalnim sinusom pomaka faza, a ne kosinusu kao kod mjerenja pravoga potroška. A kako je po J-9. moment vrtnje kod indukcionih brojila proporcionalan sa $\sin \psi$ (sa sinusom pomaka faza između motornih faznih tokova Φ_1 i Φ_2 , strujnoga i naponskoga), to bi se kod konstrukcije brojila praznoga potroška radilo o tomu da se kut pomaka faza između Φ_1 i Φ_2 udesi na isti iznos $\psi = \varphi$, za koji je pomaknuta u fazi potrošačka struja I prema naponu E , jer bi onda zbog $\sin \psi = \sin \varphi$ moment vrtnje brojila varirao proporcionalno i sa $\sin \varphi$. No to znači da bi se, kod istofaznosti struje I s naponom E , dakle uz $\varphi = 0$, kut ψ morao smanjiti na nulu, t. j. za sistem brojila koji bi neposredno registrirao »prazne kWh« (nazovimo ih tako po analogiji s »praznim W« iz E-87.) zahtijevalo bi se »fazno adjustiranje na 0° «, a ne »fazno adjustiranje na 90° «, koje se po J-9. zahtijeva kod sistema indukcionih brojila za registriranje pravoga potroška u kWh.

U praksi se fazno adjustiranje na 0° ne da tako udobno postići kao adjustiranje na 90° . Ipak je moguće uvjetu $\psi = \varphi$ praktički udovoljiti priključujući po shemi u sl. 272. paralelno strujnom svitku indukcionoga brojila radni poredni otpor (shunt) Y neznatnoga omskoga iznosa, i u seriju s naponskim svitkom dodajući radni otpor X vrlo velikoga iznosa (a uz to uzimajući i uzdušnu pukotinu magnetskoga shunta znatno širom, nego kod sistema za mjerenja pravoga potroška).

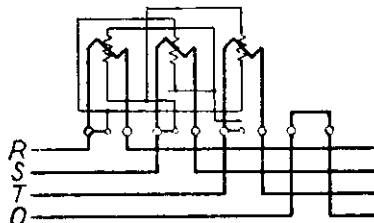
13. Međutim ovakve posebne izvedbe s faznim adjustiranjem na 0° (koje uostalom imaju nekoliko puta toliki »vlastiti potrošak« kao obične) rjeđe se praktički upotrebljavaju, jer ih u trofaznim sistemima, kod kojih mjerenja praznoga potroška baš

uglavnom i dolaze u obzir, uopće ni ne treba, budući da se kod njih i uz upotrebu normalnih indukcionih sistema, adjustiranih na 90° , pa čak i sistema adjustiranih na 60° (koji također konstruktivno ne pružaju poteškoća), mogu proizvesti spojevi za mjerenja praznoga potroška, ako se samo pripazi da se naponski svici trofaznih brojila (s tri ili s dva mjerna sistema) priključe na trofaznu mrežu po naročitim principima.

Tako je kod brojila sa sistemima adjustiranim na 90° , dakle napravama koje priključene na običan način (po sl. 268. ili 269.) mjere pravi potrošak, lako spojeve tako izmijeniti da izidu naprave koje mjere prazni potrošak. U principu se tu radi o tomu



Sl. 272.



Sl. 273.

da se na naponske svitke, u analogiji s onim što je rečeno u E-90. o prelazu s mjerenja radnoga učina na mjerenja praznoga, primijene mjesto napona upotrebljavanih u spojevima za mjerenje pravoga potroška naponi za 90° fazno pomaknuti, kakovi u trofaznim mrežama, uz dovoljnu simetriju naponskoga sistema kao u sl. 202., neposredno stoje na raspolaganju. T. j. treba samo priključiti naponske svitke mjesto na fazne na korespondentne za 90° fazno pomaknute linijske napone (kod pretvorbe spoja za pravi potrošak *triju* brojila fazno adjustiranih na 90° u spoj za prazni potrošak) ili, obrnuto, mjesto na linijske na fazne (kod brojila s *dva* sistema adjustirana na 90°). Tako nastaju spojevi po shemama u sl. 273. i 274. za mjerenja praznoga potroška kombiniranim brojilima s tri, odnosno s dva na 90° adjustirana indukciona sistema. Promjena *iznosa* volta kod prelaza s jednih napona na druge uzme se u obzir promijenjenim prenosom s pužnika na napravu za brojenje ili određenim faktorom, kojim se iznos očitani na brojilu množi da se dobije iznos praznoga potroška.

Kako se vidi, kod spoja brojila s tri sistema za mjerenja praznog potroška u trofaznim sustavima sa četiri vodiča po sl. 273. nije uopće iskorišten priključak nulvodiča O. Kod brojila s dva sistema priključena na trofaznu mrežu s tri fazna vodiča R, S, T nultočka je naprotiv potrebna i dobiva se umjetno time da se naponski svici 1 i 2 obih jednakih sistema brojila kombiniraju u zvjezdasti potrošač s induktancijom (svitkom sa želje-

slučajevima na mjestu naročiti oprez kod priključivanja brojila; v. na pr. ATM J 752—6. Osim toga kod trofaznih spojeva s upotrebom »umjetnih faza« (napona za 90° ili 120° fazno pomaknutih) ne smije biti nejednolikostima opterećenja narušena naponska simetrija (trokut ABC u sl. 202. ne smije biti poremećen). Inače se javljaju naročito kod velikih pomaka faza između struja i napona potrošača znatne pogreške u pokazanim iznosima.

15. Rjeđe se upotrebljavaju brojila *prividnoga* potroška (kVAh-brojila). Po analogiji s formulom (I) na str. 202. prividni potrošak A'' slijedio bi kod konstantnoga $\cos\varphi$ iz relacije $A^2 + A'^2 = A''^2$, u kojoj su A i A' pravi i prazni potrošak. No kod *promjenljivoga* $\cos\varphi$ spomenuta relacija postaje neispravna¹⁾. Tako ima samo manje više kompliciranih konstrukcija brojila točnih kod svih iznosa $\cos\varphi$ (kVAh-brojila AEG i SSW; Trivektor-brojila L&G; itd.).

Jednostavniji su problem brojila koja pokazuju kVAh samo približno i samo unutar ograničenoga intervala faznih pomaka φ . Naime grubo uzeto uz iznose φ ispod 20° vrijedi $\cos\varphi \approx 1$, dok se uz φ od 70° do 90° može staviti $\sin\varphi \approx 1$. Uz kuteve φ od 0° do 20° (dakle uz $\cos\varphi$ od 1,0 do 0,8) mogu prema tomu približno poslužiti obični indukcionni sistemi »fazno adjustirani na 90° «, a uz kuteve φ od 70° do 90° sistemi »adjustirani na 0° «. Uz adjustiranje pak na 45° mogu se dobiti brojila koja približno registriraju kVAh uz φ u intervalu od $45^\circ + 20^\circ$ do $45^\circ - 20^\circ$, t. j. uz $\cos\varphi$ od 0,4 do 0,9 (motorni pogoni!).

II. O BAŽDARENJU I PREGLEDU BROJILA

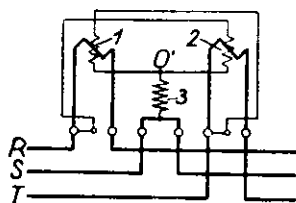
16. Kao naprave koje služe kod obračunavanja potroška električne energije, električka brojila treba da svojim podacima zadovoljavaju zahtjevima ispravnosti (unutar određenih tolerancija) i drugim uvjetima fiksiranim u različitim pravilima, odnosno propisima. Kod nas u tom pogledu vrijede »Pravila o obliku, sastavu i obilježavanju strujomjera i granicama njihove točnosti« publicirana u »Služb. Nov.« br. 219-LXVI/1938 (s važnošću od 1. I. 1939.); u Njemačkoj su na snazi »Regeln für Elektrizitätszähler« VDE 0418 (momentano je na snazi stilizacija iz g. 1932.) s dodatkom »Bestimmungen über die Beglaubigung von Elektrizitätszählern« (to je izvadak s važnošću od 1. IV. 1935. iz »Prüfordnung für elektrische Messgeräte« izdanih od P. T. R.; v. A-5.); kod britanskih pravila »British Standard Specifications for Electricity Meters« (B. S. No. 37.) momentano je na snazi tekst iz 1937.; itd.

¹⁾ Na pr. iz $6^2 + 8^2 = 10^2$ i $5^2 + 12^2 = 13^2$ ne slijedi da bi $(6 + 5)^2 + (8 + 12)^2$ bilo $(10 + 13)^2$; jedno je jednako 458, a drugo 529.

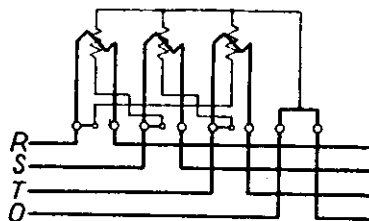
zom) 3, jednakom po prividnom otporu naponskim svicima 1, odn. 2, čime se stvara zvjezdište O' , koga potencijal odgovara točki O u sl. 202.

14. Kod upotrebe sistema fazno na 60° adjustiranih dolazi se na nešto drukčije, vrlo pregledne spojeve. Tu se naime, obzirom na promijenjeni kut faznoga adjustiranja, ne primjenjuju kod mjerenja praznoga potroška na naponske svitke naponi pomaknuti fazno za 90° prema onima koji bi se primijenili kod mjerenja pravoga potroška uz upotrebu sistema fazno adjustiranih na 90° , nego tu dolaze do upotrebe naponi za 120° pomaknuti.

Tako se na pr. iz spoja po sl. 269. za mjerenje pravoga potroška trima sistemima adjustiranim na 90° dolazi prelazom na tri sistema adjustirana na 60° na spoj za mjerenja praznoga potroška time da se kroz strujni svitak prvoga sistemaпусти struja prvoga faznoga vodiča R , a na njegov se naponski svitak primijeni drugi fazni napon (onaj između S i O), zatim da se slično na drugi sistem primijene druga struja i treći fazni napon, odnosno na treći sistem treća struja i prvi fazni napon. Time nastane spoj za mjerenja praznoga potroška broji- lom s tri na 60° udešena sistema, priključena na trofazni vod s četiri vodiča po shemi u sl. 275.



Sl. 274.



Sl. 275.

I kod mjerenja pravoga potroška mogu se upotrebljavati indukcioni sistemi adjustirani na 60° . Tako je na pr. za mjerenje pravoga potroška u simetrično opterećenoj trofaznoj mreži s tri vodiča R , S i T dovoljno priključiti strujni svitak »na 60° adjustiranoga« brojila s jednim sistemom u vodič R , a naponski na linijski napon između R i T , čime nastane naročiti »spoj jednoga brojila« kod kojega ne treba nikakve nultoeke.

Ima i inače mnogo mogućnosti spajanja različito adjustiranih sistema indukcionih brojila i kombinacija od više takvih sistema, naročito ako se uzmu u obzir i varijante spojeva kod indirektnoga i poluindirektnoga priključivanja posredstvom strujnih i naponskih mjernih transformatora. Kraj ovolike šarolikosti postoje dakako i mnoge mogućnosti pogrešnih spojeva (na pr. s krivim slijedom faza, sa zamijenjenim priključcima strujnih ili naponskih mjernih transformatora itd.), tako da je u kompliciranijim

U nekim državama (na pr. i kod nas) određeno je čak obavezno ispitivanje svakoga strujomjera prije puštanja u upotrebu, te ponovno pregledavanje nakon svakih nekoliko godina upotrebe, dok drugdje (na pr. u Njemačkoj) nema sličnih odredaba, nego se prepušta inicijativi interesiranih strana briga da u upotrebi budu ispravna brojila, a upotreba se brojila koja krivo pokazuju naravno kažnjava.

Kraj spomenutoga stanja stvari brojila se na koncu fabrikacije podvrgavaju u tvornicama *baždarenju* (ispitivanju spojenom s adjustiranjem na ispravan rad s pomoću u brojilima predviđenih regulacionih elemenata) u baždarskim stanicama samih proizvađača, a i prije puštanja u upotrebu istražuju se u baždarskim stanicama na pr. većih električkih centrala; ovako adjustirani i ispitani pojedini komadi mogu se onda poslati, fakultativno ili obvezatno, na službeni *pregled* u svrhu »ovjeravanja«, odnosno u službene stanice za »pregled i žigosanje«. A ima prilika kad se brojila podvrgnu *kontroli* u pogonu.

17. Prikladnih ispitnih spojeva, a prema tomu i ispitnih uređaja, za svrhe baždarkenja ili samo pregleda, kao i spojeva za kontrolu u pogonu, ima vrlo različitih. U bitnosti je, dakako, svrha svih tih spojeva i uređaja ista: da se potrošak P *pokazan* za izvjesni vremenski interval od istraživanoga brojila usporedi s podacima »normalnih« (t. j. smatranih ispravnima) mjernih naprava ukopčanih istodobno s brojilom; iz tih podataka izračuna se ili zaključi na *stvarni* potrošak S , pa se na temelju diferencije iznosâ P i S odredi, koliko % brojilo pokazuje previše (pozitivna pogriješka) ili premalo (negativna pogriješka).

Razlike u pojedinim metodama mogu biti samo u načinu provođenja spomenute usporedbe; one se mogu odnositi:

a) na to da li se radi s »faktičnim« opterećenjem, t. j. s faktično priključenim prikladno odabranim potrošačkim strujnim krugom, ili s »umjetnim« opterećenjem, kod kojega se naponske grane i strujni svici istraživanoga brojila i mjernih električkih naprava, koje služe kod ispitivanja, snabdijevaju naponima i strujama proizvedenima samo za njih; *

b) na to da li se za određivanje stvarnoga potroška S upotrebe podaci električkoga mjernoga instrumenta s kazalom (kod kWh-brojila vatmetra, koji pokazuje učin N ; kod Ah-brojila ampermetra, koji pokazuje struju I) kombinirani s vremenskim podacima ure (na pr. stop-ure), ili se za određivanje iznosa S upotrebi posebno »normalno« (specijalno i precizno konstruirano, te pomno baždareno) brojilo; konačno

c) na to, da li se ispitivanje vrši motrenjem rotorskih okretaja (t. zv. kratkotrajnim pokusom), t. j. mjereći stop-urom

samo broj sekunda t potreban za izvjestan manji broj vremen-
skih razmaka n , u kojima slijede jedan za drugim prolazi mar-
kacije na rotorskoj ploči pokraj jednoga fiksnoga znaka, i za-
ključujući iz broja okretaja rotora n na iznos P po podatku na
brojilu o prenosu s rotora na napravu za brojenje (taj prenos,
koji i onako može biti samo iznimno i grubo neispravan i dade
se naknadno mehanički kontrolirati, naznači se na brojilu na
pr. sa »1 kWh = 4800 okretaja rotora«, pri čemu bi $R = 4800$
bio »broj prenosa« brojila), ili se ispitivanje produži u »trajni
pokus«, kod koga se brojilo mora ostaviti u pogonu dok se
podatak naprave za brojenje (ili kod elektrolitičkih brojila
visina stupca izlučene tvari) toliko jako ne promijeni da se
diferencija stanja na svršetku i početku pokusa dade dobro
očitati (kod elektrolitičkih brojila ni ne dolazi u obzir nego
ispitivanje trajnim pokusom).

18. Ovisi naravno o raspoloživim sredstvima, te o broju
ispitivanja i brzini i točnosti kojom se ona žele vršiti po kojoj
će se od alternativa navedenih pod a) do c) postupati u poje-
dinim slučajevima baždarenja ili pregleda brojila.

Kod kontrole u pogonu i u slučajevima pojedinačnih ispi-
tivanja mjernim sredstvima koja su zbog drugih upotreba već
na raspolaganju lako će se na pr. improvizirati spoj s doista
priključenim potrošačem, recimo kao u sl. 276. sa sijalicama S ,
električkim kuhlom K , motorom M i sličnim, tako da će se
kod danoga napona mreže E dati udesiti različite struje opte-
rećenja I , a kod izmjenične struje i različiti faktori učina $\cos\varphi$
(na pr. variranjem opterećenja priključenih motora ili trans-
formatora, svicima sa željeznom jezgrom itd.).

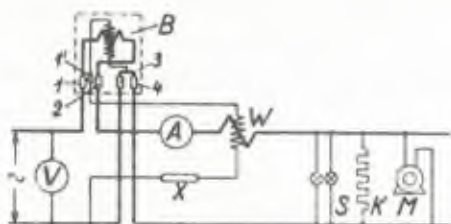
Samo pak mjerenje moći će se izvršiti na pr. vatmetrom
 W , s naponskom granom (zajedno s dodanim otporom X) pri-
ključenom paralelno naponskom svitku istraživanoga (recimo
indukcionoga) brojila B na napon E , mjeren voltmetrom V ,
a sa strujnim svitkom priključenim u seriju sa strujnim svit-
kom brojila B (i s ampermetrom A , koji pokazuje struju I).
Onda ne bi trebalo nego, uz konstantno držano opterećenje,
mjeriti interval vremena potreban za recimo 20 okretaja rotora
kod kratkoga pokusa, odnosno pustiti brojilo ukopčano kroz
mnogo dulji interval vremena (dok se iznos pokazan uređajem
za brojenje ne bi nešto jače promijenio prema stanju na po-
četku) u slučaju trajnoga pokusa.

Ako bi stajalo na raspolaganju normalno brojilo, moglo
bi se ono ukopčati mjesto vatmetra W u sl. 276. U tom slučaju
ne bi ni trebalo mjeriti vrijeme, nego bi bilo dovoljno uspore-
điti razlike očitavanja istraživanoga i normalnoga (ispravnim sma-
tranoga) brojila nakon pogona zajedno u povoljnom trajanju.

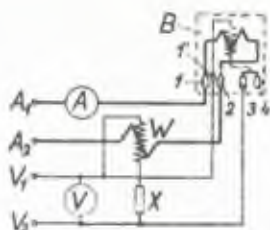
19. Za baždarenja i preglede brojila u većem broju, na pr. u baždarskim i preglednim stanicama, kontrolne metode s faktičnim opterećenjem ne bi bile prikladne. U pravilu se tu primjenjuje *umjetno opterećenje*, gdje ni nema potrošača. Tako se s jedne strane postizava da se izlazi s izvorima struje malenoga učina i da otpada trošenje energije u potrošaču za vrijeme mjerenja, a s druge strane lakše se udešavaju potrebni ispitni naponi i različite struje opterećenja, te (kod izmjeničnih struja) različiti pomaci faza struje prema naponu, koji se traže kod ispitivanja brojila kod različitih pogonskih prilika, propisanih za potpuno baždarenje ili pregled brojila.

Obično se još kod ovakvih mjerenja radi po metodi određivanja potroška brojila mjernim instrumentom (vatmetrom kod kWh-potroška) i urom, jer je ova redovno točnija od metode s normalnim brojiлом.

K tomu dakako kod većega broja mjerenja dolazi u obzir samo kratki pokus s motrenjem broja okretaja rotora, iz kojega se na pokazani potrošak zaključuje iz naznake »prenosa« R brojila ($1 \text{ kWh} = R$ okretaja rotora).



Sl. 276.



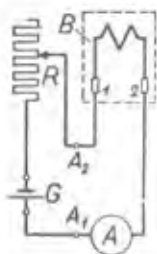
Sl. 277.

Po shemi u sl. 277. kod umjetnoga se spoja strujni svitak i naponska grana istraživanoga brojila B električki odijele (veza a između stezaljki 1 i 1' u sl. 264. i 265. razriješi se). A onda se kroz strujni svitak brojila B, spojen u seriju s ampermetrom A i sa strujnim svitkom vatmetra (ili normalnoga brojila) W pusti struja, prikladno regulirana na željeni iznos I , iz posebnoga izvora (»strujnoga generatora«), koji se priključi na stezaljke A_1 i A_2 i može imati samo malen napon (koliki je dovoljan za održavanje struje I kroz A i kroz strujne svitke od B i W), pa prema tomu i malen učin. Slično se na naponsku granu istraživanoga brojila, kojoj su paralelno priključeni voltmetar V i naponska grana vatmetra (naponski svitak vatmetra s dodanim otporom X), odnosno naponska grana »normalnoga« brojila, primijeni preko stezaljki V_1 i V_2 napon, reguliran na iznos E , iz posebnoga izvora (naponskoga generatora), koji također može biti dimenzioniran za malen učin (jer ne treba da daje nego malenu ukupnu struju).

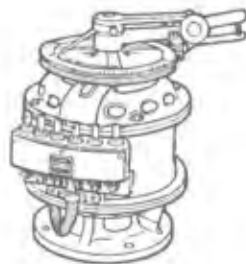
Čak i u slučaju istodobnoga priključka većega broja istraživanih brojila (sa strujnim svitcima ukopčanim u seriju, a naponskim paralelno) ne će biti potrebni izvori za I i E većega učina, jer su »vlastiti potrošci« strujnih i naponskih svitaka današnjih brojila neznatni.

20. Spoj po sl. 277. osniva se na tom da kWh-brojila, a isto tako i vatmetri, očito reagiraju proporcionalno strujama I kroz njihove strujne svitke i naponima E primijenjenima na njihove naponske grane, a sistemi za izmjenične struje također proporcionalno faktoru učina $\cos\varphi$ proizvedenom pomakom faza φ struje I prema naponu E ; sve to dolazile struje I i naponi E od ma kuda i bio uzrok faznom pomaku φ između I i E ma koji, dakle i onda kad ni nema »potrošača«, protjecanoga pod utjecajem napona E strujom I fazno pomaknutom za kut φ prema E .

Tako će brojilo B u sl. 277. rotirati brzinom proporcionalnom učinku N vata (dakle proporcionalnom izrazu EI kod istosmjerne struje, a izrazu $EI\cos\varphi$ kod izmjenične) i prema tomu će registrirati potrošak $A = \int N \cdot dt$ u Wh odn. kWh, koji će se moći usporediti s potroškom izračunanim po podacima N i t vatmetra W i ure (u vatima i u sekundama).



Sl. 278.



Sl. 279.

Kod istosmjerne struje otpao bi iz sheme po sl. 277. priključak vatmetra, jer bi se na $N = EI$ moglo zaključiti već iz očitavanja E i I instrumenata V i A. Kod Ah-brojila otpao bi i cijeli naponski krug tako da bi cijeli ispitni spoj bio kao u sl. 278. [s ovećim akumulatorskim elementom kao izvorom struje G , s otporom za reguliranje R , te brojiлом B i ampermetrom A (ili normalnim brojiлом) priključenima u seriju].

Kod izmjeničnih struja moraju naprotiv biti na raspolaganju ne samo dva električki odijeljena (bez vodljive veze) generatora G_1 i G_2 , jedan s mogućnošću udešavanja iznosa napona E , a drugi a analognom mogućnošću za struju I , nego se mora predvidjeti i mogućnost udešavanja povoljnoga pomaka faza φ , da bi se istraživanja brojila mogla vršiti kod različitih faktora učina. A razumije se da i frekvencije u naponskom i strujnom ispitnom krugu moraju biti striktno iste. Uz to će kod ispitivanja trofaznih brojila

biti dakako potrebni trofazni naponski i strujni generatori G_1 i G_2 . Svim ovim zahtjevima može se udovoljiti:

a) tako da se za generatore G_1 i G_2 uzmu prikladno namotani sinhroni strojevi (u pravilu trofazni, da se mogu istraživati i trofazna brojila), s rotorima učvršćenima na zajedničku osovinu, a sa statorima jednim fiksnim i drugim vrtivim; kod pogona cvakve kombinacije motorom prikladne brzine, udešene već prema željenoj frekvenciji, mogu se onda mijenjanjem uzbudnih struja obih generatora udešavati iznosi E i I , a zakretanjem vrtivoga statora prema fiksnomu pomaci faza između E i I ;

b) tako da se struja I i napon E , potrebni za strujni, odnosno naponski krug kod ispitivanja umjetnim opterećenjem, proizvedu transformatorskim priključcima na raspoloživu mrežu izmjenične struje (u pravilu trofaznu), i to na pr. struja I običnim transformatorom, a napon E dovoljno velikim *zakretnim* transformatorom (pomicačem faza ili faznim transformatorom; v. E-37. i F-14.). Vanjski izgled zakretnoga transformatora za ove svrhe, s rotorom koji se dađe fiksirati zakrenut u povoljni položaj, prikazuje sl. 279. (izvedba: S&H).

21. Još je naročito potrebno da se kod baždarenja ili pregleda brojila očitavanjem vatmetra i ure jednom udešeno opterećenje za vrijeme cijelog mjerenja praktički ništa ne promijeni. U nekim slučajevima, na pr. kod upotrebe akumulatora kao izvora struje u spoju po sl. 278., to se automatski postizava, a u drugim prilikama, osobito u slučaju malo prije spomenutoga transformatorskoga proizvođenja napona E i struje I priključkom na mrežu izmjenične struje podvrgnutu jačim variranjima napona, moraju se upotrebiti naročita sredstva (na pr. s elektronskim cijevima) za podržavanje stalnosti napona i struje; takva i imaju sve veće i modernije stanice za baždarjenje i pregled brojila.

22. Evo još nekoliko primjera računskih postupaka kod različitih načina ispitivanja brojila:

1) Ispitivanje jednofaznoga indukcionog kWh-brojila nominalnoga napona 220 V i nominalne struje 5 A (umjetno opterećenje po sl. 277.; vatmetar i ura; kratki pokus). Broj prenosa R (J-19.) neka je naznačen na brojilu sa 3000 (1 kWh = 3000 okretaja rotora). Neke se ispituje kod iznosa $E = 220$ V, $I = 4$ A, $N = 704$ W, pokazanih od V, A, W, dakle kod $\cos \varphi = 0.8$. Preciznom stop-uom se ustanovi da brojilo za $n = 36$ okretaja rotora treba vrijeme $t = 60,4$ s. Stvarni je potrošak $S = 704 \times 60,4 / 3600000 = 0.0118$ kWh, a na $n = 36$ okretaja otpadao bi pokazani potrošak $P = 36 / 3000 = 0,01200$ kWh. Brojilo dakle pokazuje previše; ima pozitivnu pogrešku, koja u % stvarnoga potroška S iznosi:

$$p^0\% = 100(P - S)/S = +1,6\% \quad (I)$$

Isti se rezultat dobiva, ako se iz stvarnoga potroška $Nt/3600000$ uz $n = 36$ okretaja rotora zaključi na broj:

$$R_1 = n/(Nt/3600000) = 3600000n/Nt = 3048$$

stvarnih okretaja po kilovatsatu, pa se R_1 usporedi s brojem $R = 3000$ okretaja po kWh navedenim na brojilu. Kod ispravnoga brojila bilo bi $R_1 = R$. No kako je u promatranom slučaju R_1 veće od R , brojilo izvodi za $R_1 - R$ više okretaja po kWh, ono ide prebrzo i ima pogriješku (u % iznosa R):

$$p\% = 100(R_1 - R)/R = 100(3048 - 3000)/3000 = +1,6\% \quad (\text{II})$$

II) Ispitivanje magnetnoga motornoga brojila nominalnoga napona 110 V i nominalne struje 10 A; spoj po shemi u sl. 278.; ampermetar i ura; kratki pokus. Neka je na brojilu naznačen iznos $R = 4800$ kao broj okretaja za 1 kWh uz suponirani napon od 110 V. Uz $I = 5$ A neka brojilo za $n = 45$ okretaja treba 62,8 s. Iznos P bio bi $45/4800 = 0,00938$ kWh, dok je stvarno kroz brojilo prošla množina elektriciteta $5 \times 62,8/3600$ Ah, kojoj bi uz supoziciju $E = 110$ V odgovarao iznos kWh:

$$S = 110 \times 5 \times 62,8/3600000 = 0,00960,$$

tako da brojilo griješi za $100(P - S)/S = -2,3\%$

III) Jednofazno indukciono kWh-brojilo (220 V i 5 A); mjerenje *baždarnim* (ispitnim) brojiлом; opterećenje umjetno ili faktično. Baždarna brojila dopuštaju očitavanja broja okretaja, učinjenih za vrijeme ukapčanja, do u malene dijelove jednoga okretaja. Kod odabranoga opterećenja, na pr. uz 20% nominalne struje kod nominalnoga napona i uz $\cos\varphi = N/EI = 0,6$ ostavi se u pogonu baždarno brojilo, dok istraživano s nominalnih na pr. $R = 3000$ okretaja po kWh ne načini određeni cijeli broj, na pr. $n = 60$ okretaja. Ako pripadni broj okretaja baždarnoga brojila iznosi na pr. $n_0 = 1,95$, a 1 okretaj toga brojila vrijedi na pr. $A = 0,01$ kWh, moralo bi, kod jednakoga registriranja obim brojiłima, biti $n/R = A \cdot n_0$; razlika bi upućivala na pogriješku $p\%$, koju je lako izračunati. Uz $R = 3000$, $n = 60$, $n_0 = 1,95$, $A = 0,01$ izišlo bi $P = 0,0200$ kWh, a $S = 0,0195$ kWh, pa bi po formuli (I) u primjeru I) pogriješka bila

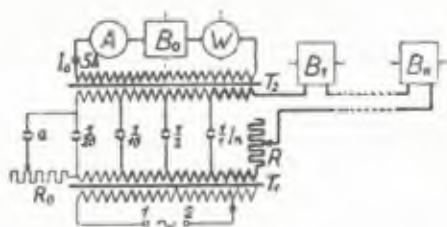
$$p\% = 100(P - S)/S = +2,6\%$$

Sve dobivene pogriješke ležale bi unutar »dopuštenih odstupanja« fiksiranih u čl. 10. naših »Pravila« (J-19.), a također i unutar granica pogriješaka propisanih za ovjeravanje brojila u »Dodatku« Pravilima VDE 0418/1932. Razumiye se da će se brojilo kod baždarenja adjustirati, a kod ovjeravanja (odn. pregleda) kontrolirati u cijelom predviđenom opsegu opterećenja, a uz to i s gledišta pokretanja kod neznatnih opterećenja, s obzirom na prazni hod itd.

