

ili usidren, iznosi svega 150% nazivne, čime je generator zaštićen od preopterećenja. Trofazno-istosmjerni sistem je osobito prikladan za remorkere, trajekte, bagere, ledolomce, oceanske brodove, brodove za spasavanje i ribarske brodove.

LIT.: *J. F. Piper*, Marine electrical installation, New York 1943. — *S. N. Le Count*, Practical marine electricity, New York 1945. — *W. Krebs*, Elektrotechnik auf Schiffen, Leipzig 1954. — *H. J. Kossak*, *A. Wangerin*, Elektrotechnik auf Handelsschiffen, Berlin 1956. — *G. O. Watson*, Marine electrical practice, London 1957. — *W. Polonski*, Elektrische Antriebe auf Schiffen, Berlin 1958. — *И. Р. Фрейдзон*, Судовые электромеханизмы, Ленинград 1958. — *Б. И. Норневский*, *И. А. Таратынов*, Судовые электрические станции и сети, Москва 1958. — *В. И. Поленский*, Гребные электрические установки, Москва 1958. — *В. Л. Лычковский*, Электрическое оборудование и электродвижение судов, Москва, 1960. — *Г. С. Яковлев*, Судовые электроэнергетические системы, Ленинград 1961. — *И. И. Галич*, Судовые электрические установки управления, Ленинград 1962. — *Ю. В. Глоягин*, *П. К. Коробов*, *Э. Т. Марков*, *П. А. Мецанинов*, Электрооборудование и электродвижение судов, Ленинград 1963.

K. Jakovčić

BROJILA, ELEKTRIČKA, instrumenti koji služe za integriranje neke fizikalne veličine električkim putem. Namijenjena su najčešće integriranju električke snage radi registriranja električke energije koju u određenom razdoblju prodavač električke energije predaje potrošaču, ali se upotrebljavaju i za integriranje drugih fizikalnih veličina, npr. jakosti struje i vremena, bilo u istu svrhu ili u drugu. U ovom članku bit će govora uglavnom samo o električkim brojilima kao instrumentima za registriranje potroška električke energije.

Podjela brojila. Brojila potroška električke energije mogu se podijeliti kako je navedeno u nastavku.

Prema vrsti električke struje brojila mogu biti za istosmjernu i za izmjeničnu struju. Brojila za izmjeničnu struju mogu biti *jednofazna* ili *trofazna*.

Prema registriranoj energiji razlikuju se brojila *djelatnog potroška*, brojila *jalovog* ili *reaktivnog potroška*, brojila *prividnog potroška* i brojila *mješovitog potroška*. Velika većina brojila u električkim mrežama jesu brojila *djelatnog potroška*, pa se podrazumijeva da je riječ o takvom brojilu kad se govori naprosto o električkom brojilu. Potrošak električke energije u istosmjernom sistemu sa dva vodiča ima vrijednost

$$W = \int_0^t U I dt, \quad (1)$$

gdje je U električki napon između ta dva vodiča, I jakost struje koja prolazi kroz vodiče, t vrijeme. Djelatni potrošak jednofazne struje sa dva vodiča, u slučaju da su napon i struja čiste sinusne veličine, ima vrijednost

$$W = \int_0^t U I \cos \varphi dt, \quad (2)$$

gdje je U efektivna vrijednost jednofaznog napona, I efektivna jakost jednofazne struje u vodičima, a $\cos \varphi$ faktor snage.

Prema jedinici veličine koju registriraju razlikuju se vatsatna (voltampersatna, varsatna), ampersatna, vremenska, amperkvadratsatna i voltkvadratsatna brojila. Zbog promjenljivosti napona i jakosti struje I moralo bi po pravilu svako brojilo imati bar po jedan mjerni element koji će reagirati na promjene napona (*naponski mjerni element*) i na promjene jakosti struje (*strujni mjerni element*). Naponski i strujni mjerni elementi treba da su povezani u jednu cjelinu — mjerni sistem — tako da brojilo integrira umnožak struje i napona, uzimajući u obzir eventualni fazni pomak između njih, tj. faktor snage $\cos \varphi$, dakle integrira djelatnu snagu u skladu s jednakostima (1) i (2) i registrira električki potrošak u vatsatima ili — najčešće — u kilovatsatima. Takva se brojila stoga nazivaju *vatsatima*. Budući da se prividni potrošak običava mjeriti u voltampersatima (VAh), a jalovi potrošak u reaktivnim voltampersatima (VARh, »varsatima») brojila prividnog potroška nazivaju se i *voltampersatima* a brojila jalovog potroška *varsatima*. — Ako se može pretpostaviti da napon ili jakost struje ne mijenjaju vrijednost za vrijeme registriranja, može se konstrukcija električkog brojila znatno pojednostavniti, jer u tom slučaju brojilo može da ima samo jedan mjerni element, naponski odnosno strujni. Brojilo, dakle, integrira jakost električke struje i registrira proteklu količinu elektriciteta u ampersatima ili umnožak struje s konstantnim pretpostavljenim naponom, prema jednakosti (1), koja s konstantnim U postaje $W = U \int I dt$. U oba slučaja

takvo se brojilo prema jedinici faktički integrirane veličine zove *ampersatno*. Ampersatna brojila primjenjuju se u praksi samo za mjerenje potroška istosmjerne struje, ali su takva brojila izvedena i za izmjeničnu struju. — Može li se pretpostaviti da je konstantan ne samo napon nego također jakost struje i faktor snage $\cos \varphi$, brojilo će integrirati samo vrijeme pa se naziva *vremensko brojilo*. Takva brojila upotrebljavaju se za registriranje vremena kroz koje su bili uključeni neki električki aparati, npr. sušionice, frižideri, liftovi, električke peći itd. To trajanje izražavaju u satima, pa se u tom slučaju nazivaju *brojila pogonskih sati*. Vremenska brojila mogu registrirati i potrošak energije prema jednakosti