Vrijedno je istaknuti da je u slučaju kratkoga pokusa kod mjerenja stvarnoga potroška S mjernim instrumentom (u prvom primjeru gore vatmetrom) i urom važnije nego se često misli da upotrebljena stop-ura bude precizna (neka pokazuje po mogućnosti i desetinke sekunde), te da vrijeme motrenja ne bude prekratko. Tako se u primjeru I) gore iznos pogriješke $p\%$ smanji od 1,6 na 1,26 uz $t = 60,6$ umjesto $t = 60,4$ s.

23. U prvi mah moglo bi se činiti neprikladnim što se kod baždarenja i pregleda električkih brojila određivanje stvarnoga potroška S najčešće svodi na mjerenje dviju veličina, na pr. kod kWh-brojila izmjenične struje na mjerenje učina vatmetrom i vremena urom, pri čemu mjereni učin za vrijeme mjerenja mora ostati posve stalan, umjesto da se električka radnja direktno mjeri normalnim brojilom, pri čemu ne bi mnogo smetale eventualne male varijacije opterećenja za vrijeme mjerenja, jer bi jednako utjecale na normalno kao i na ispitivano brojilo.

Razlog je upotrebi vatmetara, i uopće instrumenata s kazalom, kod određivanja iznosa S u tomu što brojila dosadanih konstrukcija nije moguće adjustirati da rade dovoljno precizno i pouzdano kod vrlo različitih opterećenja, kod kojih se svih istraživanja obično vrše. No moguće je graditi i adjustirati brojila da idu pouzdano precizno kod određenoga nominalnoga opterećenja (i u blizini njega). Polazeći od ove ideje razvio se u novije vrijeme *postupak jednakoga opterećenja* kod ispitivanja brojila izmjenične struje, kod kojega se, po sl. 280.,



Sl. 280.

strujni svici normalnoga (baždarnog, ispitnog) brojila i vatmetra W (koji služi za udešavanja opterećenja s faktorom učina ispod 1) ne priključuju direktno u seriju sa strujnim svicima grupe istraživanih brojila B_1 do B_k za nominalno E_n volta i I_n ampera, nego preko naročitoga vanredno preciznoga mjernog transformatora T_2 sa »stepenasto« promjenljivim brojem zavoja na primarnoj strani. Tako, usprkos različitih struja $\frac{1}{n}I_n, \frac{1}{2}I_n$ itd. kroz primarni namotaj od T_2 i kroz B_1 do B_k , kroz B_0 , W i ampermetar A teče uvijek jednaka struja, recimo struja

$I_0 = 5$ A, za koju A, B_0 i W mogu biti naročito precizno adjustirani. Struja I_n i njezini dijelovi, naznačeni u slici, crpe se sekundarno iz transformatora T_1 , primarno priključenoga na izmjeničnu mrežu stezaljkama 1—2; odvojci sekundarno na tom transformatoru tako su odabrani da, kad se uz utaknuti čep kod $1/I_n$ otporom R (i prikladno odabranim brojem zavoja primarno u T_1) udesi sa $I_0 = 5$ A nominalna struja I_n kroz B_1 do B_k samim premještanjem toga čepa iz položaja $1/1$ u položaje $1/2$, $1/10$ i $1/20$, struja opterećenoga brojila B_1 do B_k postizava pripadne dijelove nominalne struje I_n , a da ipak kroz A, B_0 i W teče u svim slučajevima jednaka struja $I_0 = 5$ A.

Naponske grane vatmetra W, te brojila B_0 i B_1 do B_k mogu se priključiti kao obično kod transformatorskih spojeva za umjetno opterećenje (preko zakretnoga transformatora kao pomicatelja faza).

Otporom R_0 , uz čep utaknut kod a , određuje se najmanje opterećenje kod kojega brojila B_1 do B_k kreću.

Kod ispitivanja uz opterećenja s faktorom učina manjim od 1 postupa se tako da se željeni $\cos\varphi$ udesi s pomoću otklona vatmetra. Ako se na pr. želi ispitivati uz polovicu nominalne struje I_n i uz $\cos\varphi = 0,5$, utakne se čep kod $1/2$ i sekundarna struja transformatora T_2 dotle se udešava dok A ne pokaže $I_0 = 5$ A. A onda se rotor pomicatelja faza vrti i time se mijenja otklon vatmetra W; iznos $\cos\varphi = 0,5$ postignut je, kad otklon vatmetra W padne na polovicu maksimalnoga otklona koji se vrtnjom rotora dađe udesiti. Uz ovo udešenje B_0 ide još uvijek s polovicom brzine, ma da je opterećenje brojila B_1 do B_k udešeno na četvrtinu nominalnoga. Mogu se i podaci vatmetra W kombinirati s podacima ure upotrebiti kod ispitivanja brojila po metodi jednakoga opterećenja.

Računske operacije kod mjerenja opisanim »jednostavnim« postupkom jednakoga opterećenja nisu nikako komplicirane (lako slijede proširenjem računa uz primjer III) u J-22.; radi se obično sa 40 ili 60 okretaja baš ispitivanoga egzemplara brojila B_1 do B_k da iziđu jednostavne relacije). No proširenjem ove metode, odnosno naročitom izvedbom skala brojila B_0 uspjelo je uopće izbjeći svako računanje, budući da se pogriješka u % očitava direktno na jednoj od šest naročito izvedenih »postotnih skala«, koje se već prema pojedinim slučajevima mjerenja fiksiraju u određeni položaj prema glavnoj skali brojila B_0 (v. na pr. ATM Z 733—6).

K) DODACI

Uz A-5.:

1. Prije donošenja definicija osnovnih četvorki obaju ekvivalentnih sistema m-kg-s-A i V-A-s-m, te sistema V-A-s-cm, treba primijetiti da će se pri tom kod definicije (apsolutnog) ampera A primjenjivati pojam jedinice sile »njutn« N, a kod definicije (apsolutnog) volta V pored pojma ampera A upotrebljavat će se i pojam jedinice snage (učina) vat W. Nije nedosljedno to upotrebljavanje N i W, iako N dolazi kao izvedena jedinica kgm/s^2 odnosno VAs/m u sistemima m-kg-s-A i V-A-s-m (u sistemu V-A-s-cm jedinica sile VAs/cm je stotruko veća od N), a slično i W figurira kao kgm^2/s^3 odn. VA, kako se to slijedi uvidom u redne brojeve 8. odn. 11. Tabele IX. donesene na iduće dvije stranice.

Puni (na osnovnim četvorkama izgrađeni) sistemi iz Tabele IX. mogu se naime također zamišljati u neku ruku »naslonjeni« na parcijalni »apsolutni« sistem mehaničkih CGS-jedinica (baziran na tri mehaničke jedinice cm-g-s), u komu sistemu jedinica sile $\text{g}\cdot\text{cm/s}^2$ (zvana i din) i jedinica snage $\text{g}\cdot\text{cm}^2/\text{s}^3$ (zvana i erg/s) izlaze iz mehaničke trojke cm-g-s. Prema tomu ni relacijom $1\text{ N}=10^5$ dina uvedeni (apsolutni) N kao i relacijom $1\text{ W}=10^7$ erg/s uvedeni (apsolutni) W ne ovise o električkim veličinama jakosti struje i električnom naponu, i zato ni o njihovim jedinicama A i V, pa se ove moglo slobodno definirati pozivajući se na N odnosno na W.

2. Uzimajući N i W kao već uvedene na gornji način iz CGS, lako će biti razumjeti ove definicije osnovnih četvorki punih koherentnih sistema m-kg-s-A i V-A-s-m odn. V-A-s-cm:

I. OSNOVNE JEDINICE m-kg-s-A-sistema

a) **metar** (m): jedinica duljine, definirana razmakom kod 0°C između dvije crte na prototipu metra iz PtIr, čuvanomu u Sevresu (kraj Pariza) i internacionalno usvojenomu g. 1889.;

b) **kilogram** (kg): jedinica mase, definirana masom PtIr-prototipa iz Sevresa, usvojenoga g. 1889.;

c) **sekunda** (s): jedinica vremena, 86400-ti dio »srednjega sunčanog dana«;

d) **amper** (A): jedinica jakosti struje, definirana stalnom strujom kroz svaki od dva tanka, beskonačno duga, paralelna i 1 m razmaknuta vodiča u vakuumu, uz koju djeluje sila između obih vodiča $0,2\cdot 10^{-6}$ N po metru duljine sistema vodiča.

II. OSNOVNE JEDINICE V-A-s-m-sistema

a) **volt** (V): jedinica električkoga napona i elektromotorne sile (EMS), definirana stalnim naponom vodiča koji pri struji 1 A troši snagu 1 W;

b) do d): **amper**, **sekunda** i **metar**: kao pod I. d), I. c) i I. a).

III. OSNOVNE JEDINICE V-A-s-cm-sustava

a) do c): **volt** kao pod II. a), **amper** kao pod I. d), **sekunda** kao pod I. c);

d) **centimetar** (cm): jedinica duljine, 100-ti dio metra iz I. a).

3. Kako se sad dalje iz uvedenih po I. do III. osnovnih četvorki dobivaju pripadne izvedene jedinice, pokazuje već gore spomenuta Tabela IX.:

Tabela IX.:

NAJVAŽNIJE VELIČINE I NJIHOVE JEDINICE u koherentnim sistemima

Redni broj	Veličine	Oznake	A) Jedinice u ekvivalentnim sistemima m-k-g-s-A (MKSA) odn. V-A-s-m			
			Imena jedinica	Kratice	Jedinice dimenziono izražene u sistemu m-k-g-s-A (MKSA)	Jedinice dimenziono izražene u sistemu V-A-s-m
1	masa	m	kilogram	kg	osnovne jedinice sistema m-k-g-s-A (MKSA)	$VA s^2/m^3$
2	duljina	l, s	metar	m		osnovne jedinice sistema V-A-s-m
3	vrijeme	t	sekunda	s		
4	jakost elektr. struje	I	amper	A		
5	elektr. potencijal elektr. napon; EMS	V, U, E	volt	V	$kg m^2/As^3$	
6	brzina (linearna)	$\vec{v}$	metar na sek.	m/s	m/s	m/s
7	akceleracija (linearna)	$\vec{a}$	metar na sek. po sekundi	m/s ²	m/s ²	m/s ²
8	sila	$\mathcal{P}$	njutn	N	$kg m/s^2$	$VA s/m$
9	moment vrtnje	$\mathcal{M}$	njutn-metar (džul)	Nm (J)	$kg m^2/s^2$	$VA s$
10	radnja, rad energija	A, W, E, W	vatsekunda, džul	Ws, J	$kg m^2/s^2$	$VA s$
11	snaga, učin	N	vat	W	$kg m^2/s^2$	VA
12	množ. elektriciteta, el. naboj tok gustoće el. pomaka; el. tok	Q, Ψ	ampersekunda, kulon	As, C	As	As
13	električki otpor (rezistancija)	R	om	Ω	$kg m^2/As^3$	V/A
14	jakost elektr. polja	$\mathcal{E}$	volt po metru	V/m	$kg m/As^2$	V/m
15	gustoća elektr. pomaka (elektř. pomak)	$\mathcal{D}$	ampersekunda po kv. metru	As/m ²	As/m ²	As/m ²
16	dielektrička polarizacija	$\mathcal{M}_e$	ampersekunda po kv. metru	As/m ²	As/m ²	As/m ²
17	jakost magn. polja	$\mathcal{H}$	amper po metru	A/m	A/m	A/m
18	magnetska indukcija (gustoća magn. toka)	$\mathcal{B}$	tesla	T	kg/As^2	Vs/m^2
19	tok magn. indukcije (magn. tok)	Φ, Ψ	voltsekunda, veber	Vs, Wb	$kg m^2/As^2$	Vs
20	magn. polarizacija	$\mathcal{M}_m$	tesla	T	kg/As^2	Vs/m^2
21	magn. napon, MMS	$U', \Theta (v I)$	amper (amperzavoj)	A (AZ)	A	A
22	magn. otpor (reluktancija)	$\mathcal{R}$	amper po voltsekundi	A/Vs	$A^2 s^2/kg m^2$	A/Vs
23	kapacitet	C	farad	F	$A^2 s^4/kg m^2$	As/V
24	induktivitet	L, M	henri	H	$kg m^2/As^2$	Vs/A
25	influciona konstanta (aps. diel. konstanta vakuuma)	ϵ_0	ampersekunda po voltmetru	As/Vm	$A^2 s^4/kg m^3$	As/Vm
26	indukciona konstanta (aps. m. permeabilnost vakuuma)	μ_0	voltsekunda po ampermetru	Vs/Am	$kg m/A^2 s^2$	Vs/Am

Primjedba: Psihološke jedinice kao kandela, lumen, luks, fon i sl. te jedinice kao rentgen, kiri itd. su izvan sistema pod A) odn. B)

m-kg-s-A odn. V-A-s-m (i u V-A-s-cm), te numeričke veze s ESJ, EMJ itd.

Redni broj	B) Jedinice u sistemu V-A-s-cm			Veze jedinica pod B) s jedinicama pod A) (Identičnost jedinica naznačivana sa: B=A)	Glavne numeričke veze jedinica sistema pod A) s jedinicama mehan. sist. CGS i na CGS (po A-54., C-27., C-39. itd.) nastojenima ESJ odn. EMJ, veze s mehaničkim stavim (tj. jedinicama STJ), te drugi podaci
	Imena jedinica	Kratice	Jedinice dimenziono izražene u sistemu V-A-s-cm		
1	V-A-s-cm-jedinica mase	VAs ² /cm ³	VAs ² /cm ³	$1 \text{ VAs}^2/\text{cm}^3 = 10^4 \text{ kg}$	Masa: 1 kg (=mase) = 1000 g (CGS) = 6,102 STJ mase; u A-14. uvedeno: AJM odgovara 1,66·10 ⁻²⁷ kg
2	centimetar	cm	osnovne jedinice sistema V-A-s-cm	$1 \text{ cm} = 10^{-2} \text{ m}$	Jab. el. struje: 1 A = 0,1 EMJ ≈ 3·10 ⁹ ESJ
3	sekunda	s		B = A	El. napon: 1 V = 10 ⁸ EMJ ≈ 1 ESJ
4	amper	A		B = A	Sila: 1 N = 10 ⁵ dina (CGS) = 0,102 kg*(kg-sila ili kilopend; STJ)
5	volt	V		B = A	Mom. vrtnje: 1 N·m = 10 ⁷ din·cm (CGS) = 0,102 kg*m (STJ)
6	centimetar na sekundu	cm/s		$1 \text{ cm/s} = 10^{-2} \text{ m/s}$	Radnja i energija: 1 J = 10 ⁷ erga (CGS) = 0,102 kg*m (= 0,239 cal)
7	centim. na sek. po sekundi	cm/s ²	cm/s ²	$1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$	Snaga (učin): 1 W = 10 ⁷ erg/s (CGS) = 0,102 kg*m/s (STJ)
8	V-A-s-cm-jedinica sile	VAs/cm	VAs/cm	$1 \text{ VAs/cm} = 10^4 \text{ N} (= 10^4 \text{ VAs/m})$	Množina el. (el. naboja): 1 As = 0,1 EMJ ≈ 3·10 ⁹ ESJ
9	V-A-s-cm-jed. momenta vrtnje (džul)	Ws (J)	VAs	B = A	El. otpor: 1 Ω = 10 ⁹ EMJ ≈ 1 ESJ
10	vatsekunda, džul	Ws, J	VAs	B = A	Recipročna vrijednost el. otpora zove se elektr. vodljiv. vrijednost. Otporu R u Ω (= V/A) odgovara vodljiva vrijednost 1/R u recipročnim omima Ω ⁻¹ (= A/V). Za Ω ⁻¹ uobičajeni su oznaki i naziv S (siemens). Glede specifič. otpora (otpornosti, rezistivnosti) i glede specifične vodljive vrijednosti (vodljivosti, konduktivnosti) vidi B-19. do B-21. Kod izmj. struja glede uvijek recipročnih veličina prividnog otpora Z i prividne vodljive vrijednosti Y, i glede veza između njihovih komponenta R-X odn. G-B vidi pobliže u poglavlju E)
11	vat	W	VA	B = A	Jakost magn. polja: 1 A/m = 4π·10 ⁻³ Oe (EMJ)
12	ampersekunda, kulon	As, C	As	B = A	Magn. indukc. : 1 T = 1 $\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$ = 10 ⁴ G (EMJ)
13	ohm	Ω	V/A	B = A	Tok magn. indukcije: 1 Wb = 10 ⁸ M (EMJ)
14	volt po centim.	V/cm	V/cm	$1 \text{ V/cm} = 10^4 \text{ V/m}$	Magn. polarizacija: 1 T = 10 ⁴ G (EMJ)
15	ampersek. po kv. centimetru	As/cm ²	As/cm ²	$1 \text{ As/cm}^2 = 10^4 \text{ As/m}^2$	Za magnetiziranja (ili intenzitet magnetiziranja) jedinica je ista kao za jakost magn. polja (v. C-80.)
16	ampersek po kv. centimetru	As/cm ²	As/cm ²	$1 \text{ As/cm}^2 = 10^4 \text{ As/m}^2$	Kapacitet: 1 F = 10 ⁻⁹ EMJ ≈ 9·10 ¹¹ ESJ (cm)
17	amper po centimetru	A/cm	A/cm	$1 \text{ A/cm} = 10^4 \text{ A/m}$	Induktivitet: 1 H = 10 ⁹ EMJ (cm) ≈ 9·10 ¹¹ ESJ
18	voltsek. po kv. centimetru	Vs/cm ²	Vs/cm ²	$1 \text{ Vs/cm}^2 = 10^4 \text{ Vs/m}^2$	U mehan. sistemima CGS i STJ tri osn. veličine i jedinice jesu: u CGS duljina l cm, vrijeme t s, masa l g; u STJ duljina l m, vrijeme t s, sila l kg*(kg-sila, kilopend)
19	voltsekunda, veber	Vs, Wb	Vs	B = A	Influencijska konstanta ε ₀ ima u sistemima pod A) vrijednost 8,854·10 ⁻¹² As/Vm, u sistemu pod B) vrijedn. 0,08854·10 ⁻¹² As/Vcm; kod upotrebe ESJ uzimati je numerički iznos 1.
20	voltsek po kv. centimetru	Vs/cm ²	Vs/cm ²	$1 \text{ Vs/cm}^2 = 10^4 \text{ Vs/m}^2$	Induktivna konstanta μ ₀ ima u sistemima pod A) vrijednost 0,4π·10 ⁻⁶ Vs/Am, u sistemu pod B) vrijednost 0,4π·10 ⁻⁶ Vs/Am; kod upotrebe EMJ uzimati je numerički iznos 1.
21	amper (amperzavoj)	A (AZ)	A	B = A	Potenci jol:
22	amper po voltsekundi	A/Vs	A/Vs	B = A	1 Ah = 3600 As
23	farad	F	As/V	B = A	1 kWh = 860000 cal ≈ 860 kcal = 367000 kg*m
24	henri	H	Vs/A	B = A	1 KS (= 1 PS) = 75 kg*m/s = 736 W
25	ampersekunda po voltcentim.	As/Vcm	As/Vcm	$1 \text{ As/Vcm} = 10^4 \text{ As/Vm}$	HP = 746 W
26	voltsekunda po ampercentim.	Vs/Acm	Vs/Acm	$1 \text{ Vs/Acm} = 10^4 \text{ Vs/Am}$	

Tabela IX. preuzeta je iz:

Dr. J. Lončar, OSNOVI ELEKTROTEHNIKE. KNJIGA I., Zagreb, 1956.

Upućivanja kao A-54. i sl. u zadnjem stupcu Tabele IX. odnose se na ovu knjigu.

Uz A-9.:

4. Internacionalni Westonov normalni element građen je, po shemi u sl. 281., s pozitivnom elektrodom 1 iz žive i s negativnom 5 iz amalgama kadmija i žive (s 12,5% kadmija). Elektrode su u zasićenoj otopini 6 kadmijeva sulfata. Elektroda 1 prekrivena je »depolarizacionom« pustom 2 s kristaličima merkurosulfata i kadmijeva sulfata. Dodani su još iznad 2 sloj 3 i iznad 5 sloj 4 kristalâ kadmijeva sulfata (zbog osiguranja zasićenosti otopine).

Pri radu s nekadanjim internacionalnim voltom V' iz 1908. pridavao se proizvedenom naponu ovog elementa kod 20°C iznos 1,0183 V' .

Uz A-10. a):

5. Dosljedno bi se uz V-A-s-m u formulu otpora $R=\rho l/q$ nekog vodiča duljine l i presjeka q stavljala duljina u m i presjek u m^2 , u kom slučaju bi očito na jedinicu duljine i jedinicu presjeka preračunati otpor, veličina zvana »specifički otpor« ili »otpornost« ρ materijala iz koga je vodič, morala biti izražena u $\Omega \cdot m^2/m (= \Omega \cdot m)$, da bi se dobio R u Ω . Slično bi se uz V-A-s-cm dobilo R u Ω pri l u cm i q u cm^2 uz ρ u $\Omega \cdot cm^2/cm (= \Omega \cdot cm)$. No u elektrotehničkoj praksi zaostao je običaj da se, i uz V-A-s-m i uz V-A-s-cm, u formulu otpora stavlja l u m i q u mm^2 , pa, da R ipak iziđe u Ω , upotrebljava se κ u $\Omega \cdot mm^2/m$. Prema tomu, ako se ništa dalje ne kaže, treba uzimati da je ρ dano u $\Omega \cdot mm^2/m$ (i to za 20°, tako da i R izlazi za tu temperaturu). Slično je kod »vodljive vrijednosti« $G=1/R$ izražavane u simensima S (=recipročnima omima Ω^{-1}) i kod »specifičke vodljive vrijednosti« ili »vodljivosti« $\kappa=1/\rho$: kod prve bi se dosljedno u formulu $G=\kappa q/l$ uz V-A-s-m unosilo l u m i q u m^2 te κ u $S \cdot m/m^2 (=S/m)$. No redovito se u elektrotehničkoj praksi, bar kod metalnih vodiča, radi s κ u $S \cdot m/mm^2$ uz l u m i q u mm^2 , što daje G u S .

Ipak se često kod elektrolitičkih vodiča (kod mjerenja više fizikalno ili kemijski, no i elektrotehnički važnih) iznosi ρ odn. κ daju u $\Omega \cdot cm$ odn. S/cm , pa onda za G u S treba raditi sa l u cm i q u cm^2 (dakle dosljedno u V-A-s-cm); v. na pr. u E-70. κ -iznose (kod 20°C) u S/cm za četiri elektrolitičke tekućine.

Ova je primjedba bila potrebna, jer se zanemarivanjem razlikâ na pr. vodljivosti κ danih jednom u $S \cdot m/mm^2$ i drugiput u S/cm može lako krivo zaključivati. Tako bi netko, uspoređujući vodljivost ekstremno čistog Cu danu iznosom 62 i onu 30%-ne H_2SO_4 danu sa 0,7645 (v. E-70.), i zaboravljajući da je prva mišljena u $S \cdot m/mm^2$ i druga u S/cm , krivo zaključio da odlično vodljivi metal Cu samo 62/0,7645-struko ili 81-struko bolje vodi od praktički najbolje vodljive elektrolitičke tekućine s 30% H_2SO_4 i 70% vode, dok u stvari Cu bolje vodi čak 81000-struko (jer je na S/cm preračunata vodljivost Cu iznosa 620000).

6. Influenciona konstanta ϵ_0 vezana je se dielektričkim konstantama pojedinih dielektrika (izolatora), apsolutnom ϵ i relativnom ϵ' , relacijom: $\epsilon=\epsilon_0\epsilon'$. Slično je indukciona konstanta μ_0 vezana s magnetskim permeabilnostima pojedinih tvari, apsolutnom μ i relativnom μ' , relacijom $\mu=\mu_0\mu'$. Konkretno to znači da na pr. u dielektrikumu s $\epsilon'=5$ pri danom električkom polju F vlada »gustoća električkog pomaka« D ϵ' -struko (specijalno: 5-struko) veća od gustoće D_0 koja bi se pri istom polju F uspostavila u vakuumu, odn. da slično na pr. u željezu sa $\mu'=1800$ pri magnetskom polju H vlada magnetska indukcija B μ' -struko (specijalno: 1800-struko) veća od indukcije B_0 koju bi isto polje H proizvelo u vakuumu.

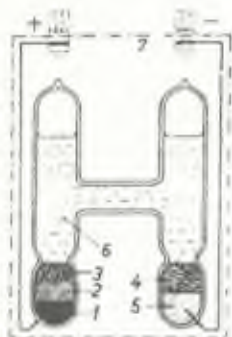
Kako prema rečenomu očito treba vakuumu pripisivati $\epsilon'=\mu'=1$, bit će razumljivo da se ϵ_0 odn. μ_0 katkad nazivaju i »apsolutna dielektrička konstanta vakuuma« odn. »apsolutna permeabilnost vakuuma«.

Uz A-11.

7. Umjesto kod nas malo poznatih »frakturnih« slova mogu za naznaku vektora služiti i velika slova »pisanog« pisma ili velika uspravna »polu-debelo« štampana slova, pa i (tipografski manje prikladne) oznake strjelicom, crticom i sl. iznad ili ispod slova koje predstavlja iznos vektora.

Uz B-7.

8. Osim s potkovastim »vanjskim« permanentnim magnetom danas se instrumenti s pomičnim svitkom sve više izvode i s permanentnim magnetom cilindričnog oblika, korespondentnog jezgri iz mekog željeza klasičnih konstrukcija po sl. 2. na str. 17. i smještenog u mjerni sistem namjesto ove potonje. Ovakav »jezgrasti« magnet, magnetiziran u određenom smjeru okomitom na njegovu os, okruži se koaksijalnim plaštem iz mekog željeza, i kroz ovaj se, u dvije grane, zatvara magnetom proizvedeni magnetski tok. Tako nastaju otklonske sile na strujom protjecani vrtivi svitak 3, smješten po sl. 282. s njegove dvije stranice u magnetska polja unutar obje uzdušne pukotine između magneta 1 i plašta 2, probadane magnetskim linijama pri prelazima toka iz 1 u 2, i natrag iz 2 u 1. Vide se na sl. 282. i kazalo 4 te skala 5. Izvedba: H&B.



Sl. 281.



Sl. 282.

9. Zapravo su ove vrlo kompaktne konstrukcije s jezgrastim magnetima praktički omogućene tek dolaskom novih odličnih materijala za permanentne magnete (Al-Ni-čelici i Al-Ni-Co-čelici), jer se s ovima mogu postizavati jaka magnetiziranja čak i vrlo kratkih magneta. Mogu se uostalom s novim materijalima graditi i vanredno precizni, te osjetljivi (a time i malena vlastitog potroška) instrumenti tipa pomičnog svitka s »vanjskim« magnetima, kao kod magnetskog kruga po sl. 283., na kojoj su 1' i 1'' kratki Al-Ni-magneti ili Al-Ni-Co-magneti, 2' i 2'' polni nastavci iz mekog željeza, te 3 odn. 4 jaram odn. jezgra, također iz mekog željeza (dijelovi 5 i 6, iz nemagnetskog metala i tvrdo pajani sa 2' i 2'', osiguravaju stalan razmak između 2' i 2'').

U pogledu konstrukcija s jezgrastim magnetom treba još reći da se kod njih već teže, i tek uz prikladne dodatne mjere, postizavaju za jednolikost skale poželjna polja iste magnetske indukcije B u širim područjima obih uzdušnih pukotina. Kod instrumenata s unakrsnim svi-cima po B-44. i B-45. nejednolika raspodjela toka čak se prihvaća, jer ne smeta. No uzimajući u obzir jednostavnost konstrukcija s jezgrastim magnetom, one s bar uglavnom jednolikom raspodjelom toka magnetskog polja mnogo se odabiru i za gradnju običnih instrumenata sa samo

jednim pomičnim svitkom. A i kod galvanometarskih sistema, gdje se pri razvučenoj skali može izlaziti i s manjim maksimalnim otklonima sistema, jezgrasti tip se vrlo mnogo primjenjuje.

Uz B-11.

10. Vrlo velik napredak donijelo je sve šire uvođenje »vrpcom napetih« otklonskih sistema raznih kategorija. Prema današnjoj više diferenciranoj terminologiji na pr. kod instrumenata s vrtivim svitkom od starijih sistema sa samo jednostrano na gornji kraj svitka apliciranom vertikalnom torzionom metalnom vrpcom (koja ujedno čini i gornji priključak svitka, uz donji priključak više slobodan i netorziono realiziran), dakle kod sistema doista tek jednostrano »na vrpce obješenih« poput onoga na sl. 6. na str. 21., treba razlikovati novije većom ili manjom duljinom (u dva odsječka porazdijeljene) torzione vrpce obostrano napeto (nategnuto) nošene, dakle kako se danas kaže »vrpcom napete« sisteme. Takav je sistem po sl. 282., napet odsječcima 7' i 7'' torzione vrpce učvršćenima na oba kraka 6' i 6'' nosača 8 (a i sustav po sl. 5. na str. 21. *danas* će se zvati »vrpcom napeti«).

Dok se instrumenti s obješenjem na vrpce moraju graditi s libelom i vijcima za točno postavljanje svitka u ispravan položaj, te s uređajem za aretiranje pri transportu ili neupotrebljavanju instrumenta, kod vrpcom napetih instrumenata, nešto manje osjetljivih od najosjetljivijih na vrpce obješenih izvedbi, no vrlo robustnih, može se izići bez libele i aretiranja (izvedeni s prikladnim »preuzimačima udaraca« ovi se instrumenti mogu čak bacati na pod, pa da ne budu oštećeni!).

11. Osim najosjetljivijih zrcalnih galvanometara, koji se još uvijek izvode s obješenjem na dugim vrpčama, danas se izvode vrpcom napeto ne samo tek malo manje osjetljivi zrcalni galvanometri, na pr. oni sa svjetlosnom markicom, nego vrlo mnogo i normalni instrumenti s kazaljkom, kakvi su se prije isključivo gradili s ležajima sa šiljcima i spiralnim perima za proizvođenje torzionog protumomenta.

U početku su se izvodili samo osjetljivi prenosni instrumenti napeti vertikalnom vrpcom, i po tom s kazaljkom gibanom u horizontalnoj ravni, dakle instrumenti za »horizontalnu« upotrebu. No kraj vanrednih prednosti vrpcom napetih sistema brzo se ove nastojalo uvesti i u instrumente za »vertikalnu« upotrebu, dakle s ležajima realiziranim horizontalnom napetom vrpcom, kakvi se traže na pr. za rasklopne ploče. Napeti dugom horizontalnom vrpcom sistemi bi se međutim izvjesili« prema dolje. No kako su se kod manjih osjetljivosti pokazale dovoljne i kvalitetne kratke vrpce, danas se i obični vertikalni instrumenti izvode »kratko« napeti horizontalnom vrpcom.

Danas se, pored prvobitno jedino vrpcom napeto građenih instrumenata s pomičnim svitkom i s unakrsnim svicima (i većinom odmah izvađenih i s jezgrastim magnetom), već susreću i drugi vrpcom napeti mjerni sistemi poimence oni s mekim željezom (elektromagnetski) i elektrostatski. Dakako da se na širu upotrebu vrpcom napetih sistema moglo misliti tek nakon dolaska novih materijala za vrpce, velike čvrstoće i prije nedostignutih elastičnih svojstava. Zapravo se dadu zamisliti i okruglom žicom napeti sistemi, no mehanički su, uz ista torziona svojstva, vrpce višestruko čvršće.

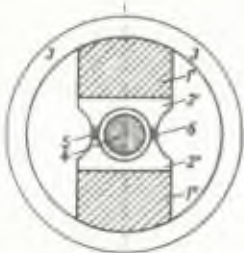
12. Velike su prednosti vrpcom obješenih i vrpcom napetih sistema da oni reagiraju već na najmanje struje, dok se sistemi sa šiljcima u ležajima počinju otklanjati tek kad moment vrtnje od struje dosegne iznos dovoljan da se svladaju sile trenja u oba ležaja; slično se vrpcom obješeni sistemi otklanjaju do pravih otklona pri raznim strujama, dok se klasični sistemi zbog trenja, katkad sa zamjetljivim zapinjanjem, zaustave malko odmaknuto od pravog položaja (u takvim se slučajevima

blagim udaranjem po instrumentu ukloni zapinjanje). Iako su kod najpompnije izvedenih ležaja i oštro brušenih šiljaka ove pogriješke klasičnih izvedbi zanemarivo neznatne, one se duljom upotrebom instrumenta, pogotovo ako ovaj ima da podnosi trešnje, padove ili prejake otklone zbog preopterećenja, mogu zbog kvarenja ležaja i otupljenja ili deformiranja šiljaka, osobito kod nježnih osjetljivih sistema, neugodno povećavati, dok kod robustnih vrpcom napetih sistema tih poteškoća nema. Jedino je potrebno kod ovih potonjih paziti, a to je danas moguće, da se napinjanja realiziraju suvremenim kvalitetnim vrpčama s po mogućnosti zanemarivim »elastičnim naknadnim djelovanjem«, zbog koga se sistem nakon velikog otklona pripadnom strujom ne bi nakon iskopčane te struje natrag povratio posve na nulu skale.

Uz B-23.

13. Doneseni izvod, da će kod nižih frekvencija vatmetar sa skalom baždarenom istosmjernim iznosima struje I_0 i napona E_0 , i po tom snage $E_0 I_0$, točno mjeriti izmjenične snage $E I \cos \varphi$, vrijedi uz dodatnu ogradu da se mogu zanemariti međuinaktivni utjecaji strujnog svitka na naponski, pa treba i o tom voditi računa kod gradnje instrumenta.

14. Postotne pogriješke pri kraju B-23. slijede iz formule (I), izvedene u G-7. Nebitno je naime da li je pogriješka za kut δ nastala nesavršetnošću vatmetra, kako je u B-23. pretpostavljano, ili kutnom pogriješkom prenosa mjernih transformatora, kao u G-7. U pogledu pogriješke samog vatmetra zbog malog induktiviteta u naponskoj grani treba primijetiti da se po E-14. prikladnim paralelno dodanim kondenzatorom može kompenzirati utjecaj induktiviteta grane s mnogo radnog otpora i malo induktiviteta, time da se udesi da vremenska konstanta uvedena u E-14. praktički iščezava.



Sl. 283.



Sl. 284.

Uz B-34.

15. Mnogo su vrijedni elektrostatski instrumenti i za mjerenja neznatnih *mnogo* elektriciteta. Tako se danas, pri radu s ionizirajućim radijacijama (na pr. s rentgenskim i gama zrakama), mnogo upotrebljavaju »džepni dozimetri«, oblikom slični naliv-perima. Oni sadrže elektrometarski sistem sa stremenom iz vanredno nježne, s Au, Pt ili sl. »metalizirane«, kvarcne niti, koja se kod električki sa recimo oko 200 V nabijenog sistema nađe odmaknuta, zbog odbijanja kvarcnog stremena od istoimeno nabijenog čvrstog stremena iz deblje žice, na položaj uziman kao »položaj nula«. Kako je ovaj sistem izolirano smješten u zatvorenoj cjevastoj »ionizacionoj komorici«, na pr. iz tankog Al-lima, koja ujedno čini i kućište elektrometra, kad utjecajem određene »doze« radijacija dođe do ionizacije uzduha u komorici, nabojem pripadnim stvorenoj količini parova iona izbije se nabijeni elektrometar već prema

primljenoj dozi radijacija, izražavanoj u r (rentgenima) ili mr (milirentgenima), i kvarni stremen izvede korespondentni pomak s položaja nula do nekog položaja manjeg naboja, s time da taj pomak naznačuje mjerenu dozu. Primjenom daljih doza proizvode se pripadni dodatni pomaci, tako da instrument i sumira višekratno primjenjivane doze unutar duljih vremenskih intervala. Pomaci kvarcnog stremena mogu se dobro praliti na malom ugrađenom mikroskopu s okularskalom, na kojoj se čak odmah neposredno naznače iznosi r ili mr . Nakon svakog izbijanja dozimetar se može prikladnom napravom za nabijanje ponovno dovesti u položaj 0 r (mr), da može dalje sabirajući mjeriti nove doze

Uz B-37.

16. Danas se, pored i dalje mnogo upotrebljavanog Graetzova spoja po sl. 26. i 27. na str. 38., mnogo primjenjuju i drugi ispravljački rasporedaji za vezu k instrumentu. Tako mosni spoj uz instrument G po sl. 284. ima samo dva ispravljača A_1 i A_2 , no i dva otpora R_1 i R_2 ; u slici je donesen rasporedaj s ovim spojem čak s više mjernih područja izmjeničnih struja i napona, s granom serijski povezanih nuzotpora Y_1 - Y_2 - Y_3 korespondentnih jednako označenima u sl. 107. na str. 108. i s grupom predotpora X_1 - X_2 - X_3 . A ima na ovom dosta suptilnom području i drugih ispravljačkih spojeva, na pr. onih s mjernim transformatorima (strujnim odn. naponskim).

17. U pogledu tipa upotrebljenih ispravljača može se reći da se, kao odlični baš za mjerne naprave, još uvijek u ovima mnogo susreću Cu_2O -ispravljači. Ipak se u novije vrijeme mnogo grade univerzalni instrumenti s modernim poluvodičkim Ge -diodama sa šiljkom, koje se pored svoje vremenske konstantnosti odlikuju i vrlo malim vlastitim kapacitetom, pa se s njima građeni instrumenti zbog smanjenih kapacitivnih nuzefekata mogu upotrebljavati do frekvencija od vrlo mnogo kHz dok se s Cu_2O -ispravljačima ne može ići preko kojih 10 kHz. Naprotiv diode sa Si dosad još nisu jače prodrle u mjernu tehniku, a za Se -ispravljače, iako inače vrlo dobre za druge primjene, može se reći da ni ne mogu na području mjernih naprava konkurirati drugim tipovima ispravljača.

Uz B-56. i B-57.

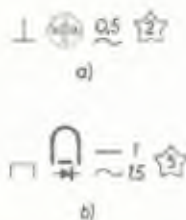
18. Pravila za mjerne sprave, internacionalna IEC i nacionalna, mijenjala su se dosta prošlih godina, s time da su detaljnije razrađena nacionalna pravila prilagođivana više općenitim IEC-pravilima. Od njemačkih pravila upravo su stupila na snagu pravila VDE 0410/10.59 umjesto dosadanjih VDE 0410/1.53. Najbitnije za ova novija pravila prema stanju po Tabeli V. na str. 56. jesu novo dodane klase: klasa 0.1 ekstremno preciznih instrumenata na bazi dopuštene pogreške od samo 0,1% ili 1% («promille-instrumenti») i klasa 5 vrlo grubih instrumenata na bazi pogreške 5%; usporedi još i klasifikaciju: «precizni instrumenti» klasa 0,1—0,2—0,5 i «pogonski instrumenti» klasa 1—1,5—2,5—5. I u odnosu prema simbolima po sl. 52. na str. 57. ima danas premjena (uvedeni su na pr. simboli za instrumente s vrtivim magnetom u polju jednog svitka ili para unakrsnih svitaka, te za «bimetalne» instrumente). A i oznake su djelomično drukčije nego prvobitno: na pr. — (a ne =) znači istosmjernu struju.

Za ilustraciju razlika prema nekadanjim oznakama po sl. 51. pod a) odn. b), koje se danas vide samo još na vrlo starim instrumentima, evo na sl. 285. pod a) ond. b) današnjih oznaka za dva instrumenta. Oznake pod a) se odnose na željezom zatvoreni elektrodinamski vatmetar klase 0.5 za upotrebu u «vertikalnom» položaju pri frekvencijama od 15 do 60 Hz (potonje se razumijeva samo sobom, ako uz sinusoidu koja nazna-

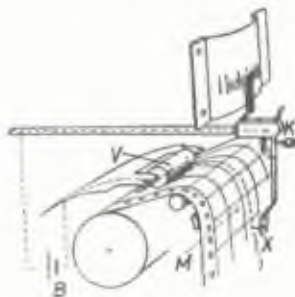
čuje izmjeničnu struju nema naznake frekvencija). A ispitni napon 2 kV, predviđen za instrumente pogonskih napona iznad 40 do 650 V, označen je bijelom zvjezdicom s brojkom 2 u njoj. Oznake pod b) predstavljaju instrument za »horizontalnu« upotrebu sistema s pomičnim svitkom i permanentnim magnetom s ugrađenim suhim ispravljačem, klase 1 kod istosmjernih mjerenja i klase 1,5 kod izmjeničnih mjerenja, s ispitnim naponom 5 kV (i po tom pogonskim iznad 650 do 1500 V). Zbog daljih detalja u odnosu na instrumente, kao i onih o mjernim transformatorima, električkim brojilima itd. čitalac će dakako konzultirati uvijek one pripadne propise koji budu u danom momentu na snazi.

Uz C-8. do C-10.

19. Često pri registriranju pojedinih pojava, na pr. promjena temperature mjerenih termoelementima, izvor struje ne daje dovoljno snage za neposredni pogon naprave za registriranje (ili čak reguliranje). U ovakvim slučajevima može se ispred naprave staviti »mjerno pojačalo«, koje upravljano slabim izvorom mjernih struja proizvodi mnogostruko više učina potrebnog za pogon registracionog uređaja. Spomenimo dva tipa takvih pojačala: »fotoelektričko« i »s titrajnim krugom«.



Sl. 285.



Sl. 286.

Kod prvog se tipa mjerna struja šalje kroz svitak zrcalnog galvanometra naročite konstrukcije, a svjetlost male sijalice reflektira se zrcalom galvanometra tako da kod različitih otklona galvanometra varira omjer svjetlosnih tokova što zgađuju dvije fotostanice u vezi s mrežicom (rešetkom) prikladne elektronske cijevi. To pak u daljoj konsekvenciji mijenja napon mrežice, a time i anodnu struju cijevi, već dovoljno jaku da tjera registracioni uređaj uključen u seriju s određenim »kompenzacionim otporom« u anodni krug cijevi. Sve se tako udesi da galvanometar, uz kompenziran mjerni napon padom napona na kompenzacionom otporu, zauzima kod raznih mjernih napona razne otklone, i po tom mrežica cijevi razne napone, te registracionim uređajem upravlja struje proporcionalne iznosima registrirane veličine.

Kod drugog tipa pojačala varira se, raznim položajima metalne zastavice pričvršćene na vrhu kazala specijalnog galvanometra, zaslanjanje, a time i stepen reakcionog djelovanja, anodnog svitka na mrežni svitak visokofrekventnog cijevnog oscilatora, čime se, proporcionalno registriranom signalu, varira intenzitet titranja tog oscilatora. A kako se dijelom energije tih titranja, nakon transformiranja i ispravljanja, tjera i opet registracioni uređaj, na koji je serijski nadovezan kompenzacioni otpor, prikladnom kompenzacijom pada napona na tom otporu i mjernog napona postizava se da registracije proporcionalno korespondiraju mjernom naponu.

20. Posljednjih godina mnogo je napretka postignuto u postupcima pisanja na registracionom papiru. Pored pisanja tintom perima starijih tipova, i usavršenim perima gdje na papir prelazi tinta iz sićušnog otvora na jednom kraju kapilarne cijevi koja svojim drugim krajem siše tintu iz posebnog rezervoara, danas se mnogo primjenjuju registracije s odstranjivanjem, šiljkom registracionog pera, vanredno tankog sloja bijelog voska s podloge od na pr. crnog ili crvenog papira (što daje crne odn. crvene linije na bijelom). A pogotovo su se proširile registracije na »metaliziranim« papirima. Kod ovih s na pr. crnog papira, isparivanjem u vakuumu prekrivenog vanredno tankim i relativno lako taljivim svijetlim metalnim slojem, odstranjuje se metal strujnom toplinom koja se stvara na mjestu doticaja šiljka pisara s metaliziranim papirom, tako da se dobivaju crne registracije na metalnoj traci. Kao izvor struje dovoljna je već baterija od nekoliko maljušnih suhih elemenata, koja može mjesecima davati potrebne neznatne struje, na pr. samo 2 uA pri već relativno velikoj brzini pomicanja 20 mm/s. Po sl. 286. struja teče iz baterije B crtkano naznačenim tokom na vrtivi ugljeni valjak V, prislonjen na metaliziranu površinu M, a s ove prelazi na šiljak X pisara, i zatim se preko kazaljke K vraća na bateriju B. Mogu se vršiti, s više sistema, i višestruke registracije na istom metaliziranom papiru.

Treba još spomenuti i svjetlosne registracije na prikladnim foto-papirima, koji pod utjecajem (prikladnom optikom točkasto koncentrirane) svjetlosti iz visokotlačne Hg-svjetiljke, potroška snage od samo 100 W, daju neposredno (a ne tek nakon razvijanja) pocrnenja fotografiskog papira. Pri slabijoj rasvjeti se linije odmah i motre, a za dulju upotrebu može se slika i fiksirati.

Uz C-12.

21. Na graničnom području između galvanometara i petljastih oscilografa pojavili su se nedavno specijalno brzo titrajući zrcalni galvanometri vrpcom napetog sistema i s pomičnim svitkom vanredno uskim prema njegovoj duljini (kao da je oscilografska petlja A na sl. 59. (str. 66.) izvedena s više zavoja umjesto s jednim). Vlastite frekvencije ovakvih sistema (koje se zajedno s polnim nastavcima dadu smjestiti u tanku cijev (vanjskim izgledom sličnu naliv-peru; odatle i ime »stylo-galvanometri« za ovakve sprave, prema francuskom: stylo = naliv-pero) mogu biti vrlo visoke, čak do stotina Hz, pa se njima mogu još dobro registrirati ne prebrzi jednokratni pojavi ili izmjenične struje niskih frekvencija. Tako se ovakvim napravama, koje se obično izvode s više sistema u zajedničkom raspoređaju i sa zajedničkim rasvjetnim uređajem, mogu bez ikakvih pojačala registrirati neposredno srčane struje (kardiogrami) i sl. što inače zahtijeva skupocjenije aparature.

Uz C-13. do C-17

22. Na području katodnih oscilografa napredak je, dijelom i povezano s usavršavanjem cijevi za slike u televizijskim prijemnicima i s napretkom elektronske mikroskopije, bio zadnjih godina vrlo velik i raznolik. Tako se danas, primjenom usavršene elektronske optike u visoko evakuiranim katodnim cijevima, upotrebom poboljšanih »vremenskih osi« s visoko evakuiranim elektronkama umjesto tiratronima, te s usavršenim »siropopajasnim pojačalima« za vertikalne i horizontalne otklone, kao i boljim svjetlucavim zastorima i znatno povišenim anodnim naponima, mogu graditi oscilografije koji daju vanredno oštre linije, te vjerno registriraju i ekstremno brze pojave. frekvencija sve do nekoliko MHz (megaherca). U pogledu postizavanja velikih brzina elektrona, da bi ovi dali na zastoru vanredno svijetle mrlje potrebne kod najbržih regi-

stracija, a da bi se istodobno sačuvalo dovoljno osjetljivosti sistema (t. j. prihvatljivo veliki pomaci mrlje na zastoru po jedinici napona), uveden je kod mnogih cijevi postupak stepenastog ubrzavanja: jednom anodom relativno nižeg napona ubrza se pramen elektrona prije prolaza kroz otklonski sistem cijevi, a već otklonjeni pramen se onda još naknadno ubrza na putu k zastoru dodatnom anodom mnogo višeg napona («anoda za naknadno ubrzavanje», «postdeflection anode»). Nastale svijetle linije na zastoru mogu se onda i kod najvećih brzina registracije fotografirati ili vrlo povećano projicirati, tako da danas već nije potrebno pribje-gavati ni kod najbržih registracija upotrebi hladnih katoda. A pogotovo je otpala upotreba rastavljivih cijevi, u koje se nekoć stavljalo foto-grafske ploče da ih elektroni neposredno eksponiraju. prema čemu danas otpadaju i ponavljana evakuiranja prije pojedinih snimaka ili grupa snimaka, odn. upotrebljavaju se danas stalno evakuirane i defini-tivno zatvorene cijevi.

Spomenimo još da se katkad želi snimati istodobno dva ili više pojava s jednom jedinom cijevi. Kod petljastih oscilografa u takvim se slučajevima uzme naprosto odgovarajući broj petlji uz zajednički optički i registracioni uređaj. A kod katodnih oscilografa umjesto dviju kompletnih cijevi mogu se upotrebiti cijevi s ugrađena dva katodno-cijevna sistema uz zajednički zastor, što omogućuje registriranja dvaju različitih pojava. No mogu se takva dvostruka registriranja postići i s običnom katodnom cijevi sa samo jednim sistemom, ali uz dodatak naročite elektronske aparature: «elektronske skretnice». Ova potonja u bitnosti sadrži spoj »multivibratora« (generatorski pravokutnih titraja), koji u prikladnom pojačalu aktivira. preko njihovih drugih mrežica, u brzom slijedu sad jednu sad drugu pentodu, na čije prve mrežice se pušta da djeluju jedan odn. drugi registrirani signal. Tako se na zastoru pojave krivulje obih signala, na pr. napona i struje nekog transformatora. S oscilografskom cijevi s dva sistema, i s po jednom elektronskom skretnicom uz svaki sistem, mogle bi se dakako istodobno promatrati ili registrirati četiri različita pojava.

Uz D-9.

23. Opišimo još i mjerenja Varleyovom metodom, koja se vrše po shemi u sl. 287. Specijalizirajmo odmah odnose na slučajeve jednakih. a time i iste duljine l i istog otpora R_0 , obih vodiča PQ i ST po sl. 80. odn. kabelskih žila PQ i ST na sl. 81., na dalekom kraju kratko spo-jenih prečkom TQ zanemariva otpora, dakle slučajeve koji su već kod Murrayeve metode dali u D-9. jednostavnu formulu $x = 2lR_4/(R_3 + R_4)$ za udaljenost x mjesta pogriješke od početka voda odn. kabela. Zami-slimo dakle u sl. 287., u kojoj neka i spoj KS bude zanemariva otpora, kabelski slučaj poput onoga na sl. 81., sa žilom PQ u spoju s nekom drugom žilom P'Q', te s PQ povezanom putem prečke TQ na kraju kabela sa zdravom žilom ST u petlju ukupnog otpora $2R_0$ (slučaj voda po sl. 80. tretirao bi se slično). Uzmimo još da smo prije glavnog mjerenja izmjerili $2R_0$ metodom običnog Wheatstoneova mosta (kao grane mosta mogu se uzeti petlja STQP te otpori R_0 , R_3 i R_4). Kod samog mjerenja po Varleyu omjer $m = R_1 : R_1$ otpora R_1 i R_3 u sl. 287. udesi se na neki stalan iznos i pomoćni otpor R_n , povezan u istu granu s otporom R_1 , dijela FM žile ispred mjesta pogriješke M, varira se dok nul-instrument G ne pokaže nulu struje. Uzimajući u obzir da očito dio MQ, otpora $R_0 - R_n$, žile s pogriješkom leži u istoj grani sa zdravom žilom otpora R_0 . očito će se, pri udešenom R_n , kao gore, moći pisati:

$$m = \frac{R_1}{R_3} = \frac{R_n + (R_0 - R_n)}{R_n + R_3}$$

i dalje (nakon uređenja):

$$R_x = \frac{2R_0 - R_0 m}{1 + m}$$

Iz ove se pak relacije može dalje, na bazi evidentne veze: $R_x : 2R_0 = x : 2l$, naći i izraz za udaljenost x mjesta pogriješke (sa $2R_0$ i $2l_0$ izmjerena odn. poznatima):

$$x = 2l \frac{2R_0 - R_0 m}{2R_0 (1 + m)} \quad (I)$$

Još više specijalizirano, pretpostavljajući $m = R_4 : R_3 = 1$, dakle radeći sa R_1 i R_1 kako to najčešće i biva, mjesto (I) može se pisati:

$$x = l \frac{2R_0 - R_p}{2R_0} \quad (I')$$

Mogu se uostalom metodom po sl. 287, vršiti i mjerenja eventualnih razlika otpora R_1 i R_2 dviju zdravih žila; u tom slučaju, uz R_1 stavljeno namjesto PQ, a (veći od R_1) otpor R_2 stavljen namjesto ST, uz uspostavljenju petlju STQP, te uz desni pol od B priključen ovaj put na TQ, pri $m = 1$ i R_p udešenom na nulu struje u G, vrijedilo bi očito: $R_2 - R_1 = R_p$.



Sl. 287.



Sl. 287a.

Uz D-10

24. U pogledu najvećih otpora još dobro izmjerivih Wheatstoneovim mostovima očit je napredak danas prema nekoć. Mjesto do iznosa reda veličine 50 kΩ, do kojih se moglo ići s jednostavnim tipovima, današnji Wheatstoneovi mostovi, građeni s poboljšanim visokoomskim mjernim otporima, i s modernim vanredno osjetljivim nulinstrumentima ili čak elektronskim nulindiktorima s pojačalom, dopuštaju i u manje specijalnim izvedbama mjerenja otpora na pr. i do 1 MΩ, a pojedine specijalne konstrukcije (jednu je takvu nedavno iznijela Norma, Wien) i do 1 GΩ (pri naponu na mostu 100 V).

Treba još reći da se i područje primjena Wheatstoneovih mostova istosmjernje struje vanredno proširilo, u tom smislu da se njima sve više mjere i *neelektričke* veličine, kojima se u prikladnom raspoređaju izazovu promjene otpora. Navedimo samo dva tri primjera iz ovog vrlo raznolikog područja.

Tako se mogu mjeriti Wheatstoneovim mostom promjene temperature, time da se na pr. nikaljni otpornik, stavljen u granu nepoznatog otpora mosta i uz uravnotežen most da nulinstrument pokazuje nulu struje, postavi na mjesto gdje se mijenja temperatura, a s njom i otpor nikalnog otpornika. Na male promjene temperature nulinstrument će ošako reagirati praktički proporcionalnim odstupanjima od nule otklona, iz čega će se lako zaključivati na temperaturna variranja na ispitivanom mjestu. Postizavaju se osjetljivosti znatno veće nego s instrumentima s unakrsnim svitkom po sl. 36, uz D-44. No još je osjetljivije

upotrebiti, mjesto nikalnog otpora sa slabijim *porastima* otpora pri povišenjima temperatura, današnje poluvodičke otpornike, koji na više temperature reagiraju naročito velikim *smanjenjima* otpora, a mogu se izvesti i skoro »točkasto«. Takvim otporima (zvanima termistori, ternevidi, NTC-otpori i sl.) lako se i brzo električki mjere na pr. tjelesne temperature bolesnika itd., a mogu se mjeriti, uz prikladno izveden kontaktni rasporedaj, i »površinske« temperature, na pr. na strojevima, transformatorima i sl., pa i na različitim mjestima kože bolesnika.

S područja električkih mjerenja *mehaničkih* veličina navedimo za primjer mjerenja »rasteznim mjernim vrpčama« (strain gauges, Dehnungsmeßstreifen). Zamislimo po sl. 287. a) otpornik 1 iz tanke (na pr. konstantanske) žice, plosnato raspoređen na mnogo dugoljastih a uskih petlji, i kruto ugrađen u mjernu vrpču 2, na pr. iz akrilne ili fenolne smole. Ako se sad prikladnim specijalnim ljeplilom mjerna vrpca nalijepi na neko mjesto 3 na pr. metalnog tijela, i to s duljinom otpornika 1 orijetiranom u smjer očekivanog rastezanja na tom mjestu, i ako se još prije pokusa rastezanja otpornik 1 uzme za jednu granu Wheatstoneova mosta i most se uravnoteži da nulinstrument pokazuje nulu, pri primijenjenom nakon toga vlaku, ili drugom naprezanju koje na ispitivanom mjestu izazivlje produljenje ispitivanog dijela 3, rastezat će se zajedno s tim dijelom i mjerna vrpca 2. A time će se uzdužno rastezati i žica otpornika 1, što će u konačnoj konsekvenciji imati za posljedicu i povišenje prvobitnog otpora R otpornika 1 za neki prirast ΔR , praćeno korespondentnim otklonom nulinstrumenta mosta. Kod danog omjera $\Delta R : R$, koji se može smatrati proporcionalnim omjeru $\Delta l : l$ iznosa produljenja materijala Δl i njegove prvobitne duljine l ,

vrijedi relacija: $k = \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{l}{\Delta l}$, u kojoj je k (poznati ili baždarenjem odre-

deni) »faktor osjetljivosti« mjerne vrpce (često je k iznosa oko 2). Tako se, uz dano k , ΔR , R i l , može naći rastezanje Δl . A iz njega se dađu, već prema pojedinim slučajevima, naći ne samo sila vlaka, ako se ovom proizvelo rastezanje u određenom materijalu, nego i niz drugih mehaničkih inače teško izmjerivih veličina, ukoliko je produljenje Δl od njih poteklo. Međutim ovakva mjerenja daju pouzdane rezultate samo uz savjestan rad s kvalitetnim vrpčama, prilijepljenima specijalnim ljeplilima, te uz naročitu pažnju na temperature i druge nuzefekte, pa ih obično izvode izvržbane osobe, koje uz to još moraju poznavati i problematiku ispitivanih neelektričkih veličina.

Uz D-19.