$$W = U I \cos \varphi \int dt.$$

Naponski i strujni elementi brojila mogu se spojiti također bilo u seriju, tako da kroz njih teče ista struja, ili paralelno, na isti napon. Brojilo će tada registrirati amperkvadratsate odn. voltkvadratsate, pa se naziva *amperkvadratsatno* odn. *voltkvadratsatno*. Amperkvadratsatna brojila primjenjuju se u novije vrijeme sve više kao *brojila gubitaka u bakru* za registriranje gubitaka u obliku Jouleove topline u dalekovodima i vodičima strojeva, aparata i transformatora. Obično se izvode s jednim mjernim sistemom jer se pretpostavlja da je opterećenje simetrično u svim fazama. Ne može li se to pretpostaviti, treba amperkvadratsatno brojilo izvesti sa tri mjerna sistema. Voltkvadratsatna brojila upotrebljavaju se — razmjerno rijetko — kao *brojila gubitaka u željezu*; ti se gubici pojavljuju zbog magnetiziranja u praznom hodu strojeva i transformatora, a razmjerni su s kvadratom napona. Obično se može pretpostaviti da je napon konstantan, pa se gubici u željezu registriraju vremenskim brojilom.

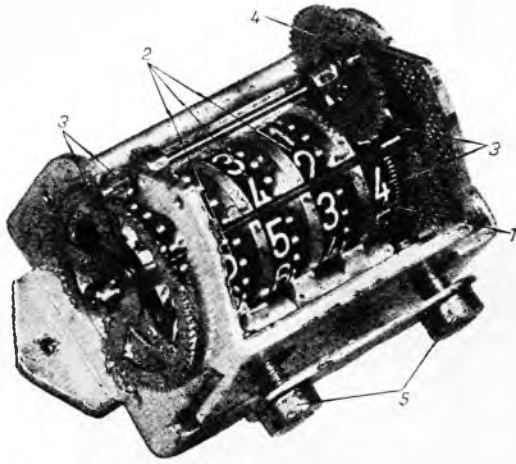
Da bi se električka energija mogla ispravno mjeriti, po pravilu mora svaki vodič električke mreže biti priključen na brojilo. *Prema broju vodiča električke mreže* nazivaju se vatsatna brojila određena za priključak na istosmjerne ili jednofazne dvovodne sisteme *dvo-vodnima* (moraju imati bar 4 stezaljke), brojila za priključak u trovodne istosmjerne sisteme ili na trofaznu trovodnu mrežu *trovodnima*, a brojila za priključak na trofaznu četverovodnu mrežu *četverovodnima*. Brojilo za dvovodne električke sustave mora imati bar jedan mjerni sistem (sastavljen od naponske i strujne staze), brojilo za trovodne bar dva, a za četverovodne bar tri mjerna sistema. Kad se želi naročito istaknuti koliko mjernih sistema brojilo ima, govori se o *jednosistemskom*, *dvosistemskom* i *tro sistemskom* brojilu.

Prema konstrukciji razlikuju se *motorna*, *elektrolitska* i *elektromehanička* brojila. Motorna brojila mogu biti *magnetomotorna* (s rotorom koji ima namot i rotira u magnetskom polju trajnog magneta), *elektrodinamička* (s rotorom koji ima namot i rotira u magnetskom polju nepomičnog svitka) i *indukcijska* (s kratko spojenim rotorom koji rotira u okretnom polju dvaju elektromagneta). Magnetomotorna brojila mogu se upotrijebiti samo za priključak na istosmjernu struju, elektrodinamička za istosmjernu i izmjeničnu, a indukcijska samo za izmjeničnu struju. Elektrolitsko brojilo temelji se na prvom Faradayjevom zakonu koji kaže da su elektrolitskim putem izlučene količine tvari razmjerne jakosti struje i trajanju njenog prolaženja, tj. količini elektriciteta koji prolazi elektrolitom. Ta brojila nemaju naponske staze, nego mjere samo promjene jakosti struje (tj. reagiraju samo na njih) i jakost struje integriraju te registriraju količine elektriciteta izražene u ampersatima. U elektrolitskim brojilima sa živom služi kao elektrolit otopina živinog i kalijevog jodida, a u brojilima s vodikom razrijeđena fosforna kiselina. Elektrolitska brojila mogu se izravno primijeniti samo za mjerenje u sustavima istosmjerne struje. Elektromehanička brojila (npr. s vjetrenjačom i polugom poput sablje) imaju danas samo historijsko značenje.

Oznake propisane od službe kontrole mjera jesu u nas ove: »A« za motorska ampersatna brojila, »D« za elektrodinamička, »E« za elektrolitska i »F« za indukcijska. Sa »B« označena su daljinska brojila. Iza oznake slovom, na označnoj ploči svakog odobrenog tipa brojila stoji broj koji označuje redni broj odobrenja u vezi s fabrikatom i tipom brojila, odn. s brojem mjernih sustava (npr. F 104).

Prema načinu priključenja na električku mrežu razlikuju se brojila za izravan priključak na mrežu, transformatorska i reduktorska brojila. Naponske staze brojila izmjenične struje izvode se

za izravan priključak na napone samo do 550 V, a strujne staze za jakosti do 200 A. Da bi se brojila mogla primijeniti za mjerenje električkog potroška kod svih vrijednosti napona i struje koje dolaze u obzir, moraju se često naponske staze brojila izmjenične struje priključiti na sekundarne strane naponskih transformatora za mjerenje, a strujne staze u sekundarne krugove strujnih transformatora za mjerenje (*transformatorska brojila*). Naponske staze istosmjernih brojila priključuju se po potrebi preko mjernih



Sl. 1. Brojčani motorog brojila (proizvod 'Iskra', Kranj). 1 valjkasti koturić najnižeg mjesta razdijeljen je na 100 jednakih dijelova, 2 valjkasti koturići ostalih dekadskih mjesta imaju znamenke 0, 1, 2...9, 3 zupčanici prigona, 4 pužno kolo koje pokreće pužni vijak rotora, 5 vijci za pričvršćenje brojčanika na stalak

predotpornika koji su spojeni s njima u seriju, a strujne staze paralelno uz tzv. poredne otpornike ili šentove (shunt). Takva brojila zovu se *reduktorska*. Brojčani transformatorskih brojila često se izvode tako da pokazuju stvarnu vrijednost potroška (kaže se da im je nazivna konstanta jednaka 1). Takva brojila nazivaju se *brojila s primarnim brojčanikom*, jer je brojčanik izveden tako da pokazuje potrošak mjeren na primarnoj strani mjernih transformatora. Upotreba takvih brojila ograničena je jer se mogu primijeniti samo za mjerenje potroška u električkoj mreži određenog primarnog napona i uz određenu primarnu jakost struje. U novije vrijeme sve više se izrađuju tzv. *brojila sa sekundarnim brojčanikom*, tj. brojila koja pokazuju električki potrošak mjeren na sekundarnoj strani mjernih transformatora, a podatke brojača treba množiti s umnoškom prijenosnih odnosa naponskih i strujnih transformatora da se dobije stvarni potrošak; nazivna konstanta brojčanika u tom je slučaju različita od 1. Brojila mogu se primijeniti i s tzv. *poluprimarnim brojčanikom*, tj. s brojčanikom u kojem nije uzet u obzir prijenosni odnos strujnog transformatora, pa podatke brojača treba množiti s tim prijenosnim odnosom.

Napredak u preciznosti izvođenja pojedinih dijelova električkih brojila i različite usavršene mogućnosti kompenziranja pogreški omogućili su da tvornice u novije vrijeme proizvode tzv. *brojila s proširenim opsegom mjerenja*; npr. petampersko brojilo s četverostrukim proširenjem, tj. do 20 A. Kao jakost struje naznačuje se tada na označnoj pločici 5—20 A ili 5(20) A ili 5 maks. 20 A; to znači da je brojilo jednako tačno pod malim opterećenjima kao nekadašnje brojilo za 5 A, pod velikim opterećenjima kao nekadašnje brojilo za 20 A. Danas su rijetke tvornice koje brojila izmjenične struje ne proizvode bar s dvostrukim proširenjem mjernog opsega (v. natpisne pločice u slikama 2 i 21). Brojčana oznaka za jakost struje naznačena na prvom mjestu odnosi se na tzv. osnovnu struju, a brojčana oznaka na drugom mjestu na tzv. maksimalnu struju.

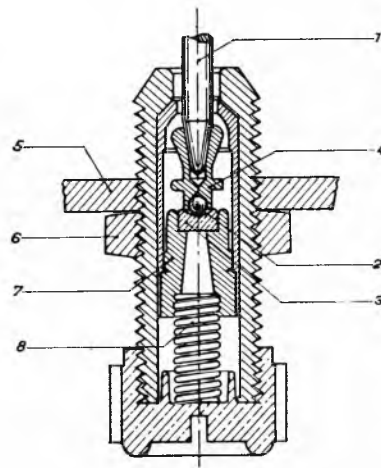
Sastavni dijelovi električkih brojila. Pretežna većina električkih brojila pripada grupi motornih brojila, pa će u daljem samo o njima biti govora. Glavni sastavni dijelovi takvih brojila *motor* (sa svojim rotorom) i *brojčanik* (sl. 1 i 2). Vrtinje ili osciliranje rotora prenosi se mehanički na brojčanik, koji broji okretaje ili oscilacije; ako je — u idealnom slučaju — rotor izveden tako da je brzina vrtnje razmjerna s veličinom koja se integrira,

brojanje okretaja ili oscilacija predstavljat će integraciju te veličine i brojčanik će pokazivati rezultat te integracije.

Ostvarenje takvog idealnog rotora zahtijeva da se rotor brojila sa strujnom i naponskom stazom ne okreće ako je aktivirana samo jedna od tih staza. U stvarnosti je često brojilo izvedeno tako da se rotor okreće trajno ili povremeno, odn. da nastupa ubrzanje ili usporenje njegove vrtnje, i kad nisu aktivirane obje staze, pa se govori o *pregonu* ili *protugonu* rotora, — naponskom ako je prouzročen time što je brojilo priključeno na napon a kroz strujnu stazu ne teče struja, strujnom ako je prouzročen time što strujnom stazom prolazi struja a naponska nije pod naponom.

Motori s rotorom izvedeni su različito na različitim vrstama motornih brojila i bit će opisani u nastavku. Da bi se mogla brže utvrditi pogreška, rotor svakog brojila mora imati na svom obodu lako primjetljivu značku, koja se može promatrati kroz prozorčić na poklopcu brojila, ukoliko poklopac nije u cijelini proziran. Osovina rotora motornih brojila je u normalnom položaju vertikalna, pa ta brojila imaju dva ležaja: gornji i donji. Trenje u ležajevima treba da bude što manje, da ne bi nastale dodatne pogreške — naročito kod malih brzina vrtnje — koje se ne mogu kompenzirati. Donji ležaj izvodi se najčešće prema sl. 3 s tanjurićem od sintetskog safira ili rubina, na koji se opire čelična kuglica smještena na dnu osovine rotora. Gornji ležaj izvodi se po pravilu kao iglasti vratni ležaj.