25. Moderni ekstremno strujno osjetljivi instrumenti s kazalom, kakve su donijele tek izvedbe s napetom vrpcom i novim magnetima, dajući pune otklone već kod malo μA i odlikujući se u smislu izvoda iz D-42. kod naponskih mjerenja s mnogo hiljada oma po voltu, mogu dati ommetre kojih omske skale već pri malim naponima E sežu do mnogoput većih iznosa otpora nego li se dobivaju pri slično malima E s instrumentima od samo nekoliko stotina oma po voltu. Tako se protivno malenom dosegu skale po sl. 90. na str. 90., s instrumentom od $50 \text{ k}\Omega/\text{V}$ građenim za puni otklon (100% skale) kod $E = 1,5 \text{ V}$ (iz malog suhog elementa ugrađenog u instrument), dakle s instrumentom otpora $R_k = 75000 \Omega$, može postići, uz još upotrebljiv otklon E_1 od 1.48% skale. iznos:

$$R_x = 75000 \left(\frac{100}{1.48} - 1 \right) = 5000000 \Omega (= 5 \text{ M}\Omega)$$

i j. ommeterska skala ovog instrumenta već uz $E = 1,5 \text{ V}$ sezala bi praktički do više megoma (megomski iznos u D-20. bio je postignut tek sa 220V-instrumentom!).

Uz D-30.

26. Već s instrumentom iz K-25., ako bi ga se nadopunilo prikladnim preciznim visokoomskim predotporom da puni otklon skale bude kod $E = 600 \text{ V}$, te ako bi se kod konstrukcije pripazilo na što savršeniju izolaciju, mogli bi se pri otklonu E_1 kod 1,48% skale mjeriti 400-struko veći otpori nego po K-25. na bazi $E = 1,5 \text{ V}$. Naime novi instrument imao bi unutarnji otpor $600 \times 50 \text{ k}\Omega$ ili $30 \text{ M}\Omega$, i pri $E_1 = 0,0148 \times 600 \text{ V} = 8,87 \text{ V}$ bi po (I) u D-19. slijedilo: $R_x = 2000 \text{ M}\Omega = 2 \text{ G}\Omega$, prema čemu bi se instrument mogao već zvati »gigaommetar«!

Inače se gigaommetri sa skalama do $\text{G}\Omega$ -iznosâ, i pogotovo teraommetri za mjerenja i $\text{T}\Omega$ -iznosâ otpora, mnogo grade i kao »elektronski instrumenti, zapravo kao (istosmjerni) »cijevni voltmetri«, s radiocijevima koje u spoju »istosmjernog pojačala« reagiraju promjenama anodne struje na padove napona proizvedane na rešetki prikladne radiocijevi prolazom neznatnih mjernih struja kroz visokoomski otpor priključen između katode i mrežice cijevi (kasnijim pojačavanjem ove se promjene mogu iskoristiti da utječu i na manje osjetljive instrumente). Cijeli uređaj predstavlja zapravo instrument vrlo visokog »ulaznog otpora« R_x (mnogo megoma), pa se skali voltâ može dodati i ommetarska skala, kao i kod gore navedenog običnog instrumenta sa visokim R_x . A mogu se otpori i računati po (I) iz D-19.

27. Međutim ekstremno visoki otpori dobro se mjere i modificiranom ommetarskom metodom, kod koje se namjesto po sl. 89. (str. 90.) mjerenom otporu R_x serijski dodanog galvanometra G otpora R_0 stavi kao predotpor visokoomski otpor R_0 , i paralelno otporu R_x se priključi elektrostatski voltmetar M, dakle instrument koji ne troši ništa struje. Ako se sad na cijelu kombinaciju primijeni poznati napon E , i ako M pokaže pad napona E_x na R_x (što znači da se na R_0 uspostavio napon $E_1 = E - E_x$), očito će vrijediti: $R_x : R_0 = E_x : (E - E_x)$, i prema tomu:

$$R_x = R_0 \frac{E_x}{E - E_x} \quad (I')$$

Mjesto formule (I') sa E_x lako se, radeći sa E_1 po relaciji $R_x : R_0 = (E - E_1) : E_1$ rezultat dobiva i u obliku $R_x = R_0 \left(\frac{E}{E_1} - 1 \right)$, koji sjeća na (I) u D-19.

Napon E , obično više stotina volta, proizvodio se dosad pretvorbom struje iz male baterije suhih elemenata od 4,5 V mehaničkim prekidačem, transformacijom na visok izmjenični napon, te ispravljanjem tog napona u istosmjerni, kao i »gladenjem« i stabilizacijom u konstantni istosmjerni napon nešto viši od E , a regulacijom u uvijek isti iznos E vršila se odvajanjem s potencimetra i očitavanjem odklona E na M (suvremenije se može potrebiti istosmjerni napon proizvesti spojem s transistorskim oscilatorom umjeto mehaničkog vibratora). U praksi se predvodi i mogućnost biranja raznih predotpora R_0 , već prema željenim mjernim područjima za R_x .

Treba primijetiti da se za ispitivanje modernih umjetnih izolacionih masa, i za niz drugih primjena (uz ostalo i mjerenja električke vodljivosti drveta, duhana, vune i žita u svrhu određivanja sadržaja vlage u tim materijama), vrlo mnogo traže aparati za mjerenja ekstremno visokih otpora (teraommetri ili bar gigaommetri).

Uz D-31. i D-32.

28. U pogledu propisa glede izolacionih stanja vodova i njihovih mjerenja gledati uvijek najnovije propise. U D-32. citirani zahtjevi na izolaciono stanje po VDE 0100 1930 i danas su na snazi po VDE 0100/5.57.

Uz D-39.

29. U D-39. opisani i na sl. 107. (str. 108.) ilustrirani shuntovi danas se vrlo mnogo upotrebljavaju pod imenom »Ayrtonovih« ili »univerzalnih« shuntova. S njima se lako prelazi, prikladnom preklopom, na različita mjerna područja struja, pa se posebno može kod mjerenja, zbog sigurnosti, prelaziti brzo i od najmanjih osjetljivosti k sve većima. Ovaj shunt ima još jedno vrlo poželjno svojstvo: kod stalno po sl. 107. priključene kombinacije $Y = Y_1 + Y_2 + Y_3$ (obično jednake ili blize galvanometrovu »vanjskom graničnom otporu« R_0 u smislu izvoda iz B-10.), i poslane preko stezaljki 1 i 2 mjerne struje I takve da galvanometar otpora R_1 pokaže maksimum struje I_K , očito mora vrijediti relacija:

$$I_K(R_1 + Y - Y_1) = (I - I_K) Y_1$$

a time i relacija:

$$I = \frac{I_K(R_1 + Y)}{Y_1}$$

Iz dobivene se relacije vidi da *maksimalne struje* I , kraj danih I_K , R_1 i Y , variraju indirektno proporcionalno sa Y_1 . Slično je preko 1-3 poslana maksimalna mjerena struja I' indirektno proporcionalna sa $Y_1 + Y_2$, te preko 1-4 poslana maksimalna mjerena struja I'' indirektno proporcionalna sa $Y_1 + Y_2 + Y_3$. Drukčije izraženo to znači da postizavane mjerne osjetljivosti rastu direktno proporcionalno djelovima Y_1 , $Y_1 + Y_2$ itd. otpora Y . U odnosima po sl. 107., uz stalni priključak 1, s manjih na veće osjetljivosti dolaziti će se prelazeći preklopom redom na kontakte 4, 3 i konačno 2. »Univerzalan« je Ayrtonov shunt po tomu što se ista kombinacija Y može upotrebljavati i s drugima R_1 i I_K , i opet s analognim odnosima kao gore.

Uz D-42.

30. Već su u K-25. spominjani suvremeni instrumenti s vrlo mnogo Ω/V ; mnogo se susreću instrumenti s na pr. 1000 ili 10000 Ω/V , a ima ih čak i sa 50 i više $k\Omega/V$.

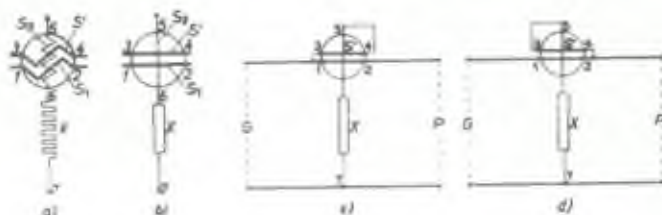
Uz D-46.

31. Danas se osim s pomičnim svitkom i permanentnim magnetom univerzalni instrumenti grade i po sistemu s pomičnim željezom. Oni pokazuju *efektivne* iznose I i nesinusoidnih struja. Sistemi s pomičnim svitkom, reagirajući na izmjenične struje tek nakon ispravljanja poluvodičkim ispravljačima, pokazuju naprotiv po B-38. tek 1,11-kratnike srednjih iznosa I' , mjesto kojih se na skali instrumenta naznače efektivni iznosi I , što je i ispravno za sinusoidne struje; međutim za nesinusoidne izmjenične struje odnos $I : I'$ odstupa od 1,11, pa instrumenti sve više pogriješno pokazuju, što je mjerena struja više nesinusoidna. Kako međutim danas sve češće treba mjeriti i nesinusoidne struje, bio je velik napredak kad su suvremenim vrpcom napetim sistemima i modernim magnetski mekim materijalima dobiveni i višestruki instrumenti s mekim željezom koji, pored *vanredno* malenog vlastitog potroška, doista pokazuju *neposredno* efektivne iznose struja odn. napona (a k tomu pokazuju ispravno i istosmjerne struje i napone, iako će se ovi radije u praksi mjeriti sistemima s pomičnim svitkom i permanentnim magnetom, zbog jednolike skale ovih potonjih).

Uz D-48.

32. Postoje danas i vatmetri koji automatski korigiraju pogriješku E/R_V zbog vlastitog potroška naponske grane, djelovanjem u instrument dodatno ugrađenoga »korekcionog« svitka. Spomenuti svitak, jednak

strujnom i istog smještaja s njime, upotrebljava se uključen u naponsku granu vatmetra. i u odnosu prema strujnom svitku spaja se da djeluje bilo »istosmisleno« bilo »protusmisleno« s ovim potonjim, već prema tomu da li se radi o mjerenju snage *generatora* po I) u Tabeli VII. na str. 116. (lijeva formula) ili o mjerenju snage *potrošača* po spoju II) iste Tabele (desna formula). Konkretno: zamislimo instrument, predocen na sl. 288.a) više detaljno i na sl. 288.b) više shematizirano, s normalnim strujnim svitkom 1-2 i korekcionim svitkom 3-4, te s naponskom granom 5-7 sastavljenom od naponskog svitka 5-6 i pripadnog predotpora 6-7. Umjesto normalnog spoja za mjerenje snage *generatora* G po shemi I) u sl. 119. (str. 115.), kod koga treba očitavanju N_0 dodavati korekciju $+E/R_V$, da bi se dobio ispravan iznos N tražene snage generatora G, kod novog se instrumenta primijeni spoj po sl. 228.c), kod koga se istosmislenim djelovanjem korekcionog svitka toliko pojačava djelovanje strujnog svitka da instrument pokaže umjesto N_0 odmah neposredno N . Naprotiv kod normalnog mjerenja snage *potrošača* P po shemi II) u sl. 120. instrumentom pokazani iznos N_0 mora se popraviti korekcijom $-E/R_V$ da bi se dobio ispravan iznos N , dok se kod novog instrumenta spojem po sl. 288.d) protusmislenim djelovanjem korekcionog svitka toliko oslabi djelovanje strujnog, da instrument neposredno pokaže N .



Sl. 288.

Korekcionni svitak može poslužiti i za jednu često vrlo korisnu svrhu. Ako se naime taj svitak ne upotrebi za korekcionno djelovanje, on se može samostalno (neuključen u naponsku granu) kombinirati istosmisleno sa strujnim svitkom, serijski ili paralelno. Ako su sad oba svitka 1-2 i 3-4 dimenzionirana za 4-struki iznos one struje I , kod koje bi se uz puni napon E pri $\cos \varphi = 1$ instrument otklonio za punu skalu, onda bi se očito taj puni otklon postigao i sa strujom $4I$ kroz 1-2 i naponom E na 5-7 već kod $\cos \varphi = 0,25$. A ovakvi instrumenti se, kao mnogo osjetljiviji, često žele kod mjerenja pri malim faktorima snage do $\cos \varphi = 0,25$. Sad serijskom istosmislenom kombinacijom obiju svitaka 1-2 i 3-4, dimenzioniranih za maksimalne struje po $4I$, postizava se isti efekt kao s jednim svitkom za maksimalno $8I$, pa se puni otklon, kod napona E na 5-7, očito postizava već pri $\cos \varphi = 0,125$, t. j. instrument se poboljšava u vatmetar prikladan za mjerenja snage kod $\cos \varphi$ manjih čak od $0,125$.

Uz D-51. do D-59.

33. Evo i nešto izvoda o gibanjima otklonskih sistema galvanometara s permanentnim magnetom i pomičnim svitkom, posebno kod njihovih primjena kao balističkih galvanometara i kao »fluksmetara«. Treba međutim reći da bi iole potpunija razrada već samo balističkih i fluksmetarskih mjerenja zahtijevala matematičke izvode opsega cijele jedne monografije, dok će se ovdje iznijeti samo najbitnije za razumijevanje problematike, s najnužnijim uputama o toku računskih operacija, koje

će polonje naprednijem čitaocu omogućiti da i sam provjeri konačne rezultate.

Zamislimo osjetljiv galvanometarski otklonski sistem, bilo sa zrcalnim očitavanjem (kao u sl. 3. i 4. na str. 19. ili sl. 5. na str. 21.) bilo s materijalnim kazalom (kao u sl. 2. na str. 17. ili sl. 282. na str. 301.). Zbog torzionog djelovanja obješenja takvom sistemu, koji neka kao svaka vrtiva masa ima izvjesni moment tromosti K , pripada određeni »položaj ravnotežja«, dakle stanje s »kutom otklona nula«, koje sistem, neuzbudivan nikakvom strujom izvana proizvedenom u njegovu svitku, sam od sebe zauzme nakon dovoljno dugog vremena.

Ako bi sad sistem zamislili u položaju otklonjenom za kut α prema položaju ravnotežja, i uzeli da on u pripadnom momentu t ima i neku kutnu brzinu $\frac{d\alpha}{dt}$ te također neku kutnu akceleraciju danu izrazom $\frac{d^2\alpha}{dt^2}$ za njega će u času t vrijediti, po poznatim zakonima mehanike, relacija:

$$K \cdot \frac{d^2\alpha}{dt^2} = \Sigma M \quad (1)$$

gdje ΣM znači algebarsku sumu »momenata vrtnje« koji u času t djeluju na otklonski sistem.

34. Ako isključimo postojanja momenata vrtnje od vanjskih mehaničkih uzroka (od mehaničkih udaraca, trešnji ili drugih smetnji galvanometarskom djelovanju), mogu se uglavnom u ΣM , općenito govoreći, očekivati tri sumanda:

I) Može postojati moment vrtnje G i od izvanjskim uzrokom u galvanometru proizvedene momentane struje i , zbog iz fizike poznatih Bi -sila koje otklonski djeluju, i to podupirući se, na svaku od dvije uzdužne stranice svakog od w_0 pravokutnih zavoja pomičnog svitka galvanometra. Ako, simplificirajući, uzmemo da dio l duljine tih uzdužnih stranica leži u polju stalne magnetske indukcije B uspostavljene u pukotinama kod sjevernog odn. južnog pola galvanometrova magneta, i ako se sjetimo da svaki zavoj, imajući dvije uzdužne stranice, daje po dvije Bi -sile, ukupna vrtiva sila na uzdužne stranice svitka od svega w_0 zavoja bit će $P = 2 Bi l w_0$, a njoj pripadni moment vrtnje, kod prosječne širine h zavoja pomičnog svitka, i po tom kraku $\frac{h}{2}$ sile P , bit će: $P \cdot \frac{h}{2} = Blhw_0 i$. A

kako je taj moment vrtnje malo prije bio izražen sa $G i$, vidi se, izjednačujući Gi sa $Blhw_0 i$, i skraćujući sa i , da je $Blhw_0$ vrijednost konstante G , nazvane »dinamička konstanta galvanometra«, te da ovoj veličini G pripada fizikalno značenje »momenta vrtnje proizvedenog jedinicom $i = 1$ struje, vanjskim izvorom proizvedene kroz galvanometarski svitak«.

II) Moguć je zatim u smislu smanjivanja otklona α djelotvorni, te zato i negativnim predznakom označeni, moment vrtnje proizveden od torzionih sila pomičnog sistema, koji moment po zakonima elastičnosti treba uzimati proporcionalnim otklonu α u danom času t . Mi ćemo taj moment vrtnje izražavati sa $-D \alpha$, s konstantom D zvanom »direkciona sila«, pri čemu veličini D treba pripisivati značenje momenta vrtnje pri jedinici $\alpha = 1$ otklona galvanometra.

III) Konačno može djelovati i moment vrtnje $-p' \cdot \frac{da}{dt}$ zbog kočnog (prigušnog) djelovanja na kutnom brzinom $\frac{da}{dt}$ (u danom času) rotirajući pomični svitak galvanometra. Taj je moment vrtnje uzrokovan Bi -silama od struja i induciranih, pri strujnom krugu galvanometra zatvorenom, time da je galvanometar, koji sam za sebe neka je otpora R_g , premosten nekim »vanjskim otporom« R_v , tako da nastane strujni krug ukupnog otpora $R = R_g + R_v$. Budući da taj prigušni moment vrtnje, po zakonima

elektromagnetske indukcije (Lenzovo pravilo), treba zamišljati uvijek suprotnim momentanom smislu vrtnje pomičnog svitka, dakle uz pozitivno $\frac{du}{dt}$ djelotvornim natrag k položaju ravnotežja, i uz negativno $\frac{du}{dt}$ suprotno djelujući, i budući da nije teško dokazati njegovu proporcionalnost brzini $\frac{du}{dt}$ ¹⁾, prirodno je bilo naznačiti ga sa $-p' \cdot \frac{du}{dt}$, pri čemu je konstanta p' (prigušni moment vrtnje od jedinice $i' = 1$ inducirane struje) dobila ime »faktor prigušenja od struje i' «. Strogo uzevši, nešto dodatnog prigušenja treba očekivati i od otpora uzduha i sl. pri gibanjima otklonskog sistema (i »otvoreni« galvanometar već titra slabo prigušeno!). Dovoljno približno može se ovo »uzdušno« prigušenje obuhvatiti nekim dodatnim »faktorom uzdušnog prigušenja« p_0 , aditivno spojivim s već uvedenim faktorom prigušenja p' od induciranih struja i' u »ukupni faktor prigušenja« $p = p_0 + p'$, te onda računati s »ukupnim momentom prigušenja« $-p \frac{du}{dt}$ kao trećim članom u ΣM [ne ćemo pretpostavljati u osjetljivim galvanometarskim sistemima daljih uzroka prigušenja, na pr. od struja i' induciranih u namjerno otklonskom sistemu pridodanim kratko spojenim prigušnim svicima ili Al-okvirićima (v. B-7), kakvi se primjenjuju kod neosjetljivih instrumenata s pomičnim svitkom, da bi se ovi uvijek približno aperiotski otklanjali].

35. Uvrštavajući sad mjesto ΣM u (1) algebarsku sumu netom pod I) do III) uvedenih triju članova G_i , $-Du$ i $-p \cdot \frac{du}{dt}$, prenoseći s desne na lijevu stranu oba negativno označena člana, i dijeleći još sa K , dobili bismo kao karakterističnu za galvanometarska gibanja »linearnu diferencijalnu jednadžbu drugoga reda s desnim članom«:

$$\frac{d^2u}{dt^2} + \frac{p}{K} \cdot \frac{du}{dt} + \frac{D}{K} \cdot u = \frac{G}{K} \quad (I)$$

koja obuhvaća vanredno velik broj slučajeva galvanometarskih gibanja, s vrlo zanimljivim i za mnoge primjene neophodno potrebnim rezultatima, koji bi se dobili vrlo suptilnim razmatranjima.

Međutim ograničit ćemo se sad na slučajeve »balističkih gibanja«, kod kojih se, po B-4. i D-51., galvanometarskom sistemu tek vanredno kratkotrajnim »strujnim udarom« zada mehanički udarac (impuls), od koga sistem zadobije neku »početnu brzinu« v_0 još prije nego li se zamjetljivo maknuo iz položaja ravnotežja $u = 0$. Sad vrijeme t se počima mjeriti tek nakon što galvanometar, dalje prepušten sam sebi, započne spomenutim udarom izazvana »balistička« gibanja, najprije povećavajući svoj otklon u od iznosa 0 do iznosa trenutnog »balističkog otklona« u_1 , i nastupajući odmah iza toga »povratna« gibanja.

¹⁾ Evo izvoda proporcionalnosti momenta vrtnje od Bil -sila i kutne brzine otklonskog sustava galvanometra. Za spomenuti moment, slično momentu od Bil -sila po I), vrijedi izraz $Bilh\omega \cdot i' = Gi'$, pri čemu struju i' treba zamišljati danu relacijom $i' = e'/R = e'/(R_p + R_g)$, s induciranim naponom e' danim po poznatoj Bil -formuli elektromagnetske indukcije:

$$e' = 2\omega_0 B \cdot l \cdot \frac{da}{dt} \cdot \frac{h}{2} = Blh\omega_0 \frac{da}{dt} = G \frac{da}{dt}$$

($2\omega_0$ je ukupni broj vodiča s dijelom duljine l u polju magnetske indukcije B , $\frac{da}{dt}$ je kutna i $\frac{h}{2}$ linearna brzina vodiča). Prema rečenom vrijedi relacija proporcionalnosti,

$$p' \cdot \frac{da}{dt} = - \frac{G^2}{R} \cdot \frac{da}{dt}$$

a time i relacija $p' = G^2/R$, iz koje se čak razabira veza p' sa G^2 i R .

Očito onda treba pretpostavljati da vanjske struje, a time i pripadnog desnog člana Gi/K u (I), kod balističkih gibanja ni nema. Zbog toga onda jednadžba (I) prelazi u »jednadžbu balističkog galvanometra«:

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{p}{K} \frac{d\alpha}{dt} + \frac{D}{K} \alpha = 0 \quad (I')$$

36. Prije daljih razmatranja zamislimo najprije idealiziran (i u praksi zbog $p_0 > 0$ čak i uz $p' = 0$ nedostizavani) slučaj da drugi sumand lijevo u (I') iščezava zbog pomanjkanja svakog prigušenja. Jednadžbu (I') zamenila bi sad vrlo poznata jednadžba neprigušenih »sinusoidnih« titraja:

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{D}{K} \alpha = 0 \quad (II)$$

Ova se naime diferencijalna jednadžba može zadovoljiti pretpostavljajući funkciju α izraženu nezavisnom varijablom t s pomoću sinusoidnog izraza $\alpha = A \sin \frac{2\pi}{T_0} t = A \sin \omega_0 t$, u kome znače: A tjemenu vrijednost (amplitudu) sinusoide, T_0 titrajno vrijeme i po poznatim vezama $\omega_0 = 2\pi/T_0$ kružnu frekvenciju ω_0 mehaničkih sinusoidnih titraja galvanometra. Ako bi se naime stavio izraz za α namjesto α desno u (II) i ako bi se izrazom $-\left(\frac{2\pi}{T_0}\right)^2 \cdot A \cdot \sin \frac{2\pi}{T_0} t = -\left(\frac{2\pi}{T_0}\right)^2 \alpha$ zamijenila druga derivacija od α lijevo u (II), nakon kraćenja došlo bi se na relaciju:

$$\left(\frac{2\pi}{T_0}\right)^2 = \omega_0^2 = \frac{D}{K} \quad (II')$$

po kojoj bi otkloni α potpuno neprigušenog galvanometra ($p = 0$) varirali sinusoidno s »prirodnim« titrajnim vremenom T_0 , odn. s »prirodnom« kružnom frekvencijom ω_0 , danima ovim formulama:

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{K}{D}} \quad (A) \qquad \omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} = \sqrt{\frac{D}{K}} \quad (B)$$

ta vidjet ćemo brzo da kod rastućih p gibanja postaju sve jače prigušena, postajući najprije sve izrazitije »titrajna prigušena«, a zatim čak i »aperiodska«).

37. Prije daljih razmatranja primijenimo netom dobivene relacije na takvu transformaciju jednadžbe balističkih gibanja (I'), iz koje će se vidjeti da se, zbog vezâ (A) odn. (B) i uz pretpostavku da se umjesto nezavisne varijable vremena t uvede prikladna nova »bezdimezijska« varijabla τ , jednadžbi balističkih gibanja može dati oblik jednadžbe sa samo jednim parametrom, naime s veličinom:

$$s = \frac{p}{2\sqrt{KD}} \quad (C)$$

zvanom »stepen prigušenja«. Ako se naime veličina t zamijeni veličinom τ tako odabranom da iznosi t i τ stoje u omjeru iznosâ T_0 i 2π , dakle ako se po proporciji $t : \tau = T_0 : 2\pi$ stavi $\tau = \frac{2\pi}{T_0} t$, jednadžba (I'), nakon

njezina dijeljenja sa $\frac{D}{K}$ i uz uzetu obzir relaciju (B), moći će se prikazati u obliku:

$$\frac{d^2\alpha}{d\left(\frac{2\pi}{T_0} t\right)^2} + 2s \cdot \frac{d\alpha}{d\left(\frac{2\pi}{T_0} t\right)} + \alpha = 0$$

ili, s novom nezavisnom varijablom τ , u (za mnoge primjene vrlo prikladnom) obliku:

$$\frac{d^2\alpha}{d\tau^2} + 2s \frac{d\alpha}{d\tau} + \alpha = 0 \quad (\text{I}''')$$

38. Sad homogene linearne diferencijalne jednačbe ma koga reda, s konstantnim koeficijentima i bez desnog člana, rješavaju se, kako je iz teorije diferencijalnih jednačbi dobro poznato, tako da se riješi njihova »karakteristična jednačba«. U konkretnom slučaju jednačbi (I'') odn. (I''') karakteristične jednačbe, s kvadratom nepoznanice τ umjesto druge derivacije funkcije α i s prvom potencijom te nepoznanice umjesto prve derivacije od α , glasile bi, već prema tomu da li bi se pošlo od (I) ili od (I'''):

$$\tau^2 + \frac{p}{K} \tau + \frac{D}{K} = 0 \quad (\text{III}')$$

odnosno:

$$\tau^2 + 2s\tau + 1 = 0 \quad (\text{III}'')$$

39. Razmotrimo sad dalje što nam nosi (III') odn. (III''). Korijeni prve jednačbe bili bi:

$$\tau_1 = -\frac{p}{2K} - \sqrt{\frac{p^2}{4K^2} - \frac{D}{K}} \quad \tau_2 = -\frac{p}{2K} - \sqrt{\frac{p^2}{4K^2} - \frac{D}{K}}$$

ili (s kraticama $\eta = \frac{p}{2K}$ i $\beta = \sqrt{\frac{p^2}{4K^2} - \frac{D}{K}}$) također:

$$\tau_1 = -\eta + \beta \quad \tau_2 = -\eta - \beta$$

Korijeni pak jednačbe sa s bili bi:

$$\tau_1 = -s + \sqrt{s^2 - 1} \quad \tau_2 = -s - \sqrt{s^2 - 1}.$$

Da ne bi išli na dva kolosjeka, idimo dalje tek na bazi korijenâ jednačbe (III'). S izračunatima η i β (uz $\beta \leq 0$) »opći integral« ove jednačbe dobiva se u obliku algebarske sume eksponencijalnih funkcija:

$$\alpha = C' \cdot e^{\tau_1 t} + C'' \cdot e^{\tau_2 t} = e^{-\eta t} \cdot (C' \cdot e^{\beta t} + C'' \cdot e^{-\beta t}) \quad (\text{IV})$$

(tu znači e bazu prirodnih logaritama, a C' i C'' su »konstante integracije«, ovisne o »početnim uvjetima« u svakom konkretnom slučaju).

Od bitnog je sad značenja za integral (IV): kakvi su korijeni karakteristične jednačbe, ili točnije: kakvog je predznaka diferencija pod korijenom u izrazu za β .

Moguća su naime dva suprotna slučaja: 1) da je ta diferencija negativna, i po tomu da je β imaginaran broj, a to će biti dok se kod galvanometra danih K , D i G , te danoga R_g i danoga (malenog) faktora p_0 uzdušnoga prigušenja, dovoljno velikim vanjskim otporima R_v ukupni otpor $R = R_g + R_v$ galvanometarskog strujnog kruga drži na tako visokim iznosima da, po već uzetoj relaciji $p' = G^2/R$, pripadni ukupni faktor prigušenja $p = p_0 + p'$ galvanometra ostane manji od $2\sqrt{KD}$ (i po tom da s ne dosiže 1), jer se relacija:

$$\frac{p^2}{4K^2} < \frac{D}{K}$$

doista može pisati preuđešana u obliku: $p^2 < 4KD$ odn. $p < 2\sqrt{KD}$, i

dalje s $\left(-\frac{p}{2\sqrt{KD}}\right) < 1$.

Ne moguće je i: 3) suprotni slučaj kod toliko malenih R_v , a time i dovoljno malenih R , te u daljoj konsekvenciji dovoljno velikih p , da p nadilazi $2\sqrt{KD}$ (odn. da s nadilazi 1), u komu slučaju β ispada realno.

U prvomu slučaju 1) eksponencijalne funkcije s imaginarnim eksponentom unutar zagrada u (IV) vode na trigonometrijske funkcije, i u zadnjoj konsekvenciji na sinusoidnu funkciju realnog argumenta, što bi samo po sebi dalo sinusoidne titraje (oscilacije) galvanometra. No ti su titraji, već prema manjem ili većem η , jače ili slabije prigušivani zbog faktora $e^{-\eta t}$, funkcije koja s rastućim t naglo opada asimptotski k nuli. U suprotnom slučaju 3) među zgradama u (IV) dolaze eksponencijalne funkcije s realnim eksponentima, i njihova algebarska suma, odn. hiperbolička aperiotska funkcija sh (hiperbolički sinus, »sinus hyperbolicus«) realnog argumenta, na koju se ta suma daje svesti, znači aperiotsko (neoscilatorno) gibanje galvanometra, prigušivano utjecajem faktora $e^{-\eta t}$. Očito je da između ova dva bitno suprotna stanja 1) i 3) mora postojati, i to pri vanjskom otporu R_v galvanometra udešenom na posve određeni i za svaki galvanometar karakteristični iznos R_a , neko prelazno granično stanje 2) galvanometra, zvano »aperiotsko granično stanje« po tom što u njemu galvanometar, ostajući baš još aperiotski, tek što ne titra, i karakterizirano posve određenim »vanjskim graničnim otporom galvanometra« R_a (s pripadnim iznosom $R = R_g + R_a$), takvim da vrijedi uvjet $p = 2\sqrt{KD}$ (odn. uvjet $s = 1$). Resumirajući imamo dakle slučajeve:

1) titrajna prigušena gibanja sa $R_v > R_a$, $p < 2\sqrt{KD}$ ($s < 1$)

2) granično aperiotsko stanje sa $R_v = R_a$, $p = 2\sqrt{KD}$ ($s = 1$)

3) aperiotska gibanja sa $R_v < R_a$, $p > 2\sqrt{KD}$ ($s > 1$)

40. Kao važniji razmatrajmo najprije slučaj 1). Kako bi tu bilo nespretno raditi s imaginarnim β , izrazimo β (s pomoću izlučenog faktora

$\sqrt{-1} = j$) realnom veličinom $\omega = \sqrt{\frac{D}{K} - \frac{p^2}{4K^2}}$ po relaciji: $\beta = j\omega$, i radimo

dalje sa $j\omega$. Po klasičnoj formuli:

$$e^{\pm jx} = \cos x \pm j \cdot \sin x$$

izrazimo $e^{\beta t} = e^{j\omega t}$ i $e^{-\beta t} = e^{-j\omega t}$ u (IV) sa $\cos \omega t$ i $\sin \omega t$, pa rezultirajuću uređenu relaciju:

$$\alpha = e^{-\eta t} \cdot [(C' + C'') \cdot \cos \omega t + j \cdot (C' - C'') \cdot \sin \omega t]$$

transformirajmo na poznati način, uvodeći nove konstante integracije C_1 i C_2 , i mjesto njih dalje i amplitudu A i pomoćni kut φ , stavljajući: $C' + C'' = C_1 = A \cdot \sin \varphi$ odn. $j \cdot (C' - C'') = C_2 = A \cdot \cos \varphi$, i po tom zamjenjujući sa $A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ uglatu zgradu u relaciji za α :

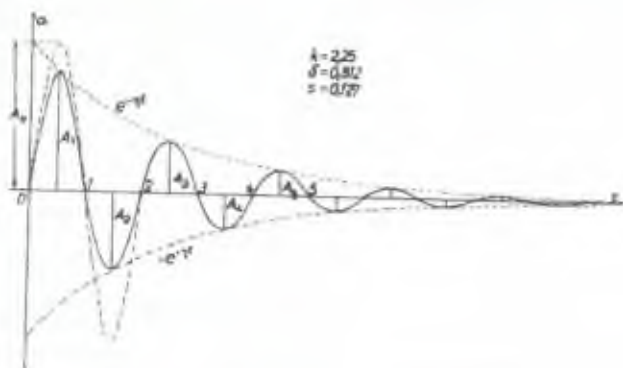
$$\alpha = e^{-\eta t} \cdot A \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (V)$$

Iz dobivene se jednadžbe ne samo vidi da su galvanometrijska gibanja doista prigušena sinusoidna, s prigušenjem zbog faktora $e^{-\eta t}$, nego se razabire i da je malo prije uvedena veličina ω zapravo »kružna frekvencija« sinusoide iz (V). A to, zbog veze $\omega = 2\pi/T$, dalje znači da je titrajno vrijeme te sinusoide

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{D}{K} - \frac{p^2}{4K^2}}} \quad (VI)$$

Prema tomu titranja po slučaju 1) oscilatorno se otklanjajućih galvanometara teku s rastućim p sve sporije, s većim titrajnim vremenom T po (VI) u odnosu prema titrajnom vremenu T_0 po (A), s kojim bi oscilirao

(idealizirano zamišljen) galvanometar sa $p \approx 0$ (dakle ne samo sa $p' = 0$ nego i sa $p_0 \approx 0$). Udaljivanja iznosa T od T_0 ostaju uostalom neznatna kod tole manjih p , no kod visokih p , već bližih iznosu $2KD$, raste T sve naglije, da bi kod približavanja slučaju 2) sa $p = 2\sqrt{KD}$ konvergirao prema $T \approx \infty$.



Sl. 289.

41. Ne bez važnih razloga za kasnije primjene, izvedimo i pobliže odnos između T i T_0 . Kako taj odnos varira s prigušenjem, da bismo ga mogli lako neposredno opažanjem određivati, uvedimo najprije mjesto p jednu drugu, mjeru prigušenja, omjer k ma kojih dviju jedne za drugom nadolazećih titrajnih amplituda istog predznaka, dakle po relaciji (V) i sl. 289, omjer:

$$k = \frac{A_1}{A_3} = \frac{A_3}{A_5} = \dots$$

(konkretno: ako bi u sl. 289, bilo $A_1 = 135$, $A_3 = 90$, $A_5 = 60$, $A_7 = 40$, $A_9 = 26^{2/3}$, ..., vrijedilo bi: $k = 135/60 = 60/26^{2/3} = \dots = 2,25$ (no u praksi se obično računa: $k = (135/90)^2 = (90/60)^2 = \dots = 2,25$). I sad podimo samo još korak dalje, pa uvedimo mjesto veličine k , zvane »omjer prigušenja« prirodni logaritam te veličine δ , dakle po definiciji veličinu, nazvanu »logaritmički dekrement prigušenja«:

$$\delta = \ln k$$

(u konkretnom primjeru gore sa $k = 2,25$ izišlo bi: $\delta = 0,812$).

Kako se sad po (V) može uzimati da kod prelaza od A_1 na A_3 , pa od A_3 na A_5 , itd. treba svakiput da prođe vrijeme punog titraja T , očito će se, ako na pr. amplitudi A_1 odgovara neki moment t' , amplitudi A_3 morati pripisivati moment $t' + T$, amplitudi A_5 moment $t' + 2T$, i slično dalje, pa će se za omjer k , ispustajući periodski ponavljane iznose sinusa, i uzimajući u obzir vezu $\omega = p/2K$, moći pisati:

$$k = \frac{A_1}{A_3} = \frac{A_3}{A_5} = \dots = \frac{e^{-\omega t'}}{e^{-\omega(t' + T)}} = \frac{e^{-\omega(t' + T)}}{e^{-\omega(t' + 2T)}} = \dots = e^{\omega T}$$

i po tom dalje:

$$\delta = \ln k = \omega T = \frac{p}{2K} T \quad (D)$$

A baš s ovom potonjom relacijom lako je dobiti traženi odnos između T_0 i T . Ako se naime izraz za $\omega = 2\pi/T$ kvadrira, pa se zatim D/K zamijeni sa $4\pi^2/T_0^2$, i cijela se novo dobivena relacija pomnoži sa $T^2/4\pi^2$, dobit će se (uz upotrebu veze: $\eta = p/2K$):

$$1 = \left(\frac{T}{T_0}\right)^2 - \frac{\delta^2}{4\pi^2}$$

i po tom odmah i tražena relacija:

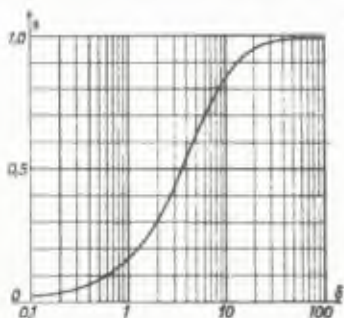
$$T = T_0 \cdot \sqrt{1 + \frac{\delta^2}{4\pi^2}} \quad (\text{E})$$

Dodajmo još da čitalac, polazeći od već uzetih veza, može lako sam izvesti relacije za $0 < s < 1$ odn. $0 < \delta < \infty$ koje izražavaju s sa δ , odn. δ sa s . One glase:

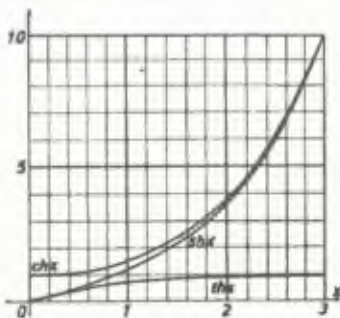
$$s = 1 : \sqrt{1 + \frac{4\pi^2}{\delta^2}} \quad (\text{F})$$

$$\delta = \frac{2\pi s}{\sqrt{1 - s^2}} \quad (\text{G})$$

a grafički vezu između s i δ predočuje sl. 290. s apscisama δ u logaritmičkoj i ordinatama s u linearnoj skali. Tako bi po (F) iznosu $\delta = 0,812$ od malo prije odgovaralo $s = 0,127$ [v. točku (0,812; 0,127) na sl. 290.].



Sl. 290.



Sl. 291.

Kako se iz (E) vidi, titrajna vremena kod raznih konačnih δ (dakle raznih s manjih od 1) nadilazit će titrajno vrijeme koje bi odgovaralo neprigušenom stanju sa $\delta = s = 0$. No kod malih δ (i odgovarajućih s) razlike T prema T_0 ostaju neznatne, pa se onda može stavljati $T \approx T_0$. Naprotiv kod vrlo velikih δ (i pripadnih s) već se T znatnije udaljuje od T_0 , težeći prema graničnoj vrijednosti ∞ kad i δ teži prema ∞ (i time s prema 1), što međutim već odgovara prelazu na slučaj 2). Konkretno pri malo prije uzimanom $k = 2,25$, te po tom $\delta = 0,812$ i $s = 0,126$, bilo bi $T = 1,008 \cdot T_0 \approx T_0$, no kod $k = 54$, te po tom $\delta = 4$ i $s = 0,54$, ispalo bi $T = 1,183 \cdot T_0$, dakle T veće od T_0 za 18,3%.

42. Kod aperijskog slučaja 3) s realnim β može se algebarska suma eksponencijalnih funkcija $C' \cdot e^{\beta t}$ i $C'' \cdot e^{-\beta t}$, primjenjujući na oba člana te sume definicione relacije hiperboličkog kosinusa ch i hiperboličkog sinusa sh : $\frac{1}{2}(e^x + e^{-x}) = \text{ch } x$ i $\frac{1}{2}(e^x - e^{-x}) = \text{sh } x$, odn. inverzne relacije $e^x = \text{ch } x + \text{sh } x$ i $e^{-x} = \text{ch } x - \text{sh } x$, preduesiti u relaciju:

$$u = e^{-\gamma t} \cdot [(C' + C'') \text{ch } \beta t + (C' - C'') \text{sh } \beta t]$$

u koju se dalje, slično postupku kod slučaja 1), mogu uvesti nove integracione konstante $C_1 = C' + C''$ i $C_2 = C' - C''$, te pomoćne veličine

A i φ dane relacijama: $C_1 = A \cdot \operatorname{sh} \varphi$ i $C_2 = A \cdot \operatorname{ch} \varphi$, tako da konačno izide jednadžba vremenskog variranja otklona α dana faktorom $e^{-\eta t}$ kao i kod 1), no s faktorom $\operatorname{sh}(\beta t + \varphi)$, aperiodskim i u beskonačnost rastućim s t , umjesto periodskog faktora $\sin(\omega t + \varphi)$, kakav dolazi u 1):

$$\alpha = e^{-\eta t} \cdot A \cdot \operatorname{sh}(\beta t + \varphi) \quad (\text{VII})$$

Izvod bazira na tomu što teoremu: $\sin(x+y) = \sin x \cos y + \cos x \sin y$ odgovara vrlo sličan »adicioni teorem«: $\operatorname{sh}(x+y) = \operatorname{sh} x \operatorname{ch} y + \operatorname{ch} x \operatorname{sh} y$; kako pak s realnim x variraju $\operatorname{sh} x$ i dalje dvije hiperboličke funkcije $\operatorname{ch} x$ i $\operatorname{th} x$ (hiperbolički kosinus odn. tangens), vidi se iz krivulja na sl. 291.

43. Ostaje još da se bliže odrede konstante A i φ za oba slučaja 1) i 3) prema početnim uvjetima balističkih gibanja. A ti su: 1) otklonski se sistem kreće iz početnog položaja $\alpha = 0$ pri $t = 0$, što znači da kako u (V) tako u (VII) treba uzimati $\varphi = 0$; 2) otklonski sistem počima vrtnju s neposredno prije toga mehaničkim impulsom zadobivenom početnom (kutnom) brzinom $v_0 = \left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_{t=0}$. No to znači da treba načiniti prve deri-

vacije $\frac{d\alpha}{dt}$ funkcija u (V) odn. (VII) i staviti njih za $t = 0$ jednake v_0 . Kad se to učini, dobivaju se konačne relacije balističkih gibanja za slučajeve 1) odn. 3):

$$\alpha = e^{-\eta t} \cdot \frac{v_0}{\omega} \cdot \sin \omega t \quad (\text{Va})$$

$$\alpha = e^{-\eta t} \cdot \frac{v_0}{\beta} \cdot \operatorname{sh} \beta t \quad (\text{VIIa})$$

s kojima se mogu računati iznosi α pripadni ma kakvim iznosima t .

44. Ipak kod balističkih gibanja uglavnom će biti od interesa samo balistički otklon α_1 , najveći trenutno postignuti otklon koji galvanometar učini pod utjecajem prohujaloga kroz njegov pomični svitak strujnog udara. A zanimat će nas i vrijeme t_1 u komu se balistički otklon α_1 postizava. Kako balističkom otklonu odgovara maksimum funkcije α , a uvjet ekstremne vrijednosti neke funkcije jest da njezina prva derivacija iščezava, trebat će potražiti derivacije izraza desno u (Va) odn. (VIIa) i izračunati iznose $t = t_1$ korespondentne iščezavanjima tih derivacija. Supstituirajući dobivene t_1 dalje u (Va) odn. u (VIIa) dobivaju se onda i same vrijednosti balističkih otklona α_1 za oba slučaja 1) i 3).

Razradimo stvar potanje za slučaj 1). Stavljajući jednakom nuli derivaciju izraza desno u (Va), uz stavljeno t_1 mjesto t , dobili bismo:

$$\frac{v_0}{\omega} [-\eta \cdot e^{-\eta t_1} \cdot \sin \omega t_1 + e^{-\eta t_1} \cdot \omega \cdot \cos \omega t_1] = 0$$

i dalje, nakon kraćenja i uređenja: $\operatorname{tg}(\omega t_1) = \omega/\eta$, odnosno i obrnuto:

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \cdot \arctg \frac{\omega}{\eta} \quad (\text{Vb})$$

A, stavljajući dobiveno t_1 u (Va), s α_1 mjesto α , dobili bismo također:

$$\alpha_1 = \frac{v_0}{\omega} \cdot e^{-\eta \left(\frac{1}{\omega} \arctg \frac{\omega}{\eta}\right)} \cdot \sin \left[\omega \left(\frac{1}{\omega} \arctg \frac{\omega}{\eta} \right) \right]$$

$$\alpha_1 = \left| \frac{v_0}{\omega} \cdot e^{-\frac{\eta}{\omega} \arctg \frac{\omega}{\eta}} \cdot \sin \left(\arctg \frac{\omega}{\eta} \right) \right| \quad (\text{Vc})$$

Posve istog sastava relacije izišle bi u slučaju 3); označujući ih korespondentno sa (VIIb) odn. (VIIc) mi ih možemo zamisliti nastale iz

relacije (Vb) odn. (Vc) samo sa β mjesto ω , te sa $\arctg \frac{\beta}{\eta}$ mjesto $\arctg \frac{\omega}{\eta}$ t. j. s »areom« (površinom) koje je hiperbolički tangens th jednak $\frac{\beta}{\eta}$ mjesto s »arkusom« (lukom) koga je tg jednak $\frac{\omega}{\eta}$.

45. Međutim s dobivenim relacijama ne možemo još uvijek biti zadovoljni. Dolaze tu naime veličine koje se mogu nadomjestiti prikadnjima i mjerenju pristupačnijima, i treba u izrazima (Vc) odn. (VIIc) razbistriti što znače naoko nepregledne, a stvarno vrlo jednostavnog značenja, veličine kao $\sin \arctg$ odn. sh ar th . A prije svega od slabe je koristi u relacijama za α_1 sadržana proporcionalnost početne brzine v_0 s balističkim otklonom α_1 dokgod nije iz nje izvedena i proporcionalnost sa α_1 ukupno kroz galvanometar prohujale množine elektriciteta Q , koje prolaz tokom vanredno kratkog strujnog udara i jest proizveo početnu brzinu v_0 otklonskog sistema. Ta balistički se galvanometri baš zato i upotrebljavaju da bi mjerili naboje Q od inače ma kako proteklih strujnih udara!

46. Počimajući i opet sa slučajem 1) primijetimo da u (Vb) i (Vc) dolaze $\frac{1}{\omega} = \frac{T}{2\pi}$ te $\omega : \eta = \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{p}{2K} = \frac{2\pi}{\delta}$. A zatim zamislimo još da je u $\sin\left(\arctg \frac{\omega}{\eta}\right)$ izraz u zagradi neki kut γ ; obrnuto će se onda moći pisati: $\text{tg } \gamma = \frac{\omega}{\eta}$. Prema tomu vrijedi:

$$\sin\left(\arctg \frac{\omega}{\eta}\right) = \sin \gamma = \frac{\text{tg } \gamma}{\sqrt{1 + \text{tg}^2 \gamma}} = \frac{\frac{\omega}{\eta}}{\sqrt{1 + \frac{\omega^2}{\eta^2}}} = \frac{\frac{2\pi}{\delta}}{\sqrt{1 + \frac{4\pi^2}{\delta^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\delta^2}{4\pi^2}}}$$

A mogu se $\frac{1}{\omega}$ i $\frac{\omega}{\eta}$ također izraziti s pomoću s (uz $s < 1$) relacijama:

$$\frac{1}{\omega} = \frac{T_0}{2\pi \sqrt{1 - s^2}} \quad \frac{\omega}{\eta} = \frac{\sqrt{1 - s^2}}{s}$$

S navedenim vezama može se za t_1 u slučaju 1) mjesto (Vb) pisati alternativno:

$$t_1 = \frac{T}{2\pi} \arctg \frac{2\pi}{\delta} = \frac{T_0}{2\pi \sqrt{1 - s^2}} \arctg \frac{\sqrt{1 - s^2}}{s} \quad (\text{Vd})$$

i slično bi se mogli uvesti alternativno T i δ ili T_0 i s u izraz (Vc) za α_1 .

47. No u α_1 odmah ćemo još v_0 izraziti množinom elektriciteta Q , ukupno poslanom kroz galvanometar tokom strujnog udara, koji je prethodio balističkom gibanju i zadao sistemu početnu brzinu v_0 . Može se naime uzimati da se v_0 postizavalo u diferencijalnim prirastima $dv = \frac{d^2 a}{dt^2} \cdot dt$ u vremenskim diferencijalima dt tokom kratkog strujnog udara ukupnog trajanja t_0 , i po tomu pisati:

$$v_0 = \int_0^{t_0} \frac{d^2 a}{dt^2} dt$$

No kutna akceleracija, proizvađana nekom u galvanometar izvana slanom strujom i , može se zamisliti izražena kvocijentom $\frac{Gi}{K}$ strujom i proizvedenog »momenta vrtnje« Gi i »momenta tromosti« K otklonskog sistema. Moći se dakle pisati, uzimajući u račun da je očito $Q = \int_0^{t_0} i dt$, relacija:

$$v_0 = \frac{G}{K} Q$$

48. U dobivenoj vezi samo ćemo još eliminirati mjerno neprikladne veličine G i K , i to na bazi ovakvog rezoniranja: zamislimo da galvanometrom teče neka vremenski stalna struja I , od koje se galvanometar nakon umirenja otkloni na neki stalni otklon α . Po D-52. vrijedi onda relacija $I = C_0 \alpha$, s C_0 kao »strujnom konstantom« (u značenju »struje potrebne za jedinicu otklona«). Moment vrtnje od struje I može se pak izraziti sa GI , a time i sa $GC_0 \alpha$. A kako je kod stalnog otklona α moment vrtnje $GC_0 \alpha$ u ravnotežju sa suprotnim momentom vrtnje $D\alpha$ od torzionih sila: $GC_0 \alpha = D\alpha$, po ovoj relaciji, nakon kraćenja sa α , može se pisati $G = \frac{D}{C_0}$, i dalje:

$$v_0 = \frac{DQ}{KC_0}$$

odn. također, uz uzete u obzir veze (VIII) i (VII), te iznos $\eta: \omega$ izražen alternativno sa δ ili sa s , a nakon uređenja (koje se samo nadaje):

$$\alpha_1 = \frac{2\pi Q}{C_0 T_0} \cdot e^{-\frac{\delta}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{2\pi}{\delta}} = \frac{2\pi Q}{C_0 T_0} \cdot e^{-\frac{s}{\sqrt{1-s^2}} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{1-s^2}}{s}}$$

49. To pak konačno daje, u obliku neposredno prikladnom za praksu, traženu *fundamentalnu relaciju* o proporcionalnosti balističkih otklona α_1 s balistički mjerenim množenama elektriciteta Q po relaciji $Q = C_B \alpha_1$, s konstantom C_B po D-51. zvanom »balistička konstanta«, a za galvanometar u stanju prigušenih titraja sa $\delta < \infty$ odn. $s < 1$:

$$\left. \begin{aligned} Q = C_B \alpha_1 &= \frac{C_0 T_0}{2\pi} \cdot e^{-\frac{\delta}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{2\pi}{\delta}} \cdot \alpha_1 = \frac{C_0 T_0}{2\pi} \cdot e^{-\frac{s}{\sqrt{1-s^2}} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{1-s^2}}{s}} \cdot \alpha_1 \\ \text{pri: } C_B &= \frac{C_0 T_0}{2\pi} \cdot e^{-\frac{\delta}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{2\pi}{\delta}} = \frac{C_0 T_0}{2\pi} \cdot e^{-\frac{s}{\sqrt{1-s^2}} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{1-s^2}}{s}} \end{aligned} \right\} \quad (\text{Ve})$$

50. Posve analognim razmatranjima, samo dakako radeći ovaj put sa $\frac{1}{\beta} = \frac{T_0}{2\pi \sqrt{s^2 - 1}}$ i $\frac{\beta}{\eta} = \frac{\sqrt{s^2 - 1}}{s}$, dobile bi se iz (VIIb) odn. (VIIc) za aperioidična stanja sa $s > 1$ formule za t_1 i $Q = C_B \alpha_1$ (i to samo u obliku sa s , jer pojam δ kod aperioidskih gibanja gubi smisao):

$$t_1 = \frac{T_0}{2\pi \sqrt{s^2 - 1}} \cdot \operatorname{arth} \frac{\sqrt{s^2 - 1}}{s} \quad (\text{VIIId})$$

$$\left. \begin{aligned} Q &= C_R a_1 - \frac{C_0 T_0}{2\pi} \cdot e^{\frac{s}{\sqrt{s^2-1}} \operatorname{arth} \frac{\sqrt{s^2-1}}{s}} \cdot a_1 \\ C_H &= \frac{C_0 T_0}{2\pi} \cdot e^{\frac{s}{\sqrt{s^2-1}} \operatorname{arth} \frac{\sqrt{s^2-1}}{s}} \end{aligned} \right\} \quad (\text{VIIe})$$

Uz gred još napomenimo da se mjesto $\frac{\sqrt{s^2-1}}{s}$ u (VIIId) i (VIIe) katkad stavlja:

$$\frac{1}{2} \ln \frac{s + \sqrt{s^2-1}}{s - \sqrt{s^2-1}}$$

Ekvivalenciju je lako dokazati na bazi stavka: $\operatorname{arth} x = \frac{1}{2} \ln \frac{1+x}{1-x}$; s uvedenim preučešenjem lakše se aproksimiraju za naročito velike s : t_1 u $\frac{T_0}{2\pi} \frac{s}{\ln(2s)}$ i C_R u $\frac{C_0 T_0}{2\pi} \cdot 2s$, po čemu bi se na pr. pri $s = 200$ balistički otklon uspostavlja oko $200/\ln 400$ ili preko 33 puta brže, a balistička konstanta bila bi veća (odn. uz isto Q balistički otklon manji) oko $2 \cdot 200$ ili 400 puta nego uz $s = 1$.

51. Graničnim prelazima lako se s formulā (Vd) i (Ve), ili također s formula (VIIId) i (VIIe), dolazi i na relacije za t_1 i C_R za slučaj 2) galvanometra u graničnom aperijskom stanju, sa $R_v = R_n$. Tako se, ako se u (Vd), pri približavanju slučaju 2) sa $\delta = \infty$, zamisli δ vanredno veliko, i po tomu $\frac{2\pi}{\delta}$ posve neznatno, te ako se uzme u obzir da se

kod neznatnih $\frac{2\pi}{\delta}$ može $\operatorname{arctg} \frac{2\pi}{\delta}$ vrlo približno aproksimirati sa $\frac{2\pi}{\delta}$, kao

i da se $\frac{T}{2\pi}$ može izraziti sa $\frac{T_0}{2\pi} \sqrt{1 + \frac{\delta^2}{4\pi^2}}$, mjesto (Ve) uz dane pretpo-

stavke može pisati: $t_1 = \frac{T_0}{2\pi} \sqrt{1 + \frac{\delta^2}{4\pi^2}} \cdot \frac{2\pi}{\delta} = \frac{T_0}{2\pi} \sqrt{1 + \frac{4\pi^2}{\delta^2}}$, a time i kod $\delta = \infty$ staviti:

$$t_1 = \frac{T_0}{2\pi} \quad (\text{VID})$$

Slično se u formuli (Ve), čim više teži $\frac{\delta}{2\pi}$ k beskonačnom i time $\frac{2\pi}{\delta}$

k nuli, eksponent od e može uzimati približno jednakim iznosu $\frac{\delta}{2\pi} \cdot \frac{2\pi}{\delta} = 1$,

pa kod $\delta = 0$ u $Q = C_R a_1$ izlazi, kako se u D-59. tamošnjom formulom (I) bez dokaza tvrdilo:

$$C_H = \frac{C_0 T_0 e}{2\pi} \quad (\text{VIf})$$

Čitalac će za kontrolu lako izvesti formulu (VID) iz formule (Vd) također radeći sa s , i to zamišljajući granični prelaz na $s = 1$. A neka sličnim graničnim prelazom izvede i formulu (VIf) iz formule (Ve). Konačno može doći na (VID) i (VIf), dakle na formule za t_1 i C_R slučaja 2), i zamišljajući da opada k 1 u formulama (VIIId) i (VIIe) veličina $s > 1$.

52. Zanimljivi se rezultati dobivaju također zamišljajući u (Vd) i (Ve) da δ odnosno s postaju jako maleni. Radeći na pr. uz malene δ , dakle i malene $\frac{\delta}{2\pi}$ a velike $\frac{2\pi}{\delta}$, i znajući da je arkus tangensa velikog kuta $\frac{2\pi}{\delta}$ približno jednak pravom kutu $\frac{\pi}{2}$, polazeći od (Ve) uz malene δ možemo pisati približno:

$$t_1 = \frac{T_0}{2\pi} \sqrt{1 + \frac{\delta^2}{4\pi^2}} \cdot \frac{\pi}{2} = \frac{T_0}{4} \sqrt{1 + \frac{\delta^2}{4\pi^2}}$$

a za idealno neprigušen galvanometar sa $\delta = 0$ (otvoren i k tomu bez uzdušnog prigušenja) čak točno:

$$t_1 = \frac{T_0}{4}$$

rezultat koji se mogao i a priori očekivati, jer neprigušena sinusoida postizava svoju tjemenu vrijednost četvrt perioda nakon početka titraja.

Također je korisno potražiti i C_B za malene δ , a tim i malene $\frac{\delta}{2\pi}$ no velike $\frac{2\pi}{\delta}$. Očito se u takvim slučajevima, zbog približne veze $\frac{\delta}{2\pi} \cdot \frac{\pi}{2} = \frac{\delta}{4}$, mjesto s eksponencijalnim faktorom formula (Ve) može pisati jednostavnije sa $e^{\frac{\delta}{4}}$, ili čak još jednostavnije: sa $e^{\frac{\delta}{4}}$ dalje aproksimiranim u $1 + \frac{\delta}{4}$.