Glavni sastavni dijelovi brojčanika motornih brojila jesu: stalak ili šasija, brojčanica, prigona i brojač. Brojač je sastavljen od



Sl. 3. Presjek kroz donji uporni ležaj. 1 donji kraj osovine rotora, 2 čelična kuglica, 3 tanjurić od sintetičkog safira ili rubina, 4 rukavac s koničnim provrtom, 5 stalak, 6 prutmatka za udešavanje visine, 7 tuljak za ležajni tanjurić, 8 opruga

četiri ili više kružnih skala ili valjkastih koturića koji predstavljaju dekadski mjesta za čitanje stanja te imaju ubilježene znamenke 0, 1...9. Kružne skale mogu biti izvedene kao pločice koje rotiraju uz nepomične indekse ili kao nepomične pločice povrh kojih rotiraju kazaljke. Rotacija rotora prenosi se prigonom na valjkasti koturić, kružnu skalu ili kazaljku najnižeg dekadskog mjesta, pa oni rotiraju brzinom koja je razmjerna s brojem okretaja rotora. Kada valjkasti koturić niže mjesne vrijednosti načini pun okret, automatski se pomakne koturić slijedeće

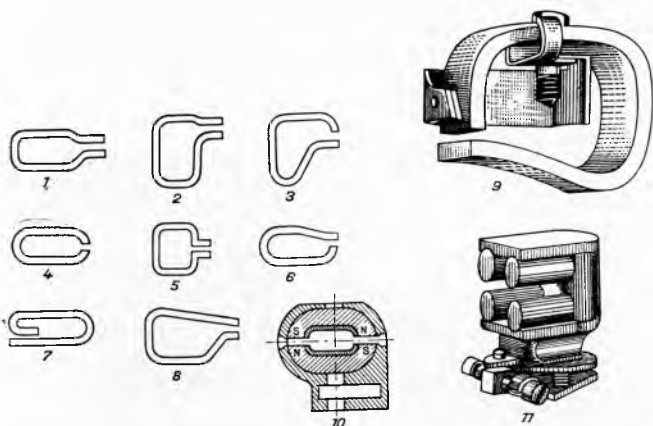
više mjesne vrijednosti



Sl. 2. Brojčanica i brojčanik s valjkastim koturićima. 1 valjkasti koturići, 2 koturić najnižeg mjesta, 3 otvor za promatranje diskosa, 4 strelica koja pokazuje smjer vrtnje diskosa, 5 vijci za pričvršćenje brojčanice

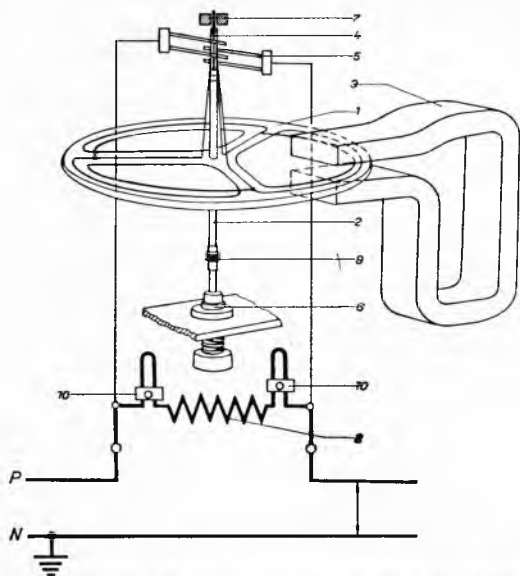
više mjesne vrijednosti

Važan sastavni dio većine motornih brojila je *trajni magnet*, koji omogućava jednostavnu regulaciju broja okretaja rotora. Pričvršćuje se na stalak u brojilu tako da se u procjepu magneta vrti



Sl. 4. Različiti oblici magneta za kočenje. 1...8 starije izvedbe, 9 s temperaturnom kompenzacijom, 10 modernija izvedba s ubrizganim kratkim debelim dvotražnim magnetom od legure Alnico, 11 modernija izvedba s finom regulacijom i sa četiri magnetska štapića koji su magnetizirani u poprečnom smjeru

alumijska pločica (diskos) rotora. Vrtložne struje koje se u diskosu rotora rađaju prilikom vrtnje proizvode zakretni protumoment i nastoje spriječiti vrtnju. O nepromjenljivosti trajnog magneta u toku vremena ovisi tačnost brojila; stoga se on izvodi od magnetskog materijala s velikom koercitivnom silom (Alnico ili Alnicoti). Različiti oblici u kojima se izvode trajni magneti prikazuje sl. 4. Regulacija vrtnje ponajčešće se provodi primicanjem trajnog magneta osovini odn. odmicanjem od nje. Trajni magneti često se izvode i s finom regulacijom pomicanja (npr. mikrometarskim vijkom). Na njih se često smještaju dijelovi koji služe za kompenzaciju temperaturnog utjecaja (npr. od materijala čija je magnetska vodljivost ovisna o temperaturi).