Često se s ovakvim pojednostavljenjima smiju približno računati balističke konstante vrlo visokima otporima R_v premoštenih i pogotovo otvorenih ($R_v = \infty$) galvanometara, kod kojih potonjih ostane samo još uzdušnog prigušenja. Ako se specijalno C_B i δ otvorenog galvanometra označe sa C_B' i δ' , moći će se pisati:

$$C_B' \approx \frac{C_0 T_0}{2\pi} e^{\frac{\delta'}{4}} \approx \frac{C_0 T_0}{2\pi} \left(1 + \frac{\delta'}{4} \right) \quad (\text{Ve}')$$

Ekstremno za $\delta = 0$ (galvanometar ne samo otvoren, sa $R_v = \infty$ i po tom sa $p' = 0$, nego i sa $p_0 = 0$, kako bi bilo kad bi galvanometar titrao u vakuumu) izišla bi po (Ve') čak balistička konstanta C_B'' posve neprigušena galvanometra:

$$C_B'' = \frac{C_0 T_0}{2\pi} \quad (\text{Ve}'')$$

za koju je već u D-59. bila pod (II) donesena ista formula, no bez dokaza.

Dodajmo samo još. u vezi s formulama za balističke konstante, da će se ove u praksi navoditi u »As/d. sk.« (ampersekundama po dijelu skale galvanometra), jer će se sa Q u As otkloni α očitavati na povoljnjoj jednolikoj skali galvanometra (a ne u radijanima, obično upotrebljavanima kod teorijskih razmatranja). Dakako da onda i stalne otklone α , od stalnih struja I , treba zamišljati u dijelovima te skale, i dosljedno dalje strujnu konstantu $C_0 = I/\alpha$ izražavati u »A/d. sk.« (amperima po dijelu skale).

53. Prema dobivenim rezultatima odlučno utječu na balistička mjerenja odnosi prigušenja, koji variraju s iznosima galvanometrova vanjskog otpora R_v .

Kad ovaj, kod nekoga određenog galvanometra, varira od $R_v = \infty$ (otvoreni galvanometar) prema $R_v = R_a$ (galvanometar u aperijskom graničnom stanju), i time s raste od male vrijednosti pripadne otvorenom galvanometru prema $s = 1$, javljaju se ove promjene:

a) period T prigušenih titraja, počimajući s iznosom pripadnim otvorenom galvanometru i samo neznatno većim od perioda T_0 neprigušenih titraja, raste najprije vrlo polagano i dalje sve naglije pri s sve blizima iznosu $s = 1$, težeći prema $T = \infty$ pri $s = 1$;

b) vrijeme t_1 potrebno da dođe do balističkog otklona opada samo polagano: od iznosa neznatno iznad $T_0/4$ prema iznosu $t_1 = T_0/2\pi$.

c) uz isto Q balistički otkloni α_1 već jače opadaju, a prema tomu iznosi balističke konstante rastu, od iznosa C_B' po (Ve') prema iznosu C_B po (VIe);

d) nakon postignutog balističkog otklona galvanometar se najprije polaganije »istitrava« prema položaju nula, i zatim se, kad teži prema stanju $R_v = R_a$ i $s = 1$, istitrava sve brže, a uz postignuto $s = 1$ se najbrže i već aperijski vraća k nuli, na položaj od koga može početi iduće mjerenje.

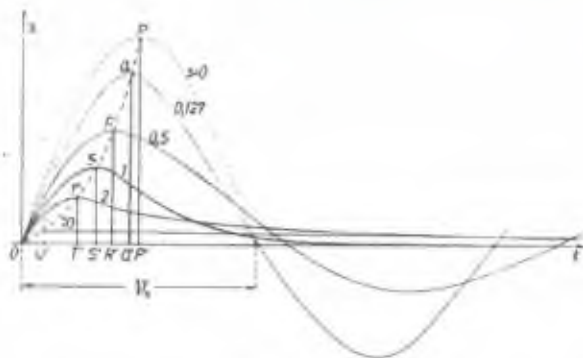
Kod još većih stepena prigušenja, kad s varira iznad 1, sve do vrlo visokih iznosa postizanih kad R_v teži prema nuli, iznosi t_1 već jače opadaju, a iznosi α_1 uz isto Q opadaju pogotovo naglo; odn. iznosi balističke konstante postaju sve naglije sve veći. A povratno gibanje odvija se aperijski i sve polaganije (sve »gmizavije«), zbog čega se s idućim mjerenjima mora sve dulje čekati, da se sistem vrati na nulu.

Odnosi pri raznim s lijepo se vide na sl. 292. s apscisama t i ordinatama α : s rastućim s opadaju ordinate α točaka P do U pripadnih balističkim otklonima pri $s = 0$ (idealizirani posve neprigušeni galvanometar, crtkana krivulja), pri $s = 0,127$ (kako bi moglo odgovarati nekom otvorenom galvanometru), pri $s = 0,500$, pri $s = 1$ (aperijsko granično stanje), te pri $s = 2$ i $s = 10$ (gmizava stanja galvanometra). Vidi se i krivulja PQRSTU, po kojoj opadaju stalnim nabojem Q izazvani iznosi α_1 i otklonska vremena t_1 , ordinate odn. apscise točaka P do U. A vidi se i da je vraćanje galvanometra k smirenom stanju najbrže pri $s = 1$. Pažnje vrijedna su također vrlo brza reagiranja na Q -impulse galvanometra pri $s = 2$ i pogotovo $s = 10$, no i vanredno »gmizava« povratna gibanja, pojav koji se kod još viših s pogotovo akcentuira.

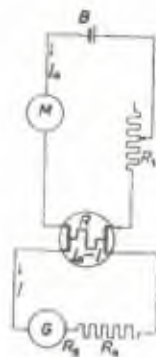
54. Uzmimo sad u obzir da će se u praksi balističkih mjerenja željeti brzo pestizavani, no uz to još i zadovoljavajuće veliki, balistički otkloni, a da će se ipak balistički morati upotrebljavati »tromi« galvanometarski sustavi dovoljno visokog T_0 , na pr. 20 ili 30 sekunda (da bi, kako se pri izvodima uzimalo, trajanje t_0 mjerenoga strujnog udara praktički iščezavalo prema T_0 i da bi se osiguralo dovoljno predaha da se balistički otkloni mogu još dobro očitavati), kao i da će konačno, zbog brzega mjerenja u većim serijama, trebati zahtijevati i što manje vrijeme umirenja na nulu galvanometra. Zbog tog će onda, kao kompromisno najpovoljnijem slučaju, prednost pripadati slučaju 2) galvanometra u aperijskom graničnom stanju. Pri tom će dakako, da bi se osigurao upravo pripadni iznos C_B po (VIe), trebati pedantno voditi računa da kod svakog mjerenja bude udešeno $R_v = R_a$. Zbog brzog povratka k nuli galvanometri se uostalom upotrebljavaju sa $R_v = R_a$ i kad se njima mjere struje po relaciji $I = C_B \alpha$.

Samo rjeđe balistički se mjeri i s otvorenim galvanometrom, odn. uz balističku konstantu C_B' po (Ve'): v. na sl. 124. mjerenje naboja Q poslana kroz galvanometar iz nabijenog kondenzatora. I tu je naime još t_1 dovoljno maleno, dok je C_B' čak i znatno povoljnije od C_B , pa se nešto dulje vrijeme smirivanja još trpi (a može se i galvanometar dok se istitrava premostiti otporom R_a).

Slučajevi sa s znatno iznad 1, i po tom s već prevelikim balističkim konstantama, i uz to s jako gmizavim aperiodskim povratnim gibanjima, za balističke primjene očito praktički ne dolaze u obzir; no od njih ćemo vrlo skoro doći na zanimljivu primjenu: fluksmetar.



Sl. 292.



Sl. 293.

55. Evo još podataka o utjecaju konačnog trajanja t_0 strujnog udara na točnost balističkih mjerenja s galvanometrom danoga T_0 . Kod prevelikog t_0 u odnosu prema T_0 balistički otklon, umjesto da bude α_1 , ispada za neki iznos $\Delta\alpha_1$ manji. Apsolutna pogriješka po A-13. je onda $-\Delta\alpha_1$, procentualna $p^0_0 = -100 \cdot \Delta\alpha_1 / \alpha_1$. Ova potonja može se sada izraziti

relacijom: $p^0_0 = -100 \cdot F \left(\frac{t_0}{T_0} \right) \frac{Q}{Q_0}$, u kojoj faktor F ovisi o vremenskom

toku struje i za vrijeme trajanja t_0 određenog strujnog udara. Kod konstantne struje i kroz vrijeme t_0 može se uzimati: $F = 1,6$ (kod strujnih udara s jakim strujama u početku i kasnije sve slabijima F ispada manje). Za primjer uzmimo da se galvanometrom »vlastitog titrajnog vremena« T_0 mjeri udar stalne struje podržavane kroz vrijeme t_0 dvadeset puta manje od T_0 : onda bi izišlo:

$$p^0_0 = -100 \cdot 1,6/400 \% = -0,4 \%$$

56. Balističke konstante uopće, dakle i praktički redovito jedine upotrebljavane C_B i $C_{B'}$ (galvanometra u aperiodskom graničnom stanju i otvorenog galvanometra), mogu se dakako određivati i neposrednim eksperimentima. Tako je već u D-56, bilo opisano određivanje po sl. 125. konstante C_B galvanometra zatvorenoga njegovim vanjskim graničnim otporom R_1 , gdje se primarna struja I nekog poznatog međuinaktiviteta M prekidala (ili također komutirala, što je davalo dvostruki efekt), pa se na pr. kod prekida struje I zaključivalo na C_B po formuli (III) iz D-56. sa $R_2 = R_g + R_0$. I eksperimentalno određivanje izbijanjem kondenzatora konstante $C_{B'}$ otvorenog galvanometra opisano je već u D-53. (paralelno dijelu otpora R na preklopu P odvojenom trebalo bi na pripadnoj sl. 124. zamišljati dodan voltmetar V).

Zanimljivo je sad da se balističke konstante mogu određivati i posve drugim putem, na pr. C_B i $C_{B'}$ na bazi formula (VIe) i (Ve'). Treba dakako onda prikladnim načinom odrediti titrajno vrijeme T_0 posve neprigušenog galvanometra, te za $C_{B'}$ još i pripadni dekrement prigušenja δ , a uz to treba prikladnom metodom izmjeriti i strujnu konstantu galvanometra C_0 .

Kako se T_0 , strogo uzeto, ne da direktno određivati, jer i otvoren galvanometar titra već prigušeno s nekim dekrementom δ' , postupa se tako da se odrede na pr. δ' i pripadno titrajno vrijeme T' , a s δ' i T' lako

se dobiva $T_0 = T' \sqrt{1 + \frac{\delta'^2}{4\pi^2}}$. Na T' se zaključuje uzimajući dvostruku

srednju vrijednost stop-urom mjerenih vremena između susjednih »nul-prolaza« (1, 2, 3 itd. na sl. 289.) kod titranja otvorenog galvanometra. Na δ' se pak dolazi motreći iznose pozitivnih i negativnih maksimā i minimā otklona (A_1, A_2, A_3 itd. na sl. 289.), i uzimajući za omjer prigušenja k' srednju vrijednost kvadrata omjera tih otklona, dakle veličinā (A_1/A_2)², (A_2/A_3)² itd., te dalje stavljajući: $\delta' = \ln k'$. Međutim kod male-
nih δ' može se bez daljega i aproksimativno uzimati: $T_0 \approx T'$.

57. Pri određivanju C_0 u prvi mah bi moglo izgledati najpraktičnije da se galvanometru, komu treba C_0 odrediti, serijski doda drugi galvanometar poznate strujne konstante C' . Kod iste struje I kroz oba galvanometra, ako bi prvi dao otklon α d. sk. i drugi otklon α' d. sk., vrijedila bi očito veza: $I = C_0 \alpha = C' \alpha'$, s kojom bi se C_0 lako dobilo iz C' , α i α' . No redovito ne će stajati na raspolaganju dva instrumenta tako sličnih osjetljivosti da bi se mogla primijeniti gornja metoda, kod koje bi još C' moralo biti i precizno poznato. Redovito će se zato usporediti ispitivani galvanometar s relativno mnogo manje osjetljivim ali zato i preciznije izvedivim miliampermetrom po metodi »galvanometra u shuntu«, sa spojem kao u sl. 293. Metoda se dađe i inače primjenjivati kod baždarenja vrlo nejednakih instrumenata (na pr. i u obrnutom smislu: za baždarenja ampermetra mjernog područja od više ampera usporedbom s preciznim miliampermetrom mjernog područja od malo miliampera, u kome bi se slučaju ampermetar stavio mjesto miliampermetra u sl. 293., a miliampermetar mjesto galvanometra).

Sad kod baždarenja galvanometra G po sl. 293. osnovna je ideja da se kroz G pošalje prikladan poznati dio I ukupne struje I_0 kroz miliampermetar M , iz izvora B crpene, regulacionim otporom R_1 udešene i instrumentom M pokazane. A ostatak $I_0 - I$ struje I_0 kroz M pusti se kroz malen precizni otpor R , priključen kao shunt grani otpora $R_g + R_a$ (dobivenoj serijskim spajanjem galvanometrova vlastitog otpora s galvanometrovim vanjskim graničnim otporom). Po poznatoj formuli razgra-
njivanja može se pisati:

$$I = \frac{I_0 R}{(R_g + R_a) + R}$$

i, zbog $I = C_0 \alpha$, odmah dalje:

$$C_0 = \frac{I_0 R}{(R_g + R_a + R) \cdot \alpha} \quad (\text{VIII})$$

Kao odlična potvrda gore iznesene teorije balističkih gibanja može se smatrati slaganje računski s pomoću C_0 , T' i δ' dobivenih balističkih konstanti C_B i C_B' s onima dobivenima direktno po D-56. odn. D-53.

58. Jako izražena ovisnost iznosa balističke konstante o prigušnim odnosima odn. o vanjskom otporu galvanometra zahtijeva ne samo da se kod rada sa C_B' osigura da je $R_v = \infty$, a kod rada sa C_B da trajno ostaje $R_v = R_a$ (u sl. 125. na str. 123. otporu R' svitka S_2 morao se dodati otpor R'' toliki da ispadne $R_a = R' + R''$), nego ona zaoštrava i pitanje smanjivanja osjetljivosti balističkih mjerenja shuntiranjem galvanometra.

Još je jednostavna stvar ako se galvanometar shuntira Ayrtonovim shuntom (pobliže o njemu v. K-29.) ukupnog otpora baš jednakog iznosu R_a upotrebljenog galvanometra, a mjere se naboji oslobođani izbijanjima

kondenzatora. U tom slučaju beskonačni otpor kondenzatora ne poremećuje R_a , i time ni ne mijenja iznos C_B . Sve što u takvom slučaju treba učiniti jest da se uzmu u račun dva razloga smanjenja osjetljivosti: smanjenje osjetljivosti zbog djelovanja shunta, koji samo dio naboja Q kondenzatora propusti kroz galvanometar, te dodatno smanjenje osjetljivosti radi povećanja balističke konstante u omjeru $C_B : C_B'$ pri prelazu od izbijanja kroz otvoreni galvanometar na izbijanje uz dodan Ayrtonov shunt.

59. No daleko teži postaje problem ako se na galvanometar shuntiran na pr. otporom R_a priključi strujna grana konačnog ukupnog otpora R_1 . Dok bi naime na stalnu struju iz ove grane galvanometar upotrebljavan na običan način reagirao samo toliko smanjenim stalnim otklonom koliko odgovara njegovu shuntiranju sa R_a , kod balističkih bi mjerenja trebalo dodatno računati i s time da bi se s gledišta galvanometra vanjski otpor galvanometra, prvobitno jednak R_a , djelovanjem grane R_1 smanjio od iznosa R_a na iznos kombinacionog otpora $R_a R_1 : (R_a + R_1)$, jer bi ovaj potonji otpor preuzeo sad ulogu vanjskog otpora R_v priključena na galvanometar. A sa smanjenjem od R_a na od njega manji R_v povećala bi se balistička konstanta, dakle dalje smanjila već shuntiranjem umanjena osjetljivost balističkih mjerenja.

60. Ipak se pokazalo da je moguće graditi specijalne shuntove za balističke galvanometre, slobodne od iznesene poteškoće. Već je u D-60., u vezi sa sl. 126., bilo naznačeno, bez dokaza, kako se mogu graditi shuntovi za balističke galvanometre, kod kojih ne dolazi do poremetnje konstante C_B pripadne aperiodskom graničnom stanju.

Evo sad i dokaza, odn. pripadnih formula za jedan stepen takvog specijalnog shunta sa smanjenjem osjetljivosti na n puta manji iznos. Radi se o tomu da se izračunaju iznosi otpora $A = B = R_1$ i $C = R_2$ takvi da kod preseljenja čepa C u sl. 126. iz položaja 1 (neshuntirani galvanometar premošten sa R_a) u položaj 2 balistički otklon postane n -struko manji, a da se iznos C_B ne poremeti. Da se to postigne, treba očito $C = R_2$ uzeti toliko da kroz serijski spoj galvanometrova otpora R_g i otpora $B = R_1$ prođe samo n -ti dio ili jedna n -tina ukupnog naboja Q strujnog udara, a to znači da ostatak ili $n - 1$ n -tina prođe kroz $C = R_2$. To pak vodi na relaciju:

$$R_2 = \frac{R_g + R_1}{n - 1} \quad (1)$$

S druge strane, uz priključeno R_a desno u sl. 126. i čep C u 2, s gledišta galvanometra G ovaj se može smatrati premošten vanjskim otporom R_v u obliku serijskog spoja otpora R_1 i paralelne kombinacije dviju grana: prve otpora R_2 i druge otpora $R_1 + R_a$, pa ako se želi da R_v ispadne jednako R_a , treba postaviti uvjet:

$$R_a = R_1 + \frac{R_2 (R_1 + R_a)}{R_2 + (R_1 + R_a)} \quad (2)$$

Supstituiranjem nepoznanice R_2 po (1) u jednadžbu (2), i elementarnim preobrazbama nastale kvadratne jednadžbe s nepoznanicom R_1 , došlo bi se konačno na jedini upotrebljivi korijen te jednadžbe (onaj negativni otpada, jer nema negativnih R_1):

$$R_1 = \frac{-R_g + \sqrt{R_g^2 + (n^2 - 1) R_a^2}}{n + 1} \quad (3)$$

S poznatim $R_1 = A = B$ lako bi se dobilo po (1) i $R_2 = C$ (može se naći i neposredna formula za R_2). Slično bi se računali, za dalji stepen osjetljivosti, korespondentan položaju 3 čepa C ; iznosi $A + A_1 = B + B_1$

i C_1 , a iz prvog iznosa i $A_1 = B_1$. Čitalac može lako provjeriti gornje formule tim da s njima sam izračuna rezultate dane u primjeru u D-60.

Treba dakako stalno paziti da pri svim položajima čepa Č na desni par stezaljki u sl. 126. uvijek bude priključen ukupno otpor R_a , t. j. da se na pr. pri $R_a = 480 \Omega$ svitku optora 30 Ω serijski doda 450 Ω , kod svitka od 80 Ω da se tih 80 Ω dopuni sa 400 Ω na 480 Ω , itd.

61. Uzet ćemo još od balističkih znatno drukčija mjerenja napravom zvanom *fluksmetar*, koja mjesto strujnih mjeri naponske udare. odn. ovima proporcionalne promjene magnetskih tokova (»fluksova«). Fluksmetri se upotrebljavaju alternativno s balističkim galvanometrima, koji pored očitih prednosti imaju i nedostataka. Tako mjerni sistemi balističkih galvanometara treba da budu velikog trajnog vremena, da bi se osigurao po K-55. poželjni što neznatniji omjer trajanja strujnog udara t_0 prema vlastitom trajnom vremenu T_0 , i da bi motrilac dospijevao dovoljno točno očitavati ipak tek trenutne balističke otklone α_1 . A s tromim sistemima se mjerenja sporije vrše. Pogotovo pak smeta što kod balističkih mjerenja na pr. za otvoreni galvanometar vrijedi jedna balistička konstanta C_B i za galvanometar u aperijskom graničnom stanju druga C_B' (pa se u ovom potonjem slučaju otpori različitih priključenih svitaka moraju nadopunjavati različitim dodatnim otporima na uvijek isti iznos R_0). Svih tih nepravilica kod fluksmetara nema, jer fluksmetri, u idealnom slučaju, reagiraju i na po volji sporo proizvedene promjene magnetskog toka, time da oni kod početnog toka Φ_1 zauzmu stalan početni otklon α_1 , a slično se i nakon polaganog mijenjanja do konačnog toka Φ_2 postave na stalan konačni otklon α_2 . Tako se α_1 i α_2 mogu na skali u punom miru očitavati, a za proračunavanje promjene $w(\Phi_2 - \Phi_1)$ ukupnog toka $\Psi = w\Phi$, uzimajući isti tok Φ kroz svaki od w zavoja na instrument priključenoga »mjernog« svitka, vrijedi, uz $G = Bw_0lh$ po K-30. i uz odnose kao na sl. 294.) relacija:

$$w(\Phi_2 - \Phi_1) = G(\alpha_2 - \alpha_1) \quad (\text{IX})$$

K tomu, kod malenih otpora R_0 fluksmetra, i (malenih) različitih otpora R_a raznih mjernih svitaka, pa čak ako ti svici imaju i različite brojeve zavoja w , ne treba nikakvih dodatnih otpora, jer u formuli (IX) ni nema otpora $R = R_0 + R_a$ fluksmetrova strujnog kruga.

62. Zapravo se fluksmetar može zamišljati nastalim iz galvanometra komu je, uklanjanjem ili bar radikalnim oslabljenjem torzionih sila na pomični svitak, direkciona sila D do iščezavanja smanjena, a njegov sistem malog otpora R_0 , skoro kratko premošten mjernim svitkom neznatnog otpora R_a , bivši u stanju ekstremno jakog prigušenja, dok je prepušten sam sebi praktički ni ne izvodi nikakvih gibanja. Prema tomu će za fluksmetar trebati zamišljati $D \approx 0$ i p vanredno veliko u jedn. (I) u K-34., t. j. trebat će poći od jednadžbe (I) specijalizirane u oblik:

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{p}{K} \cdot \frac{d\alpha}{dt} = \frac{G}{K} i \quad (\text{X})$$

Napišimo sad u (X) kutnu akceleraciju $\frac{d^2\alpha}{dt^2}$ u obliku $\frac{d\omega}{dt}$ s kutnom brzinom $\omega = \frac{d\alpha}{dt}$ sistema, te smatrajmo struju i proizvedenu djelovanjem

EMS iznosa $w \frac{d\Phi}{dt}$, inducirane mijenjanjem ukupnog toka $\Psi = w\Phi$ mjernog svitka (djelovanje »prigušne« struje i' u smislu izvoda iz K-34. obuhvaćeno je već drugim lijevim članom promatrane jednadžbe). te stavimo u (X), pri sa malenim $R = R_0 + R_a$ ogromnom p' prema p_0 .

umjesto p približno: $p' = G^2/R$ (v. K-34.), a mjesto i njegovu vrijednost $w \cdot \frac{d\Phi}{dt}$. dobit ćemo time diferencijalnu jednadžbu:

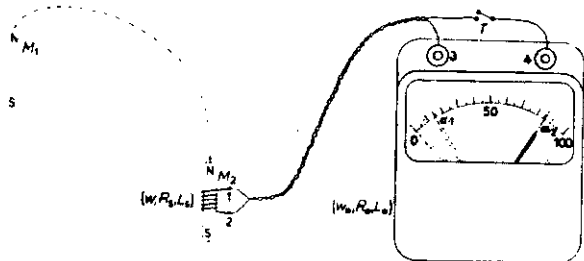
$$\frac{dw}{dt} + \frac{G^2}{KR} \frac{dw}{dt} = \frac{G}{KR} \cdot w \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

koju samo još treba integrirati unutar granica početnog iznosa Φ_1 i konačnog Φ_2 toka Φ , te pripadnih graničnih iznosa w_1 i w_2 kutne brzine ω odn. α_1 i α_2 otklona α fluksmetrova sistema; to daje:

$$\left[w \right]_{w_1}^{w_2} + \frac{G^2}{KR} \left[\alpha \right]_{\alpha_1}^{\alpha_2} = \frac{G}{KR} w \cdot \left[\Phi \right]_{\Phi_1}^{\Phi_2}$$

Iz ove pak potonje relacije, zbog $w_1 = w_2 = 0$ (bez vanjske struje ekstremno prigušen fluksmetrovi sistem ni nema brzine), neposredno slijedi, nakon kraćenja sa G/KR , tražena fundamentalna relacija fluksmetra (X).

Namjerno smo, zbog jednostavnosti, u gornjem izvodu zanemarili »samo-induktivne« efekte zbog induktiviteta L_0 i L_s fluksmetrova i mjernog svitka: nakon integracije oni bi i onako otpali, jer ih ni nema prije početka i nakon »vršetka« variranja toka Φ .



Sl. 294.

63. Prema (IX) konstanta G , u ovom slučaju zvana »konstanta fluksmetra«, izlazi kao kvocijent $w(\Phi_2 - \Phi_1) : (\alpha_2 - \alpha_1)$ produkta broja w zavoja mjernog svitka s mjerenom razlikom toka Φ kroz svaki zavoj mjernog svitka i pripadne razlike otklona α fluksmetra. Prema tomu se G lako eksperimentalno određuje. Neka se na pr. po sl. 294. u svitak od 36 zavoja, uz njegove stezaljke 1-2 priključene na stezaljke 3-4 fluksmetra pri zatvorenoj tipki T , utakne magnetski štap toka 0,00024 Vs (Wb) ili 24000 M, time da se taj štap s udaljenog položaja M_1 pomakne na položaj M_2 gdje svitak obuhvaća sredinu štapa kao jezgru. Time se ukupni tok svitka povisi na od 0 na 0,00024 Vs (Wb) odn. od 0 na 24000 M, pa ako na to povišenje toka fluksmetar odgovori povišenjem otklona od početnih 14 na konačnih 86 d. sk., kao na sl. 294., očito će se moći pisati:

$G = 36 (0,00024 - 0) : (86 - 14) = 0,00012$ »voltsekunda-zavoja po d. sk.«
odnosno:

$G = 36 (24000 - 0) : (86 - 14) = 12000$ »maksvel-zavoja po dijelu skale«.
To ujedno znači da bi »mjerno područje« fluksmetra, sa skalom od ukupno 100 dijelova po sl. 294., bilo: $0,00012 \cdot 100 = 0,012$ Vs (Wb) ili $12000 \cdot 100 = 1,2 \cdot 10^6$ M. Prema tome veće G znači veće mjerno područje fluksmetra, odn. manje G veću osjetljivost. Uostalom osjetljivosti fluksmetričkih mjerenja mogu se, kod danoga G , lako povećavati upotrebom svitaka s većim brojem zavoja: kod većega w proporcionalno se uz isto $\Phi_2 - \Phi_1$ poveća $\alpha_2 - \alpha_1$.

Mogu se fluksmetri dakako baždariti i drukčije, na pr. tim da se »komutira« struja I primarnog svitka nekoga poznatog međuinduktiviteta

M , komu je sekundarni svitak priključen na fluksmetar. Kako tim komutiranjem nastaje promjena $2MI$ ukupnog toka kroz sekundarni svitak, a ta se promjena može izjednačiti sa $G(\alpha_2 - \alpha_1)$, gdje je $\alpha_2 - \alpha_1$ pripadni pomak fluksmetra, odmah se dobiva:

$$G = 2MI : (\alpha_2 - \alpha_1)$$

Lako je dosjetiti se kako bi se slično primjenom prikladnih promjena toka Φ također fluksmetar vraćao na nulu skale ili blizu njoj (iako kod mjerenja svaki položaj α_1 može biti polazni, i prema njemu se udesi konačni položaj α_2 , pa je prema tomu od interesa za mjerenja samo diferencija $\alpha_2 - \alpha_1$).

64. Rečeno je bilo da fluksmetar mjeri bilo promjene magnetskih tokova bilo »naponske udare«. I doista integral $\int d\Phi$ može se preudisiti, primjenom veze $e = \frac{d\psi}{dt} = w \frac{d\Phi}{dt}$, u integral $\int e \cdot dt$ »naponskog udara« (analogan integralu $\int i \cdot dt$ »strujnog udara«).

Zapravo bi idealan fluksmetar morao bez vanjskih utjecaja mirovati na svakom mjestu skale, odn. on uopće ne bi imao određenu nulu skale. Ipak, zbog residualnih torzionih sila, i teškoća savršenog »balansiranja« pomičnog sistema, ovaj će potonji, prepušten sam sebi, težiti k svojoj »mehaničkoj nuli«, općenito različitoj od onog što se naznači kao početak skale, no dakako tek s ekstremno gmizavim pomicanjem kraj ogromnog prigušenja sistema premoštenoga svitkom malena otpora. Ovo vrlo sporo pomicanje (engl. »drift«) ipak još dopušta da se dovoljno točno očitaju položaji α_1 odn. α_2 fluksmetra, ali bi za neka mjerenja (na pr. za snimanja krivulje histerize) bili prikladniji fluksmetarski sistemi kod kojih bi svaki drift bio praktički spriječen. Inače se fluksmetri, već prema potrebnoj osjetljivosti, grade »vrpcom obješeno« ili »vrpcom napeto« analogno zrcalnim galvanometrima ili onima sa svijetlom markicom, odn. »vrpcom napeto« s materijalnim kazalom.