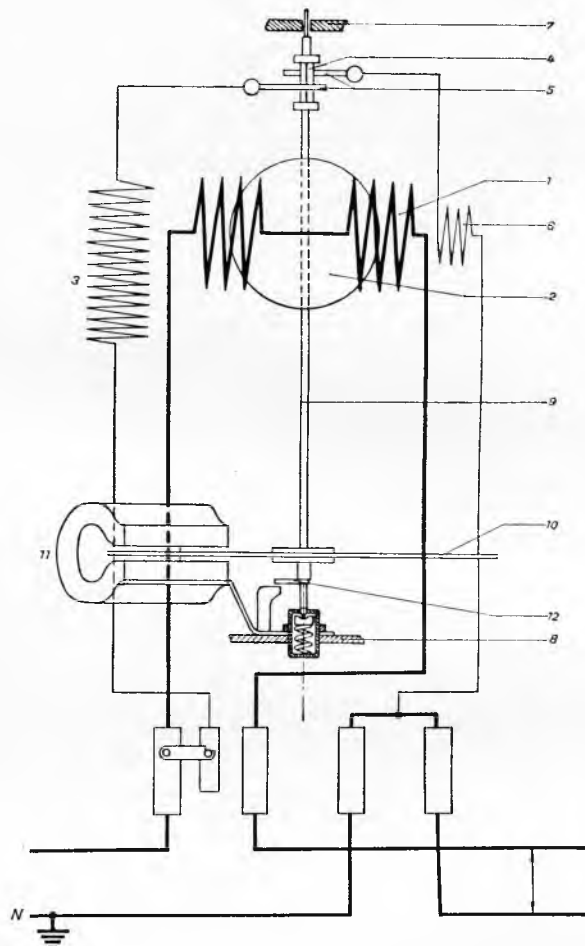


Sl. 5. Shematski prikaz magnetomotornog brojila. 1 alumijski rotor s trodijelnim plosnatim namotom, 2 vertikalna čelična osovina, 3 trajni magnet, 4 komutator, 5 četkice, 6 donji uporni ležaj, 7 gornji iglasti vratni ležaj, 8 ugrađeni poredni otpornik, 9 pužni vijak, 10 stezne spone za regulaciju

Magnetomotorna i elektroindinamička brojila. Motorna brojila primijenjena u praksi pripadaju velikom većinom grupi indukcijskih brojila, pa su indukcijska brojila, prema tome, i najčešće upotrijebljena električna brojila uopće. Ona će stoga u ovom članku biti opširnije obrađena, ali će prije toga ovdje biti kratko opisane dvije druge grupe motornih brojila koje, iako se primje-

njuju u manjem opsegu, imaju određenu važnost u elektrotehničkoj praksi: magnetomotorna i elektroindinamička brojila.

Magnetomotorna brojila mogu se upotrijebiti samo za istosmjernu struju. Alumijski rotor (sl. 5) s trodijelnim plosnatim ili bubnjastim namotom pričvršćen je na vertikalnoj osovini 2 tako da rotira u polju trajnog magneta 3 ako mu se preko komutatora 4 i četkica 5 dovodi istosmjerna struja. Vertikalna osovina upire se na donjem kraju o donji uporni ležaj, a gore je pridržava



Sl. 6. Shematski prikaz serijskog elektroindinamičkog brojila. 1 strujni svitak, 2 namot rotora, 3 predotpornik u naponskoj stazi, 4 komutator, 5 četkice, 6 pomoćni svitak za kompenzaciju trenja, 7 gornji iglasti ležaj, 8 donji uporni ležaj, 9 osovina rotora, 10 alumijska pločica za kočenje, 11 magnet za kočenje, 12 zastavica za amortiziranje neopterećenog kretanja

igla gornjeg iglastog ležaja. Paralelno s namotom rotora priključen je poredni otpornik 8 tako da kroz namot teče struja male jakosti koja je uvijek razmjerna s ukupnom jakosti struje. Okretanje rotora prenosi se na brojač po pravilu preko pužnog vijka 9, učvršćenog na osovini, na pužno kolo brojčanika i preko nekoliko čeonih zupčanika. Zakretni moment na rotor proizvode električna struja koja prolazi rotorom i magnetski tok trajnog magneta. U rotoru se prilikom vrtnje u polju trajnog magneta rađaju Foucaultove struje koje, zajedno s trajnim magnetom, proizvode zakretni protumoment. U stacionarnom stanju brzina vrtnje rotora razmjerna je s jakosti struje koja teče kroz rotor pa brojčanik integrira jakost struje s vremenom, tj. registrira količinu elektriciteta, najčešće u ampersatima.

Elektroindinamička brojila, zvana također dinamometarska, mogu se u principu upotrebljavati za istosmjernu i izmjeničnu struju. Tačnost mjerenja veća im je nego magnetomotornih brojila pa se najčešće primjenjuju kada se traži velika tačnost mjerenja većih količina električne energije u sustavima istosmjerne struje. Za mjerenje u sustavima izmjenične struje primjenjuju se samo kada je frekvencija malena ili kada je ona promjenljiva (npr. u pogonu valjaoničkih strojeva). Elektroindinamičko brojilo ima dvije staze

— strujnu i naponsku — pa može registrirati potrošenu električku energiju u vatsatima ili kilovatsatima. Strujnu stazu (sl. 6) čini nepomični, ponajčešće dvodijelni, strujni svitak 1 kroz koji prolazi struja što ide u trošila ili struja koja je s njom razmjerna. Naponsku stazu čini namot rotora 2, koji je priključen preko predotpornika 3, izmjenljivog komutatora 4 i četkica 5 na napon mreže. Namot rotora sastavljen je od tri svitka koji rotiraju u magnetskom polju nepomičnog strujnog svitka. Zakretni moment nije konstantan; srednja mu je vrijednost razmjerna sa snagom P , tj.

$$M = c \cdot P = c \cdot U \cdot I,$$

gdje je U napon mreže a I jakost struje trošila koja prolazi kroz nepomične namote strujne staze. Da se omogući jednostavna regulacija vrtnje, pričvršćena je okomito na osovinu rotora okrugla aluminijska pločica 10 koja rotira u polju nepomičnog trajnog magneta 11, te oni proizvode moment kočenja K koji je razmjeran s brojem okretaja n pa je u stacionarnom stanju

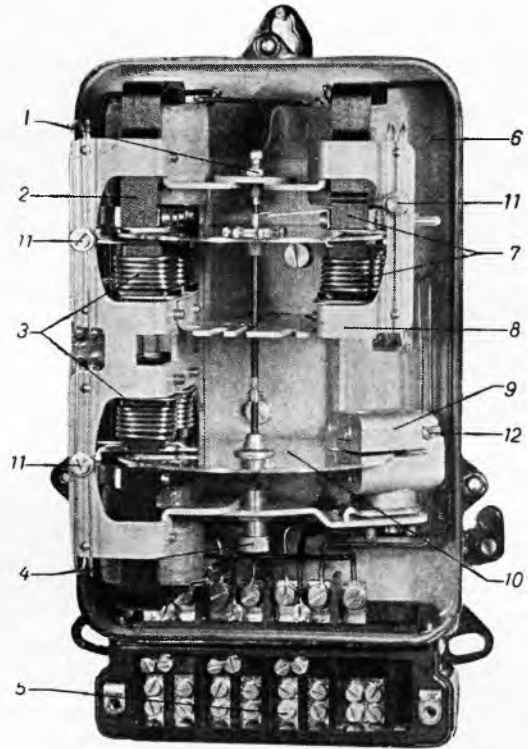
$$M = c_1 U I = K = c_2 n, \text{ tj. } n = c_3 U I, (c_3 = c_1/c_2).$$

U nastavku, gdje će se u jednadžbama pojaviti velik broj konstanti razmjernosti, one će se radi jednostavnosti sve označiti istim slovom c , bez indeksa, mada po pravilu nisu jednake i mogu (kao konstante u gornjim jednadžbama) biti među sobom u matematičkoj zavisnosti.

Vanjsko magnetsko polje, pa čak i polje Zemlje, može utjecati na rad elektrodinamičkog brojila. Za smanjenje utjecaja stranog magnetskog polja izvode se tzv. *astatička brojila*. Opisano brojilo naziva se *serijsko elektrodinamičko brojilo* jer mu je strujna staza priključena u seriju s trošilima. Za velike jakosti struje primjenjuju se *poredna elektrodinamička brojila* u kojima je strujna staza priključena paralelno uz poredni otpornik.

INDUKCIJSKO BROJILO

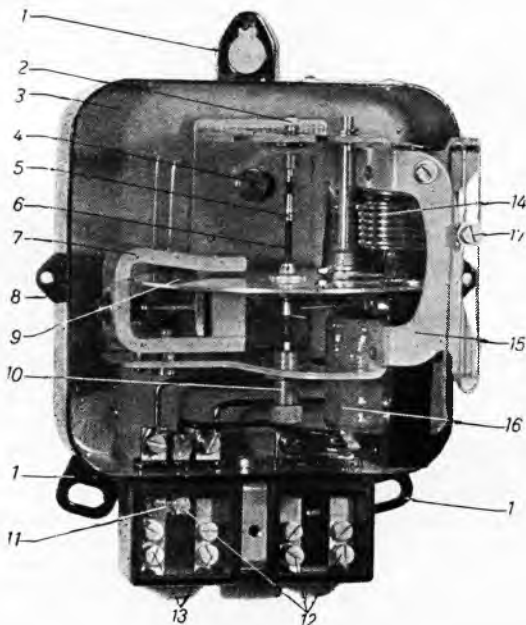
Indukcijsko brojilo može se upotrijebiti samo za mjerenja u sustavima izmjenične struje. Glavni su mu sastavni dijelovi (sl. 7 i 8): kućište koje se sastoji od podnožne ploče i poklopca, priključnica, trajni magnet za reguliranje brzine vrtnje i mjerni sistem koji se sastoji od naponskog magneta, strujnog magneta, brojčanika i rotora. Naponski i strujni magnet djeluju motorno na rotor pa tvore pogonski sistem. Jednofazno brojilo ima po pravilu jedan pogonski sistem, a trofazno dva ili tri. Naponski magnet sastavljen je od naponskog željeza i naponskog svitka a strujni od strujnog željeza i strujnog svitka. Rotor brojila čine okrugle metalne pločice bez namota koje su pričvršćene okomito na vertikalnu čeličnu osovinu i smještene tako da mogu rotirati u pro-



Sl. 8. Trofazno brojilo, bez brojčanika i poklopca (proizvod »Iskra«, Kranj). 1 gornji ležaj, 2 naponski magnet, 3 strujni magneti, 4 donji ležaj, 5 priključnica, 6 podnožna ploča, 7 pogonski sistem, 8 stalak, 9 trajni magnet, 10 diskos rotora, 11 naprava za namještanje faznog pomaka, 12 mikrometerski vijak za finu regulaciju brzine vrtnje

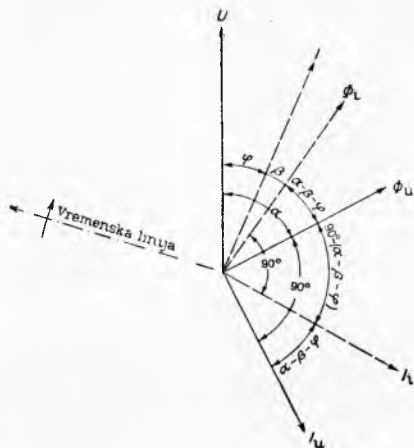
cjepima elektromagneta i trajnih magneta. Osovinu pridržavaju donji uporni i gornji iglasti ležaj. Okrugle pločice rotora, tzv. diskosi, izrađuju se ponajčešće od aluminija a katkada i od bakra, ili se zamjenjuju bubnjevima bez namota. Rotor jednofaznog brojila ima po pravilu jedan diskos na koji djeluje pogonski sistem i trajni magnet za kočenje odn. regulaciju brzine vrtnje. Rotor trofaznog brojila ima dva ili tri diskosa. Dva pogonska sistema (npr. višefaznih brojila) često se postavljaju tako da djeluju na isti diskos. U trosistemskom brojilu djeluju tada na drugi diskos treći sistem i trajni magnet. Elektromagneti, trajni magneti, brojčanik i ležaji pričvršćuju se na stalak a ovaj na podnožnu ploču. Vodiči električke mreže priključuju se izravno ili preko mjernih transformatora na stezaljke priključnice.