Fluksmetri se u novije vrijeme sve više upotrebljavaju mjesto balističkih galvanometara, na pr. za ispitivanja permanentnih magneta, a i kod drugih rutinskih mjerenja u tvorničkim pogonima, gdje često mjerenja vrše i manje izobražene sile, koje fluksmetarske otklone pouzdanije očitavaju nego balističke.

Uz E-10.

65. Umjesto u E-10. navedenog označivanja moguće je (i tipografski je možda prikladnije) na pr. impedanciju iznosa 12Ω i faznog kuta 60° simbolizirati sa $12 \Omega \angle 60^\circ$, kako je to u piščevoj djelu »Osnovi elektro-tehnike« i provedeno.

Uz E-18.

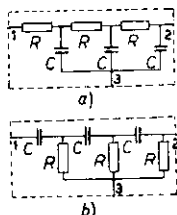
66. Kod paralelnog spoja dvaju svitaka istih samoinduktiviteta L , vezanih određenim međuinduktivitetom M , dobiva se četverostruko manji iznos ukupnog samoinduktiviteta nego pri serijski spojenim istim svicima uz isto M (paralelni se induktiviteti kombiniraju analogno paralelnim otporima). Tako se kod jednog poznatog »induktometra« (mjernog varijabilnog samoinduktiviteta s nepomičnim svitkom samoinduktiviteta $L = 14$ mH, i u njemu toliko vrtivim svitkom istog samoinduktiviteta $L = 14$ mH da se raznim položajima vrtivog svitka mogu udešavati iznosi M od -11 preko 0 do $+11$ mH, serijskim spojem dadu realizirati samoinduktiviteti od $L'' = 14 + 14 - 2 \cdot 11 = 6$ mH sve do $L' = 14 + 14 + 2 \cdot 11 = 50$ mH, a uz upotrebu i paralelnog spoja obih svitaka još i samoinduktiviteti od $L_0'' = 1.5$ mH do $L_0' = 12.5$ mH, t. j. paralelnim spojem proširuje se mjerno područje prema dolje.

Uz E-23.

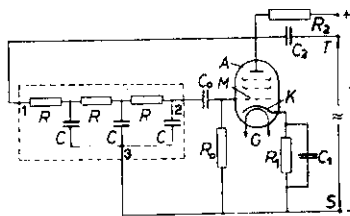
67. Polazeći suprotnim putem nego kod kondenzatora s komprimiranim plinovima mogu se također graditi odlični kondenzatori, pa i mjerni, upotrebljivi i uz vanredno visoke napone. S današnjom usavršenom vakuumskom tehnikom moguće je naime, stavljajući (zaobljene pločaste) obloge kondenzatora u na pr. staklene posude s najvišim danas dostizivim i održivim vakuumima, dobiti takve »visokonaponske visokovakuumske kondenzatore« u kojima ni kod naponâ od više desetaka pa i stotina kV ne dolazi do električkog proboja između obloga.

Uz E-30.

68. Kao relativno novi sve više se susreću reakcioni R-C-oscilatori koji, mjesto s »titrajnim krugovima« sa L i C (i po tom s frekvencijom određenom produktom LC), rade s prikladnim kombinacijama radnih otpora R i kapaciteta C , na pr. kao na sl. 295. s tri jednaka otpora R i



Sl. 295.



Sl. 296.

tri jednaka kapaciteta C , alternativno spojena kao pod a) u tročlani »R-C-lanac« ili kao pod b) u tročlani »C-R-lanac«. I ovakvim se naime kombinacijama mogu proizvoditi za samouzbuđivanje oscilatora potrebna obrnuta faza reakciono na mrežni krug s anodnoga prenošenoga dijela cijevnog pojačanoga signala, odakle i drugo ime ovakvim oscilatorima: »oscilatori s faznim zakretom«. Baš kod tonskih frekvencija, pa prema tomu i u zujalima za mjerne svrhe, treba smatrati kao prednost ovih oscilatora da se potrebne kombinacije otpornika i kondenzatora za određenu tonsku frekvenciju lakše realiziraju nego voluminoznim svicima i kondenzatorima odgovarajućih titrajnih krugova. Tako se sa spojem na sl. 295. pod a) realiziraju titrajne frekvencije $f = 0,065/RC$ i s onim pod b) titrajne frekvencije $f' = 0,39/RC$ (šest puta više nego prethodne), a do samouzbuđivanja dolazi uz pojačanje od barem 29. Kod četveročlanih kombinacija odnosi su drukčiji, kod onih s različitim otporima i kapacitetima u pojedinim članovima oni su pogotovo zamršeni.

69. Da se dobije cijevni oscilator s kombinacijama po sl. 295., potrebno je samo prvu ili drugu od njih uključiti stezaljkama 1-2-3 u oscilatorni dovoljno pojačavajući spoj po sl. 296., na pr. s pentodom s indirektnim grijačem G , katodom K , prvom mrežicom M i anodom A , s vezom na M putem veznog kondenzatora C_0 i visokoomskog odvodnog otpora R_0 , te s ostalim važnijim priključcima kako je detaljizirano u slici; oscilacije se mogu crpsti preko S i T , no dobro ih je prethodno pojačati jednim stepenom cijevnog pojačavanja. Za konkretni slučaj u sl. 296. ucertinoga tročlanog lanca iz sl. 295. pod a) za $f = 1000$ Hz trebalo bi uzeti $RC = 0,000065$, što bi na pr. uz $R = 10000 \Omega$ dalo $C = 6,5 \cdot 10^{-9} F (= 6,5 nF)$. Kod pažljive konstrukcije ovi oscilatori mogu davati titraje vrlo blize najčešće traženima sinusoidnima. Cijevne aparature dakako redovito sadrže uređaj za pogon iz rasvjetne mreže.

70. U najnovije se vrijeme razni dosad s cijevima građeni spojevi »transistoriziraju«. Tako se i gornji oscilatori danas već uspješno grade s transistorima, i onda su oni pogotovo malena volumena, i tako neznatnog potroška snage da mogu biti napajani iz maljušnih niskonaponskih baterija, t. j. mogu raditi bez priključka na mrežu. Za primjer navedimo podatke za jedan baš nedavno (1959.) izneseni ovakav S&H-oscilator: tjeran iz baterije od samo 30 V on daje (s pomoću preklapanja otpora i kapaciteta) oscilacije s područja 3 do 30000 Hz, koje na pr. pri mnogo upotrebljavanoj frekvenciji 800 Hz, dosežući napon 2,5 V, ne odstupaju od sinusoidnih za više nego odgovara »faktor distorzije« (v. E-26.) od jedva $D = 0,001$ ($D\%$ = 0,1%); k tomu frekvencije proizvedenih oscilacija tek neznatno variraju i pri većim variranjima napona pogonske baterije i temperature.

Uz E-37.

71. U praksi se »sinhronizirani« fazno udesivi kontakti ispravljači, umjesto kao titrajni ispravljači po sl. 150. iz E-37., mnogo grade i s kontaktom koji se tjera maljušnim sinhronim motorom, katkad ugrađenim, zajedno s kontaktim raspoređajem za fazno udesiva spajanja i prekidanja kontakta, u isto kućište s pripadnim pokaznim istosmjernim instrumentom poput f iz sl. 150. Tako je građen na pr. (novi) »AEG-Vektormesser«.



Sl. 297.

72. Zapravo svi ovakvi mehanički ispravljači imaju daleko mnogostranijih mjernih primjena nego kad ih se upotrebljava samo za svrhe ispravljanja. Konkretno se njima neka vektorska veličina dađe mjeriti po iznosu i fazi, odn. dađu se mjeriti njezine komponente, na pr. radna i prazna (jalova) komponenta struje proizvedene primjenom. danog izmjeničnog napona kroz potrošač u obliku određene impedancije.

73. Da ilustriramo stvar svedenu samo na najbitnije, zamislimo po sl. 297. neki sinusoidni napon efektivnog iznosa U primjenjen na impedanciju $R + jX$. Proizvedena struja neka je efektivnog iznosa I i faznog pomaka φ prema naponu, i po tom radne komponente $I \cos \varphi$ i prazne $I \sin \varphi$. Očito će onda točka 1. [u sl. 297. pod a) nenacrtane] sinusoide napona biti i početak naponu istofazne sinusoide i_r radne komponente efektivnog iznosa I_r , dok će sinusoidu i_p prazne komponente I_p trebati zamišljati fazno za 90° pomaknutu prema naponu, s pripadnom nul-točkom 2 po sl. 297. Rezultujuća sinusoide i ukupne struje efektivnog iznosa I s početkom za φ pomaknutim prema 1, može se onda zamišljati dobivena algebarskim sumiranjem, za pojedine momente, ordinata sinusoide i_r i i_p . Ako se sad mogu momenti spajanja i prekidanja kontakta ispravljača tako udesiti da ukapćanje struje počima u momentu 1, i traje pola perioda do momenta 3, nakon koga slijedi interval iskapćanja 3-5. i tako redom dalje, bit će propuštane po sl. 297. pod b) baš cijele pozitivne polovice sinusoide i_r radne komponente I_r ukupne struje, i ne će biti propuštane negativne polovice te sinusoide. Istodobno ne će

biti propuštane intervalima 3-4 i 4-5 pripadne četvrtine sinusoide i_p , prazne komponente I_p , a biti će propuštane četvrtine pripadne intervalima 1-2 i 2-3, koje će se međutim, zbog suprotno jednakih ordinata u njima, međusobno poništavati (uspor. na slici horizontalno šrafiranu polovinu 1-3 sinusoide i_r i vertikalno šrafirane četvrtine 1-2 i 2-3 sinusoide i_p). Pripadni istosmjerni instrument f ispravljačke kombinacije pokazivat će dakle kod ovako udešena ispravljanja samo polovinu »aritmetičke srednje vrijednosti« (srednje vrijednosti apsolutnih iznosa) sinusoide i_r , dakle, po poznatim vezama (E-3.) za sinusoidne veličine, $0,5 \times 0,9$ -kratnik (= 0,45-kratnik) efektivnog iznosa I_r radne komponente ukupne struje, t. j. on će preko određenoga faktora preračunavanja pokazivati zapravo komponentu I_r , ne reagirajući uopće na komponentu I_p . Tako će ispravljač, uz pretpostavljeno fazno udešenje otvaranja i zatvaranja kontakta, u neku ruku »selektivno« mjeriti radnu komponentu neke struje ignorirajući praznu.

74. Baš obrnuti odnosi nastaju po sl. 297. pod c), kod fazno za 90° pomaknutih (točkom 2 i kasnijima analognima određenih) momenata spajanja kontakta, i pola perioda kasnijih prekidanja (kod 4 i analogno dalje). Promatrajući u ovim prilikama propuštane poluperiode kao 2-4 sinusoide i_p , i međusobno se poništavajuće četvrtperiode kao 2-3 i 3-4 sinusoide i_r (vidi vertikalno šrafiranu plohu sinusoide i_p i horizontalno šrafirane sinusoide i_r), lako se vidi da bi ovaj put instrument f pokazivao samo polovinu »aritmetičke srednje« vrijednosti iznosa sinusoide i_p , dakle da bi pokazivao istosmjerni iznos proporcionalan praznoj komponenti struje I_p , a time indirektno i samu tu komponentu I_p (izračunljivu kao i malo prije uz uzet u obzir faktor 0,45), dok sada od komponente I_r ne bi bilo nikakvoga djelovanja.

75. Ukratko, zaključujući iz otklonâ očitanih na skali od f jednom na I_r i drugiput na I_p mogu se, po sl. 297. pod d), određivati vektorski odnosi struje I prema naponu U ; mogu se odrediti strujne komponente I_r i I_p , a iz ovih dalje i ukupna struja I i njezino »fazno zaostajanje« φ prema naponu U , po relacijama:

$$I = \sqrt{I_r^2 + I_p^2} \quad (1) \qquad \operatorname{tg} \varphi = I_p / I_r \quad (2)$$

A mogu se, na bazi sl. 131. uz E-7., također naći i iznos $Z = U/I$ impedancije (tereta) kroz koji je U proizvelo I , te fazni kut φ te impedancije dan relacijom (2), pa $R = Z \cos \varphi$ i $X = Z \sin \varphi$ tereta, itd. Sve to jasno ukazuje na mnogobrojne važne mogućnosti primjena fazno udesivih sinhronih kontaktnih ispravljača kao »vektorskih mjerila«.

76. Međutim gornji jednostavni odnosi vrijede tek za sinusoidne struje, proizvedene sinusoidnim naponima, dakle na pr. za struje »prigušnica« i neopterećenih ili samo slabo opterećenih transformatora sa željeznom jezgrom, kod kojih se i uz sinusoidan napon (utjecajem nepravilnosti magnetiziranja i gubitaka u željezu) uspostavljaju sinusoidne struje s nekim harmoničnim članovima, ponajpače trećim. Sad, utjecaji viših harmonika mogu se umjesnim postupcima i eliminirati. Ne ulazeći u druge slučajeve, zamislimo kao primjer treću harmoniku kružne frekvencije 3ω u obliku negativne sinusoide koja počinje istodobno s pozitivnom osnovnom sinusoidom kružne frekvencije ω . Ako se ova potonja sinusoida zamisli kao i_p u sl. 297., i ako se interval propuštanja od 2-4 ili 180° , kako je uzet na sl. 297. pod b), produlji na 240° , očito će nestati utjecaja 3. člana, jer povećanom intervalu odgovaraju dvije negativne i dvije pozitivne polovine sinusoide 3. člana, koje će se međusobno poništiti u djelovanju na f , dok će propušteni u intervalu 240° dio osnovne sinusoide sadržavati veći pozitivni i manji negativni dio, pa će suviškom pozitivnog dijela ipak doći do nekog djelovanja na f , iz koga će se, preko manjeg faktora od faktora 0,45 pripadnog in-

tervalu 180°, ipak moći zaključivati na I_n . Tako očito vektorska mjerila ne ostaju ograničena samo na sinusoidne veličine. Detalji se najbolje nalaze u uputama uz takva mjerila.

Uz E-61.

77. Pored »klasičnog« spoja po sl. 169. iz E-61., koji je Schering donio prije 4 decenija, s vremenom su se pojavile i neke varijante Scheringova mosta. Tako se naročito za veće duljine ispitivanih kabela dosta upotrebljava varijanta po Scheringu i Burmesteru (opisana u ZS. f. Instrum.-Kunde, 44, 1924); kod nje je otporu R_1 iz sl. 169. paralelno dodan otpor $R_5 + R_7 + R_6$, od koga se sa R_7 potenciometerski odvaja varijabilni kontakt k jednom polu nulinstrumenta.

Uz E-70.

78. Evo još i podataka za 1/100-normalnu (=centinormalnu) KCl-otopinu, koja se također mnogo upotrebljava (za baždarenje stanica poput onih po sl. 174. iz E-68. za slabije vodljive tvari); njezine vodljivosti kod 18 odn. 20 °C jesu 0,001225 odn. 0,001278 S/cm.

Uz E-72.

79. Nakon EM1-cijevi, jedne od prvih »magičnih oka« u prijemnicima radia, ali upotrebljavane po E-72. i u funkciji nulindikatora u mostovima, pojavilo se mnogo daljih tipova cijevi za slične svrhe, samo znatno savršenije građenih. Nema svrhe da se pojedine od tih modernijih cijevi posebno spominju; neke od njih, kombinirane s prikladnim pojačalima, otvorile su gotovo fantastične mogućnosti u izmjeničnim mostovima. Tako na pr. »elektronički nulindikator« S&H, s pojačalom i s cijevi EMM81, upotrebljavan u izmjeničnim mostovima i kompenzatorima reagira na najosjetljivijem području već na desetine mikrovolt, ne trošeći više od 10—17 W po mm promjene indikacije.

Uz F-12.

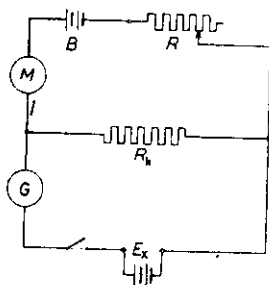
80. Prije nego što se više kaže o automatskom udešavanju kompenzatora, neka bude spomenuto da se kod kompenzacije može postupati dvovrsno. Stariji postupak po Poggendorffu u bitnosti se osniva na usporedbi mjerenog napona E_x s točno poznatim naponom E (na pr. naponom normalnog elementa), pri nareguliranoj na neki stalni iznos I struji kroz kompenzacioni otpor. Taj iznos I , koji inače ni ne treba biti točnije poznat, udesi se po sl. 210. iz F-2., regulacionim otporom R , koji se tokom daljega mjerenja više ne dira, a izvor B (redovito vrlo malene) struje I mora biti posvema konstantan (u tu se svrhu baterija B uzme iz velikih akumulatorskih elemenata). Tako, uz dano I , pri E kompenziranom u sl. 210. otporom R' duljine $M'N'$ i uz E_x kompenzirano otporom R'' duljine $M'N''$ kompenzacionog otpora ukupne duljine MN , i uz pretpostavku proporcionalnosti iznosa R' i R'' sa $M'N'$ i $M'N''$, očito za E_x vrijedi: $E_x = E \cdot R'/R = E \cdot M'N''/M'N'$.

81. Baš suprotno, po Lindeck-Rotheovu postupku po sl. 298. kompenzacioni otpor R_k , točno poznat, ostavlja se stalan, a na mjereni napon E_x se zaključuje po relaciji $E_x = IR_k$, prema čemu se struja I iz B regulacionim otporom R mora udešavati prema iznosu E_x , sve dok nulinstrument G ne pokazuje nulu struje. Prema tomu se sad radi bez normalnog napona E , namjesto koga se moraju točno udešavati razne struje I za razne E_x , pa se iznosi I očitavaju na što preciznijem instrumentu M (za struje I od nekoliko mA dadu se graditi vrlo točni mihampermetri M).

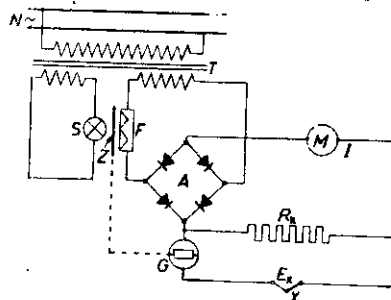
82. Sad, ako se žele automatska udešavanja za razne E_x , ili čak automatska registriranja vremenskih variranja iznosa E_x , Lindeck-Rotheov postupak pokazao se prikladnijim, odn. on omogućava automatska udešavanja s manjim sredstvima. Narocito jednostavan primjer za to pred-

stavlja spoj po sl. 299., koji radi čak s pogonom iz mreže N izmjenične struje, a instrumentom M očitavane struje I služe, pri prikladno odabranom stalnomu R_k , kao mjerilo proizvedenih napona (EMS) E_x termoelementa X, a time u daljoj konsekvenciji i temperaturā t mjerenih tim termoelementom.

83. U sl. 299. transformatorom T, napajanim iz N, snabdijeva se iz jednoga od oba njegova sekundarna namotaja, preko specijalnoga na svjetlost osjetljivog otpornika F i ispravljačkog (Graetzova) mosta A, istosmjernom strujom kompenzacioni spoj iz sl. 298., ovaj put sa EMS E_x iz termoelementa X. Drugim sekundarnim namotajem žari se sijalica S, koja osvjetljava F. Za automatsku regulaciju iskorišćuje se okolnost da se fotoosjetljivom otporniku F, na pr. iz kadmijeva sulfida CdS ili iz koje druge tvari sličnih svojstava, otpor vrlo jako smanjuje kad raste tok svjetlosti što zgada F; tako je otpor u tami jedne određene CdS-stanice iznosio 10 MΩ, a pri rasvjeti cijele plohe stanice sa 1000 lx (luksa) pao je na 200 Ω. Međutim na tok svjetlosti što bi iz S neposredno (bez zapreke) udarao na F može se utjecati gibanjima pomičnog sistema nulinstrumenta G, izvedena u ovom slučaju u obliku galvanometra bez »direkzione sile«. Takav se galvanometar sve dalje otklanja, i preko prikladnog, na sl. 299. crtkano naznačenog mehaničkog prenosa pomiče



Sl. 298.



Sl. 299.

zaslon Z između S i F zaslanjajući time manje ili više F od S. A prestaje se G dalje otklanjati kad u njem nestane struje, pa se Z onda zaustavi u određenom položaju, odn. pri određenom iznosu otpora otpornika F, te u daljoj konsekvenciji pri određenoj struji I kroz M. Drugim riječima: Z se zaustavi kad struja kroz M postigne baš onaj iznos I uz koji se upravo kompenzira E_x sa IR_k , a kod drugih E_x se i Z zaustavlja kod drugih I uz koje se E_x -iznosi baš kompenziraju s pripadnim padovima napona na R_k . Udešavanje je tako doista automatsko: raznim iznosima E_x odgovaraju određeni I . Ako se M zamijeni prikladnim aparatom za registriranje I -iznosa, registrirao bi, posredno, taj aparat vremenske promjene EMS E_x odn. termoelementom X mjerene temperature t . Važno je da se gornjim načinom mjere EMS, a ne naponi stezaljki opterećena termoelementa X, pa ne treba, kao kod običnog priključka termoelementa na mjerni instrument, prilagodivati termoelement i njegova dovode na neki određeni otpor. Slično bi se, dakako, lako automatski mjerile ili registrirale i druge veličine, kao pH (F-11.). Postoji i razrađeniji spoj, kod koga se preko F utječe na rešetku radiocijevi.

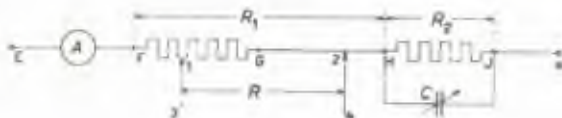
Uz F-15.

84. Za dokaz tg δ -relacije (I) iz F-15. dovoljno je potražiti simboličkom metodom ukupnu impedanciju serijskog spoja po sl. 300. otpora R , i paralelne kombinacije otpora R_2 s kapacitetom C . Izražavajući ovu potonju analogno razlcmku (VI) iz E-42., samo dakako s R_2 namjesto tamo-

šnjega R_4 , i proširujući taj razlomak faktorom $1 - j\omega CR_2$, dobili bismo za traženu impedanciju izraz kao lijevo u relaciji (A), koji se daje urediti u izraz kao desno u relaciji (A):

$$R_1 + \frac{R_2(1 - j\omega CR_2)}{1 + \omega^2 C^2 R_2^2} = \frac{R_1 + R_2 + R_1 \cdot R_2^2 C^2 \omega^2}{1 + \omega^2 C^2 R_2^2} - j \frac{\omega CR_2^2}{1 + \omega^2 C^2 R_2^2} \quad (A)$$

I sad zakret faza naprijed struje kroz ispitivanu impedanciju, prema naponu na nju primijenjenju, očito je jednak negativnom faznom kutu izraza desno u (A), što neposredno, nakon kraćenja sa $1 + \omega^2 C^2 R_2^2$, vodi na (I) u F-15.



Sl. 300.

Uz G-5. do G-9.

85. Od propisa za mjerne transformatore, nacionalnih i internacionalnih, čitalac će uvijek konzultirati one koji su baš na snazi. Propisi VDE 0414/7.56 (a dodatno postoje i VDE 0414a/5.58) sadrže i klasu točnosti 0,1 (»promille-transformatori«, strujni i naponski), a klasu 10 strujnih transformatora više ne sadrže. K tomu se, pored klasa 0,1 do 3 strujnih transformatora s običnim područjem mjernih struja od $0,1 \cdot I_n$ do $1,2 \cdot I_n$ (I_n = nominalna struja) predviđaju i klase 0,1 G do 3 G s proširenim mjernim područjem struja od $0,05 \cdot I_n$ do $2,0 \cdot I_n$. Od naponskih mjernih transformatora postoje samo klase 0,1 do 3, jer se naponi ionako mjere tek u blizini nominalnoga, pa tu zadovoljava mjereno područje od $0,8 \cdot U_n$ do $1,2 \cdot U_n$ (U_n = nominalni napon). U pogledu granica postotnih i kutnih pogrešaka treba danas zamišljati u sl. 227. i 228. dodane parove graničnih linija pogrešaka za strujne mjerne transformatore klase 0,1 i 0,1 G: za klasu 0,1 kod $1,2 \cdot I_n$ i $1,0 \cdot I_n$ granice su $\pm 0,1\%$ i $\pm 5'$, kod $0,2 \cdot I_n$ odn. $0,1 \cdot I_n$ granice su $\pm 0,2\%$ i $\pm 8'$ odn. $\pm 0,25\%$ i $\pm 10'$. Za klasu 0,1 G kod $2,0 \cdot I_n$ i $1,0 \cdot I_n$ granice su $\pm 0,1\%$ i $\pm 5'$, kod $0,2 \cdot I_n$ granice su $\pm 0,2\%$ i $\pm 8'$, kod $0,1 \cdot I_n$ granice su $\pm 0,25\%$ i $\pm 10'$, konačno kod $0,05 \cdot I_n$ granice su $\pm 0,4\%$ i $\pm 15'$. Za klase 0,2 G do 3 G vidi u propisima. Kod naponskih mjernih transformatora klase 0,1 granice između $0,8 \cdot U_n$ i $1,2 \cdot U_n$ su $\pm 0,1\%$ i $\pm 5'$ (U_n = nominalan napon). Ostale detalje vidi u propisima.

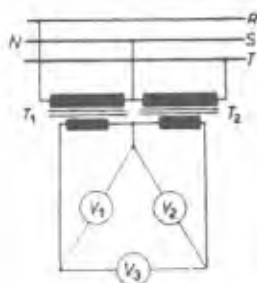
Uz G-12.

86. Za »V-spoj« triju voltmetara V_1 do V_3 preko samo dva naponska mjerna transformatora T_1 i T_2 , napajana iz trofazne R-S-T-mreže N, vidi shemu po sl. 301.

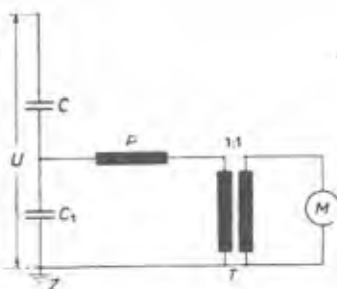
87. Moderni rasporedaj s kapacitivnim mjerenjem efektivnih iznosa visokih napona U vidi na sl. 302. Paralelno kondenzatoru kapaciteta C_1 priključen je, preko prikladne prigušnice P, mjerni transformator T prenosnog odnosa 1:1, sa sekundarno priključenim mjernim instrumentom M. Za odnos efektivnih iznosa ukupnog napona U i instrumentom M pokazanog napona U_1 vrijedi približno formula iz 5. retka na str. 255., gdje su također pretpostavljeni efektivni iznosi.

88. Pored starijih načina mjerenja vanredno jakih istosmjernih struja I_n , ima i novijih, s upotrebom zasitljivih prigušnica: v. E-130. te sl. 361. m.) u »Lončar. Osn. elektrotehn., 4. izd., Knjiga II.« A najnoviji je postupak s primjenom »Hallova pojava«. Po sl. 303. pri poslanoj preko 1-2 »upravljačkoj« struji I_s iz istosmjernog izvora J, reguliranoj otpo-

rom R i pokazanoj instrumentom A, »uzdužno« kroz prikladnu pločicu P, iz indijeva antimonida InSb, indijeva arsenida InAs ili koga sličnog materijala iz grupe poluvodiča tipa A^{III}B^V, javi se na »poprečnim« priključcima 3-4, pri okomito na pločicu djelujućem magnetskom polju

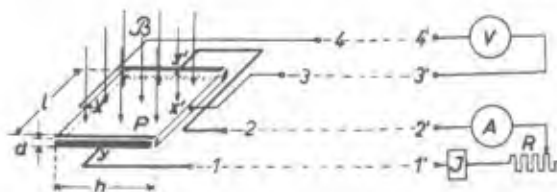


Sl. 301.

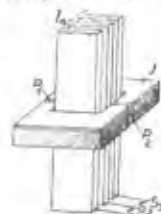


Sl. 302.

magnetske indukcije B , Hallov napon U_H pokazivan milivoltmetrom V , a proporcionalan sa I_x i B . Prema tomu, kod stalnog I_x , pokazani iznosi U_H mogu poslužiti kao mjerilo indukcija B magnetskih polja, na mjestima u koja se pločica P postavi. Indirektno se sad po sl. 304. mogu tako (najbolje preko dvije Hallove pločice P_1 i P_2) mjeriti i ukupne struje I_0 koje teku kroz sabirnice S_1 - S_2 - S_3 na pr. pogona za proizvodnju aluminija, a obuhvaća ih prikladno građen jaram J iz Fe-limova s dvije uzdušne pukotine. Naime ako se u te pukotine stave Hallove pločice P_1 i P_2 , i njihovi se serijski spojeni Hallovi naponi očitaju na instru-



Sl. 303.



Sl. 304.

mentu V po sl. 303., očitavanja na V će biti proporcionalna magnetskoj indukciji B u obje pukotine jarma J , dakle po zakonima magnetskih krugova s većim pukotinama proporcionalna i uzbudnoj struji I_0 jarma J , koju u ovom slučaju predstavlja suma struja $I_1 + I_2 + I_3$ kroz S_1 - S_2 - S_3 ; i instrument V će posredno pokazivati struju I_0 (odn. i neposredno, ako mu se skala baždari na pr. u kiloamperima kA).

Uz G-18.

89. Do diagrama po Möllingeru i Geweckeu, kojima se mogu pratiti ovisnosti obih pogrešaka $p\%$ i δ' o sekundarno priključenim teretima, može se doći polazeći kod *naponskih* mjernih transformatora od sl. 235. i kod *strujnih* od sl. 236.

Tako $p\%$ *naponskog* mjernog transformatora predstavlja u sl. 235. razlika duljina za koju $OE = U_1$ nadvisuje $OF' = U_2$, izražena u procentima od $OF' = U_2$, a δ' nadaje kut δ_v što ga OE zatvara sa OF' , izražen u kutnim minutama. Međutim, transpozicijom koordinatnog sistema, koji je u sl. 235. bio s ishodištem u O i s ordinatama odn. apscisama u smjerovima OB odn. OA , u sistem s ishodištem prenesenim u F' i s osima

90. Analogno bi se, polazeći od sl. 236., upravo od njezina trokuta OS'P sa OS' = l_2 i OP = l_1 , i zamišljajući recimo $I_3 = 5$ A predočeno dužinom 5 m, i prema tomu $p^{u/u} = 1^{u/u} = S'L$ odn. $\delta' = S'K = 34,4'$, našle strujna i kutna pogreška *strujnog* mjernog transformatora projicirajući P u T na ordinatnoj i u V na apscisnoj osi koordinatnog sistema sa S'.

kao ishodištem te ordinatnom osi u smjeru l_2 i apscisnom okomito na taj smjer; v. na sl. 306. pod a): $p^0/\% = S'T = 1,13\%$ odn. $\delta' = S'V = 28'$.

Treba sad samo još razmotriti: kako konstruirati vrhove E odn. P vektora U_2 odn. l_2 u sl. 305. pod a) odn. 306. pod a) za razne odnose optečenja naponskih odn. strujnih mjernih transformatora, t. j. kako detaljnije nacrtati »srca« diagrama, dosad samo nabačena? Odgovore na to daju sl. 305. pod b) odn. sl. 306. pod b).

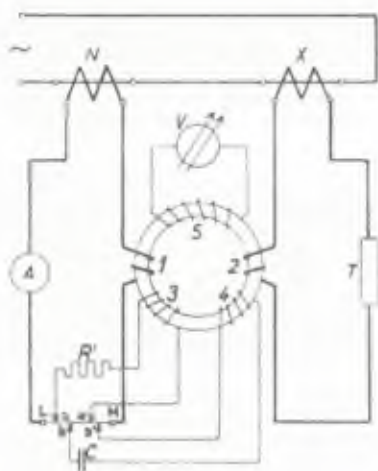
91. Na sl. 235. vidi se da razliku U_1 u odnosu na U_2 izvode četiri pada napona: $BD = l_1 R_1$ i $DE = l_1 X_1$ te $F'G = l_2 R_2$ i $G'B = l_2 X_2$ (prva dva pada crtana u smjeru i okomito na smjer od l_1 , druga dva u smjeru i okomito na smjer od l_2). Ako se sad uzme u obzir da kod (na stalan napon U_1 priključena) naponskog mjernog transformatora, dakle »naponskog« transformatora u smislu izlaganja iz G-3., ne varira $ON = l_0$ iz sl. 235., a varira duljinom i smjerom $OS' = l_2$ s iznosima Z i faznim kutovima β rezultujuće impedancije sekundarno priključenih instrumenata, zbog čega varira i $OP = l_1$ [OP varira, jer uz stalnu komponentu $ON = l_0$ sadrži i sa $Z \Omega \cdot \|\beta^0\|$ (oznaka po K-65.) promjenljivu komponentu $NP = l_2$]. Sad, da bi se našla točka E iz sl. 235. i 305., trebalo bi radeći po sl. 235. za svako pojedino $Z \Omega \cdot \|\beta^0\|$ crtati posebnu sliku. Möllinger i Gewecke su baš to po sl. 305. pod b) mimoili, time da su zamislili sastavljeno OP na sl. 235. iz komponenta ON i NP, i korespondentno tom su rastavili i padove napona BD i DE na po dva člana: $BD = l_1 R_1$ u $l_0 R_1$ i $l_2 R_1$ te $DE = l_1 X_1$ u $l_0 X_1$ i $l_2 X_1$. Nacrtavši onda najprije po sl. 305. pod b) o $Z \Omega \cdot \|\beta^0\|$ neovisne $F'P = l_0 R_1$ i $PC = l_0 X_1$, oni su za razne $Z \Omega \cdot \|\beta^0\|$ trebali nadovezivati na vrh C pripadnog trokuta $F'PC$ samo još $l_2(R_1 + R_2)$ i $l_2(X_1 + X_2)$. Specijalno s nacrtanima, uz pretpostavku stalnog Z i varijabilnog β , prvim od dva potonja člana paralelno vektoru U_2 i drugim okomito na U_2 , kako bi odgovaralo slučaju $Z \Omega \cdot \|\beta^0\|$ čistog radnog tereta. Krajnju točku vektora U_1 u ovom specijalnom slučaju dao bi vrh E' hipotenuze CE' nastalog trokuta CDE', i pripadne vrijednosti $p^0/\%$ i δ' dobile bi se određene duljinama $F'T'$ i $F'V'$ (na slici: $p^0/\% = 0,82\%$ i $\delta' = -28'$). A rotirajući CE' za kut β korespondentan teretu $Z \Omega \cdot \|\beta^0\|$ u položaj CE, dobivali bi se za razne β vrhovi E vektora U_1 , a time i pripadne pogriješke $p^0/\%$ i δ' za pojedine β (na slici, uz dano Z i $\beta = 38'$, izišlo bi veće $p^0/\% = 1,37\%$ i manje $\delta' = -10'$ nego uz $\beta = 0$). Lako je vidjeti, kako bi se postupalo i kod tereta nekog drugog Z, na pr. dvostruko manjega, a raznih β .

92. Kod strujnih mjernih transformatora pri teretima raznih Z i β postupalo bi se, na bazi izvoda iz G-3. o »strujnim« transformatorima, kao na sl. 306. pod b). Da bi se dobio vrh P vektora primarne struje l_1 ovdje se općenito, uz stalno Z i ma koje β , na vrh S' vektora sekundarne struje l_2 nadovežu stalni padovi napona sekundarno u transformatoru: $SN = l_2 R_2$ i $NQ = l_2 X_2$. A zatim se doda, pod kutom priklona β prema l_2 , sa $Z \Omega \cdot \|\beta^0\|$ po veličini i smjeru određeni gubitak napona U_2 u priključenom teretu. To na kraju daje QM s vrhom M. Povučena spojnica S'M predstavlja onda glavnim tokom transformatora sekundarno induciranu EMS E_2 (analognu vektoru OB na sl. 235.), pa ako se u sl. 306. pod b) povuku S'Y okomito na S'M i YP paralelno sa S'M, pazeći da duljine S'Y i YP odgovaraju u G-15. sa l_2 i l_1 u sl. 236. sa OM i MN označenim komponentama struje l_0 (vidi na sl. 236. $ON = l_0$ odn. $S'P = l_0$), bit će time na sl. 306. pod b) određen i vektor S'P struje l_0 odn. bit će konstruiran vrh P toga vektora. Međutim vrhom P vektora l_0 određene su, po sl. 306. pod a), i obje pogriješke mjernog transformatora pri teretu $Z \Omega \cdot \|\beta^0\|$ dane u sl. 306. i pod b) točkama T na $p^0/\%$ -skali i V na δ' -skali [konkretno na sl. 306. pod b) izlazi $p^0/\% = 1,31\%$ i $\delta' = 18'$ pri $Z \Omega \cdot \|\beta^0\|$ sa $\beta = 60'$]. U specijalnom slučaju čistog radnog tereta sa istim Z no sa $\beta = 0'$ trebalo bi mjesto QM povući jednako dugo QM' paralelno sa l_2 , te na M' nadovezati preko S'Y' odn. Y'P' pripadno S'P. To

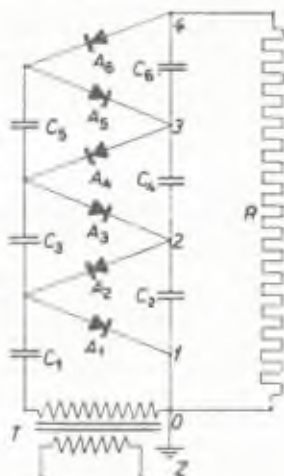
daje P' , iz koga odmah slijede i pripadne pogriješke p^0_0 i δ' , konkretno na sl. 306. pod b) 0,7% i 41' uz dano Z i $\beta = 0^\circ$. Za manje Z , pri proporcionalno manjima $S'N$ i NQ i raznima β , pogriješke bi se slično dobivale

Uz G-25.

93. Hohleovu aparaturu po sl. 242. moguće je nadomjestiti spojem po Zwierini i drugima »sa superponiranim amperzavojima« (v. na pr.: R. Zavischa, Messwandlerprüfeinrichtung mit AW-Überlagerung, Conti-Elektroberichte, 5, 1959, separat str. 1. do 7.). Novost je spoja u tomu da se, pri savršenim uzimanom normalnom N i pogriješka p^0_0 i δ' opterećenom ispitivanom strujnom mjernom transformatoru X , »diferencijska« struja iz G-25. ne određuje kao po sl. 240. odn. 242. tako da se njom proizvede pad napona u otporu poput R na sl. 240., pa da se kompenzaciono mjere radna i prazna komponenta tog pada napona, prva proporcionalna strujnoj i druga proporcionalna naponskoj pogriješki transformatora X , nego se sekundarnim strujama iz N i iz X , prvoj poslanoj kroz jedan i drugoj kroz drugi od prikladna dva namotaja 1-2, smještena, (pored dalja dva namotaja 3-4 i još jednoga 5) na prstenastoj jezgri iz materijala visoke magnetske permeabilnosti, izazovu suprotna uzbuđenja spomenute jezgre, a time i suprotni magnetski tokovi kroz nju. Ti tokovi, kao jednaki, kad bi i X -transformator bio bez pogriješaka, međusobno bi se poništavali, pa bi iz namotaja 5 napajani nul-instrument V pokazivao nulu struje. No kod postojanja pogriješaka p^0_0 i δ'



Sl. 307.



Sl. 308.

X -transformatora pokazivat će V struju. Ali ova će se ipak dati svesti na nulu time da se kroz prvi odn. drugi od oba namotaja 3-4 proizvedu struje s pomoću padova napona dobivenih s dva para kliznih kontakata $a-a'$ i $b-b'$ pomičnih po kliznoj žici LM uključenoj u sekundarni strujni krug N -transformatora, i da se u krug struje kroz 3 uključi prikladan otpor R' i u onaj kroz 4 prikladan kondenzator C . Tako će struja kroz 3 biti praktički radna i ona kroz 4 praktički prazna, pa će se udešavanjima prvog odn. drugoga para kontakata moći na LM udesiti baš takvi iznosi padova napona da će se moći kompenzirati radna i prazna komponenta struje pokazane nul-instrumentom V , a iz udešenja pripadnih padova napona

moći će se zaključivati na $p\%$ odn. δ' X-transformatora. Mogu se čak pored LM odmah učitati, i dvije skale, jedna $p\%$ -iznosâ i druga δ' -iznosâ. Shemu spojeva gornjeg rasporedaja po sl. 307. čitalac će, nakon rečenoga, lako razumjeti; u sl. 307. naznačeni su još ampermetar A za mjerenja sekundarne struje N-transformatora i teret T X-transformatora. U praksi opisani rasporedaj sadrži dakako i razna usavršenja. Postoji i analogni spoj za ispitivanja naponskih mjernih transformatora.

Uz H-5. do H-7.

94. U VDE 0430/12.41 predviđaju se kugle promjerâ D od 20 do 2000 mm (i dršci promjerâ od $D/10$ do $D/5$), a za ekstremno visoke napone u izgledu su i kugle promjera 2500 i 3000 mm. Preciznije nego sl. 245. daju Tabele IV. do VII. citiranih propisa odnose tjemених iznosa U_m izmjeničnih napona prema daljinama preskoka s za parove kugala pojedinih D ; v. tamo, kao i u VDE 0431/12.40, i druge detalje. Iskrišta sa šiljcima praktički su ispala iz prakse.

Uz H-8.

95. Suhe Cu-Cu₂O-Pb-ispravljače brzo su, kod proizvodjenja istosmjernih visokih napona uz neznatne struje, potisnuli mnogo bolji Se-ispravljači; ovi selenski ispravljači, odlikujući se pred bakrenooksidulskima mnogostruko višim »zapornim naponima« po stanici (do 25 V i više), daju i sa skromnim brojem Se-stanica ispravljačke »stupove« koji podnose tjemene napone i do više kV. Još su prikladniji tek nedavno pridošli poluvodički ispravljači (»kristalne diode«) s Ge i pogotovo sa Si; germanijski se mogu graditi da po stanici izdrže i znatno preko 100 V, a silicijski do gotovo 1000 V. Za razliku od kenotrona (visokovakuumskih »cijevnih dioda« ili »cijevnih ventila«) svi navedeni ispravljači, radeći bez žarene katode, ne trebaju struje grijanja, što je osobito povoljno kod spojeva gdje pojedini ispravljački stupovi leže na vrlo različitim potencijalima, na pr. kod »kaskadnog generatora«, koji se odmah dolje niže opisuje.

Uz H-9.

96. Za dobivanje, iz izvora izmjenične struje, vrlo visokih istosmjernih napona mogu odlično poslužiti i naprave zvane »kaskadni generatori«. Idejno već prije po Greinacheru i dr. iznašani, oni se obično nazivaju po Cockcroftu i Waltonu, koji su 1932. jednim takvim generatorom postizavali istosmjerne napone i do 700 kV, ubrzavali njima do velikih brzina protone (ione običnog vodika H), i usmjerivši ove na metu iz litija izveli cijepanja Li-atoma, prvu atomsku transmutaciju dobivenu umjetno ubrzanim česticama.

Po sl. 308. sekundarno na transformator T, napajan primarno iz izmjenične mreže, priključeno je na pr. šest kondenzatora C_1 do C_6 i šest ispravljača A_1 do A_6 , tako raspoređeno u »trostepeni« kaskadni rasporedaj da između krajeva 1 i 4 desnog stupca kondenzatora C_2 - C_3 - C_4 - C_5 nastane samo malo pulzirajući istosmjerni napon, iznosa jednakog približno šesterostrukom tjemenu iznosu U_m sekundarnog izmjeničnog napona transformatora T. Kod općenito n »stepena« (sa $2n$ kondenzatora i $2n$ ispravljača, od kojih se uzmu: svaki od kondenzatora C_2 , C_4 itd. da može podnositi napone do $2U_m$ i samo C_1 za napon U_m , te svaki od ispravljača A_1 , A_3 itd. da zaporno podnosi $2U_m$) proizvedeni istosmjerni napon je približno $2n \cdot U_m$. Pomnim razmatranjem sl. 308., uz pojednostavljene pretpostavke gotovo zanemarive struje opterećenja kroz mjerni otpor R i dr., nije teško shvatiti djelovanje kaskadnog generatora, koji bazira na postepenom povišanju napona od nule kod 1 prema $6U_m$ kod 4 u stupcu sa C_2 - C_4 - C_6 , postizavano nadovezivanjem na C_1 - A_1 -kombinaciju (koja zapravo predstavlja već u H-9. spomenuti Villardov spoj) daljih sličnih kombinacija kondenzatora i ispravljača.

U praksi kaskadni uređaj ima raznih usavršenja (prigušni otpori u granama sa A_1 , A_2 itd., te drugo). U slučajevima proizvodnja najviših istosmjernih napona, sve do 1 ili 2 MV, gdje praktički kao ispravljači dolaze u obzir kenotronski »ventili«, treba svakom ventilu žariti katodu iz posebnog visokonaponski izoliranog izvora (posebni strojevi regulirani preko motki iz izolatora, visokofrekventna grijanja); kod proizvodnje ne naročito velikih istosmjernih napona mogu za A_1 , A_2 itd. poslužiti u K-95. spojeni »stupovi« poluvodičkih ispravljačkih stanica.

Uz H-10.

97. Danas se trajanje čela, strmina čela i neke druge osobitosti udarnih napona drukčije definiraju, na pr. po VDE 0450/11.39 prva se veličina uzima kao (u μs izraženi) 1,25-kratnik vremenskog intervala što, pri uzlazu udarnog napona, prođe između momenata uspostavljanja 10% i 90% tjemnog iznosa tog napona.

Uz H-12. i H-16.

98. Navedeni razni primjeri ispitivanja samo su ilustrativni; zbog pojednosti pogledati uvijek naše (JUS) i druge propise, kako su baš na snazi. Tako se po VDE 0370/4.52 ulja ispituju pri $s = 2,5$ mm, itd.

Uz I-2.

99. Relacija (I) u bilj. ¹⁾ na str. 264. samo je dakako »numerička« relacija, s EMJ-jedinicama. »Veličinska« relacija (kod magnetske indukcije i magnetskog polja istog smjera) danas se obično piše u obliku:

$$B = \mu_0 H + M' \quad (I')$$

Tu $\mu_0 H$ znači indukciju B_0 kakva bi pri polju H nastala u vakuumu (praktički i uzduhu), a M' se, kao dodatni član proizveden utjecajem željeza, danas najčešće naziva »magnetska polarizacija«.

Uz I-7.

100. Mnogostruko veće promjene otpora, a time i mnogostruko veće osjetljivosti pri primjeni tih promjena na mjerenjima H -iznosa, opažene su na (već u K-88. spomenutim) poluvodičima InSb, InAs itd. (kod InSb i do 20-struko veće). Međutim udobnije je mjeriti polja H po K-88. i sl. 303. primjenom Hallova pojava. Jedna takva S&H-aparatura ima na pr. najosjetljivije mjerne područje 0 do 500 Oe (0 do 400 A/cm), i dalja viša sve do 20 kOe (16000 A/cm). Njom se lako mjere polja u pukotinama strojeva, prostorne raspodjele »rasipnih polja«, pa i izmjeničnih (oko prigušnica ili transformatora) uz odgovarajući pokazni instrument.

Uz I-8. do I-11.

101. Epsteinova aparatura za *vatmetrička* određivanja »gubitaka u željezu«, u prvobitnom obliku po shemi u sl. 256. i pogotovo u poboljšanom po sl. 257., održala se u upotrebi kroz mnogo decenija (Epstein je s njom izišao g. 1900.). Nju sadrže i još važeći propisi VDE 0522/1914 (pretisak iz g. 1952.). Ipak je već rano bilo kritika zbog nedostataka Epsteinove, uostalom kod starih lošijih limova i manjih maksimalnih magnetskih indukcija vrlo upotrebljive metode, uz ostalo i zbog relativno velike količine materijala limova, od kojih 10 kg treba izrezati za svaku probu u pruge duge 50 i široke 3 cm. Dolaskom limova sa sve manjim gubicima, najprije onih »legiranih« sa Si (i poput »nelegiranih« proizvedanih »vrućim valjanjem«) i zatim novih »hladno valjanih« limova s »orijentirano« u smjeru valjanja vrlo poboljšanim magnetskim svojstvima, moglo se ići na sve veće maksimalne indukcije B_m , pri kojima su se nedostaci magnetskih mjerenja vatmetričkim aparaturama sve više manifestirali. Tu se, osim prevelike mase probe, mogu navesti:

pogrješke od nesinusoidnog aparaturi narinutog napona te od, i pri izvana narinutom sinusoidnom naponu, utjecajem otpora primarnog namotaja naročito pri većima B_m izobličenog inducirano napona (EMS samoindukcije) u primarnom namotaju, a tim i nesinusoidnog mijenjanja magnetske indukcije u probi, zatim promjene svojstava ispitivanih limova nastale njihovim rezanjem u uske pruge, te naročito utjecaji nejednolikog magnetiziranja oko sastava četiriju paketa limova, pa nesigurnosti s korekturama koje se imaju odbiti od očitavanja vatmetra N_0 , ne samo po (II) u I-8. nego i po (II') u I-9., nesigurnosti udešavanja željenoga B_m iznosom E očitanim na ograničeno točnom voltmetru V na sl. 257., te još mnogo drugoga.

102. Sad, sve većim nesigurnostima pri sve većima B_m nije lako izbjeći. Ostajući pri vatmetričkoj metodi, ne bi se na pr. smanjujući masu probe recimo od 10 na 2,5 kg drugo postiglo nego da se N_0 smanji i time manje točno očitava, pa da pojedine pogriješke relativno jače utječu. Slično ni druge protumjere ne idu bez poteškoća. Treba na pr. uočiti kvadratični rast suptrahenda desno u (II') s rastućim B_m , da se vidi kako kod odličnih limova i visokih magnetskih indukcija može spomenuti suptrahend činiti najznatniji dio od N_0 , a vrlo je nepovoljno (v. A-17.) kad veliku, i samo ograničeno poznatu korekturu treba odbijati od samo nebitno veće veličine N_0 , koju treba korigirati i koja se i sama daje tek ograničeno točno odrediti. To daje vrlo nesigurnu traženu veličinu ukupnih gubitaka u željezu N u W , a time i netočnu odabranu maksimalnoj indukciji pripadnu konstantu gubitaka V (u W/kg). Ne smije se naime zabraviti da su se na pr. pri debljini limova 0,35 mm susretali V_1 -iznosi oko 8 W/kg , kod visoko legiranih da se i bez posebne pažnje pri proizvodnji postizavalo 3 W/kg i kod »orijetiranih« hladno valjanih (i prikladno naknadno žarenih) da se već moglo sići i do oko 1 W/kg .

103. Prema tomu je posve razumljivo da se u novije vrijeme sve više pomišlja na to kako bi se Epsteinova aparatura zamijenila boljom, odn. da se prethodno toleriraju uz nju i druge »nevatmetričke« metode. Zapravo je Epsteinova aparatura uvedena u Njemačkoj, no prihvaćena je brzo i od mnogih drugih zemalja, iako su na pr. u anglosaskim zemljama bile planirane drukčije metode. I u samoj Njemačkoj već je g. 1931. Hohl predložio prikladan most izmjenične struje, uz rasporedaj po Epsteinu bez vatmetra (taj je g. 1956. prilagođen mjerenjima s malim probama »orijetiranih« limova; v. ETZ 77, 1956, 295 do 297), a i u Americi su predlagani izmjenični mostovi po Owenu i drugima, prilagođeni mjerenjima konstanti gubitaka. Pa i same njemačke industrijske norme DIN 46400 donijele su g. 1954. odredbu kojom se pripuštaju, za buduće, i svi mjerni uređaji s kojima se dadu apsolutni iznosi gubitaka pri izmjeničnim magnetiziranjima »dovoljno točno« određivati.

104. Međutim pridolaženjem uvijek novih limova, i njihovih sve raznovrsnijih primjena u elektrotehnici, porasli su zahtjevi za svestranim ispitivanjima elektrolimova, a time i za aparaturama koje će, pored važne pojedinosti »gubitaka u željezu«, moći mjeriti i druge za mnoge svrhe i važnije veličine. Poimence željelo se određivati i krivulju histereze, i to »dinamičku« petlju histereze, dobivenu pri ispitivanjima limova uzbudjivanih izmjeničnom strujom, te kod najboljih limova mnogo brže od klasične »statičke« petlje histereze, dobivene balističkom metodom s istosmjernom strujom (I-2.). Nadalje se željelo napraviti koje od uređaju i krivulju prvog magnetiziranja (zapravo krivulju točaka određenih parovima maksimalnog polja i maksimalne indukcije raznih dinamičkih petlji histereze), krivulju vremenskog variranja polja, vremenskog variranja indukcije, te još druge magnetski važne veličine.

Do danas se kao najpodesnije za takve svrhe pokazale aparature s »vektorskim mjerilima«, o kojima je već bilo govora u K-71. do K-74.

Da navedemo samo dva primjera. Već u I-11. opisani S&H-ferometar, danas znatno usavršen, čini vrlo opsežnu aparaturu koja vrši precizno takva mjerenja u tvornicama elektrolimova i električnim pogonima koji troše mnogo limova, te u naučnim zavodima. Također svestrana jest i AEG-aparatura za ispitivanja elektrolimova, kojoj je osnovnu ideju postavio Koppelman (v. na pr. ETZ, 77, 1956, 17-21; AEG-Mitt., 47, 1957, 465-471). Aparatura radi u dva tipa: s »Mjernim svitkom I« i s »Mjernim svitkom II« (prvim za manje i drugim za veće probe limova), obaput s već u K-71. spomenutim AEG-Vektormesserom. Za probe, i kod S&H-ferometra i kod AEG-aparature dostaje na pr. 1 do 3 kg limova. U detalje obih opisanih naprava ne može se ovdje potanje ulaziti; to bi tražilo cijele rasprave.

105. Razumljiva je želja da se konstante gubitaka V_{10} , V_{15} i sl. određuju i bez rezanja limova u trake, na pr. prislanjanjem prikladne naprave na površinu nerazrezane ploče lima. Treba međutim reći da takva mjerenja mogu biti provedena samo sa skromnom tonošću, s nesigurnostima ne ispod recimo 5% do 8%, pa i većima. Za takva više orijentaciona i relativna mjerenja, na pr. pri kontroli proizvodnje limova, razradio je Koppelman svoju napravu s otvorenim jarmom velikog prereza a oblika obrnutog slova U, ne mnogo veću od običnog gladila (v.: ETZ, 70, 1949, 463-467; ETZ, 77, 1956, 17-21). Na jarmu se nalaze dva namotaja, primarni uzbudni, napajan izmjeničnom strujom, i sekundarni mjerni, s priključenim vektorskim mjerilom. Jaram se prisloni na ispitivani lim, tako da se magnetski tok jarma zatvori kroz odgovarajući dio ispitivanog lima. Glavnina gubitaka nastaje u tom dijelu lima, gdje je magnetska indukcija mnogostruko veća nego u jarmu. Na gubitke se zaključuje iz radne komponente sekundarne struje, izmjerene vektorskim mjerilom. Proračunavanje gubitaka moguće je tek s pomoću empirijski određenih konstanta odn. formula.

106. S druge strane, nadolaskom sve boljih materijala za permanentne magnetne pojavila se i potreba za aparaturama koje mogu ispitivati i male komade takvih materijala, već formirane u oblik budućih magneta. Uzme li se u obzir da se današnji najbolji materijali (s Al-Ni i Al-Ni-Co i sl.) odlikuju pri dobrim remanacijama (poput OR na sl. 251.) također vanredno velikim koercitivnim silama (v.: OK na sl. 251.), nije bilo posve jednostavno razvijati aparature koje će vršiti magnetiziranja i razmagnetiziranja, te još i mjeriti svojstva magneta iz ovakvih materijala. A i obične magnetske čelike dakako treba istraživati. Za sve ove svrhe pokazala se prikladna na pr. aparatura s »dvostrukim jarmom«, zvana »AEG-Doppeljoch-Magnetorüfer« (tipovi M1 i M4, prvi za probe duge od 10 do 1,1 cm i presjeka od 25 do 1,5 cm² i drugi za probe dužine 3 do 0,5 cm i presjeka 6 do 0,3 cm²). Naprava radi s upotrebom »tifrajuće sonde« za mjerenja jakosti magnetskog polja, te sa sinhronim kontaktnim ispravljačem (v. na pr.: AEG-Mitt., 46, 1956, 128-133; Schw. Arch. f. angew. Wiss. u. Techn., 23, 1957, 1-10); njom se mogu mjeriti koercitivne sile do 4000 Oe (3200 A/cm) sa M1 odn. do 1000 Oe (800 A/cm) sa M4.

107. Za magnetiziranja magnetski ekstremno tvrdih materija mogu se primijeniti »aperiodski« strujni udari, proizvedani izbijanjem vrlo velikih kapaciteta u magnetizirajućim namotajima. Jedan takav kupovni aparat, nazvan impulsni magnetizator i težak oko 43 kg, ima jarmovni zator koji izbijanjem može dati energiju 230 Ws pri impulsnom naponu 650 V, a maksimum struje udara, koji cijeli traje samo desetstisućinku sekunde, dostiže iznos 10 kA (pripadna gustoća struje u bakru namotaja jest oko 15 kA/mm²).

Uz J-3. do J-8.

108. Elektrolitička i ampersatna magnetna motorna (kolektorska) brojila u praksi se više gotovo ni ne susreću, a i od kilovatsatnih redovito se susreću samo još indukciona.

Uz J-16.

109. Poput svih ostalih mijenjaju se i propisi za brojila. Naši novi propisi će se donijeti predvidljivo tokom 1960., usporedo s također za 1960. spremanim suvremenim Zakonom o mjerama (MKSA-sistem, ekvivalentan V-A-s-m-sistemu), i po tom s ispravnom definicijom današnjih električkih jedinica.

Uz J-22.

110. Sve pogreške u primjerima I) do III) ležale bi unutar obično dopuštenih pogrešaka u našim Pravilima (J-16.), a također na pr. i njemačkih P. T. B.-pravila (zbog P. T. B. v. A-9.), koja su od pravila VDE 0418/6.52 nešto blaža (po ovima potonjima ne bi se na pr. pogreška u primjeru III) više tolerirala, kao veća od 2% uz dane specijalne odnose.