Princip rada indukcijskog brojila. Do vrtnje rotora dolazi zbog naizmjeničnog djelovanja dvaju fazno pomaknutih magnetskih tokova — strujnog i naponskog — na struje koje oni, zbog svoje promjenljivosti, induciraju u diskosu rotora. Strujni i naponski tokovi koji se stvaraju u strujnim i naponskim elektromagnetima ne prožimaju u cijelosti pločicu rotora, nego kroz nju prolazi samo jedan njihov dio, dok drugi dio prolazi putem rasipanja. Komponente tih tokova koje prožimaju diskos u okomitom smjeru nazivat će se u nastavku *naponski* odnosno *strujni tok* i označivat će se sa Φ_u odnosno Φ_i . Za postizanje ispravnog rada indukcijskog brojila potrebno je da se umjetnim načinom pošalje veći ili manji dio tokova putem rasipanja, pa ti tokovi, uz korisne tokove, imaju važan zadatak u ispravnom radu brojila. Najprije ćemo promatrati rad svakog pogonskog sistema za sebe, tj. rad jedne faze višefaznog sustava. Struja I koju uzima potrošač jednofazne struje u općenitom slučaju zaostaje ili preti u fazi naponu mreže U za neki kut φ (sl. 9). Struja I prolazi strujnim svitkom i proizvodi u strujnom željezu magnetski tok. Korisna komponenta Φ_i toga toka općenito nije u fazi sa strujom I nego za njom zaostaje za neki — redovito mali — kut β . Promjenljivi tok Φ_i inducira u zamišljenim prstenastim vodičima koji su se smjestili oko njegovog traga elektromotorne sile koje proizvode u njima izmjenične struje I_1 . Te struje razmjerne su s veličinom toka Φ_i ali fazno zaostaju za njim za 90° . Priključi li se naponski svitak na izmjenični napon U mreže, stvorit će se u



Sl. 7. Jednofazno brojilo, bez poklopca i brojčanika (proizvod »Iskra«, Kranj). 1 ušica za pričvršćivanje brojila, 2 gornji ležaj, 3 podnožna ploča, 4 vijak za pričvršćenje stakla, 5 pužni vijak, 6 osovinu rotora, 7 trajni magnet, 8 ušica vijka za plombaranje, 9 diskos rotora, 10 donji ležaj, 11 mostić, 12 naponske stezaljke, 13 strujne stezaljke, 14 strujni svitak, 15 stalak, 16 naponski svitak, 17 naprava za namještanje faznog pomaka

naponskom željezu izmjenični naponski tok. Korisna komponenta Φ_u toga toka upravno je razmjerna s naponom U a za njim fazno zaostaje za neki — redovito veliki — kut α . Tok Φ_u inducira



Sl. 9. Vektorski dijagram električkih veličina jednofaznog induksijskog brojila. U napon mreže, I struja u strujnom svitku, Φ_1 korisni strujni tok, Φ_u korisni naponski tok, I_a struja koja nastaje u diskosu zbog Φ_1 , I_u struja koja nastaje u diskosu zbog Φ_u

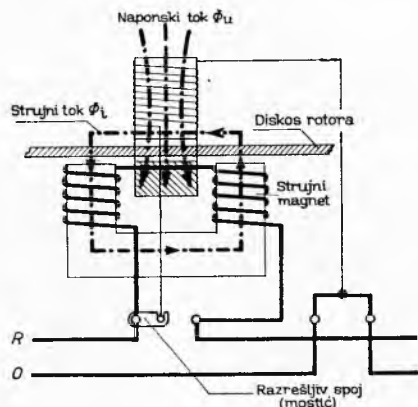
u zamišljenim prstenastim vodičima koji su se smjestili u diskosu oko njegovog traga elektromotorne sile koje proizvode u njima struje I_u . Te struje razmjerne su s tokom Φ_u ali fazno zaostaju za njim za 90° . Naponski tok Φ_u djelovat će motorno na struje I_a koje je inducirao u rotoru promjenljivi tok Φ_1 . Strujni tok Φ_1 djelovat će motorno na struje I_u koje je inducirao u diskosu promjenljivi naponski tok Φ_u . Rezultirajući zakretni moment ima veličinu

$$M_z = c \Phi_u \Phi_1 \cdot \sin(\alpha - \beta \mp \varphi),$$

gdje je $(\alpha - \beta \mp \varphi)$ kut što ga zatvaraju korisni strujni i naponski tokovi, pa je zakretni moment induksijskog brojila razmjeran s veličinom strujnog i naponskog toka i sa sinusom kuta što ga oni zatvaraju. Indukcijska brojila nazivaju se zbog toga i *sinusna brojila*. Kut $\alpha - \beta = \varphi$ naziva se *unutarnji kut pogonskog sistema*. Taj kut zatvaraju naponski i strujni tok kad je $\varphi = 0$, tj. kad su napon i struja mreže istofazni. O veličini toga kuta ovisi kakvu će energiju (djelatnu, jalovu ili prividnu) registrirati brojilo. Brojila izmjenične struje obično se izvide tako da kroz rotor prolazi naponski tok Φ_u jedanput a strujni dva puta (sl. 10); trag naponskog toka leži tada između tragova strujnog toka. Strujni tok Φ_1 razmjeran je sa strujom I koju uzima potrošač, a naponski tok Φ_u a naponom mreže U , pa je veličina zakretnog momenta induksijskog brojila općenito određena jednadžbom

$$M_z = c U I \sin(\varphi \mp \varphi).$$

Predznak $\mp$ ispred φ odnosi se na induktivno, a $\pm$ na kapacitivno opterećenje. Konstanta c ovisna je o izmjerama i prostoru



Sl. 10. Shematski prikaz pogonskog sistema induksijskog brojila. Naponski tok Φ_u prolazi diskove rotora jedanput, a strujni Φ_1 dvaput

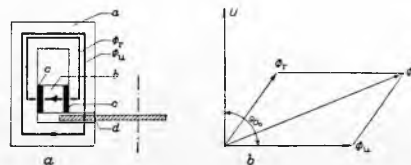
nom smještaju pogonskih sistema, o frekvenciji, vodljivosti diskosa itd. M_z za brojila djelatne energije treba da odgovara djelatnoj snazi, tj. treba da ima vrijednost

$$M_z = c U I \cos \varphi.$$

Brojila djelatne energije treba dakle graditi tako da je $\sin(\varphi \mp \varphi) = \cos \varphi$, a to je moguće ako je unutarnji kut pogonskog sistema $\varphi = \alpha - \beta = 90^\circ$.

Ukupni strujni tok proizveden u strujnom željezu kao i njegova korisna komponenta Φ_1 u idealnom su slučaju u fazi sa strujom mreže I jer je strujni svitak izveden od malo zavoja debele žice, pa je struja magnetiziranja u fazi sa strujom mreže. Kut β za koji zaostaje strujni tok Φ_1 za strujom mreže I , tzv. *kutna pogreška strujnog toka*, općenito se ne uzima u obzir kod brojila djelatne energije, a redovito ni kod ostalih brojila, jer je malen. Međutim, da bi se postigao ispravan rad nekih posebnih vrsta brojila, ponekad se namjerno povećava kutna pogreška strujnog toka. Zanimari li se kutna pogreška β , mora se za brojilo djelatne energije postići da korisni naponski tok zaostaje za naponom mreže za kut $\alpha = \varphi = 90^\circ$. Tako velik kut zaostajanja ne može se postići jedino iskorištavanjem induktiviteta naponskog svitka, nego se naponsko željezo izvodi s magnetskim porednim spojem, tako da se dio Φ_r ukupnog naponskog toka Φ_e pošalje putem rasipanja (sl. 11), a za prožimanje rotora iskoristi ona komponenta Φ_u koja fazno zaostaje za naponom za potrebni kut α . Naponi i naponski tokovi naponskog elektromagneta raspodijele se tada prema vektorskom dijagramu u sl. 11 b.

Zakretni moment brojila djelatne energije kod prijelaza iz induktivnog u kapacitivno opterećenje ne mijenja smjer, nego se rotor brojila i dalje vrti u istom smjeru. No promijeni li se smjer



Sl. 11. Utjecaj porednog magnetskog spoja u naponskom željezu induksijskog brojila. a) shematski prikaz rasporeda tokova, b) vektorska slika tokova. U naponskom željezu a) rada se ukupni naponski tok Φ_e kada se naponski svitak priključi na napon mreže U . Pomoću toka rasipanja Φ_r kroz poredni magnetski spoj b) i raspor c postizava se da korisni naponski tok Φ_u koji prožima rotor d) zaostaje za 90° za naponom U

toka električke energije, okretat će se rotor u suprotnom smjeru, jer se promijenio smjer struje a zbog toga i smjer toka Φ_1 koji je s njom istofazan. Oblike strujnog i naponskog magneta i smještaj jednog u odnosu na drugi odabiru pojedine tvornice brojila različito, a tim izborom su određene crte u kojima se zatvaraju strujni i naponski tokovi. Nekoliko takvih pogonskih sistema s ucrtanim tokovima prikazano je shematski u sl. 12.

Moment kočenja rotora induksijskog brojila. Da bi se mogla jednostavno regulirati brzina vrtnje rotora, u induksijskim brojilima postavljaju se trajni magneti. Diskosi rotora smješteni su u rasporedu tih magneta tako da se rotor može vrtjeti ne dodirujući magnet. Prilikom vrtnje u magnetskom polju trajnog magneta nastaju u diskosu vrtložne struje koje nastoje spriječiti okretanje rotora. Osim tih vrtložnih struja pojavljuju se u diskosu izmjenične vrtložne struje prouzročene vrtnjom u izmjeničnim poljima naponskog i strujnog magneta. One također koče rotor u njegovoj vrtnji pa dolazi do tzv. *naponskog i strujnog prigušenja*. Moment kočenja koji proizvodi neki magnetski tok na rotor prilikom njegove vrtnje razmjeran je s kutnom brzinom ω i kvadratom toga toka. Trenje u ležajima, između zraka i rotora i u brojčaniku također su uzročnici kočenja rotora u njegovoj vrtnji. Približno može se pretpostaviti da je moment kočenja koji je prouzročilo trenje sastavljen od konstantnog člana t_0 i člana koji linearno raste s kutnom brzinom:

$$M_t = t_0 + c \omega t.$$

Ukupni moment kočenja ima prema tome vrijednosti

$$M_z = c \omega \Phi_m^2 + c \omega \Phi_u^2 + c \omega \Phi_1^2 + t_0 + c \omega t.$$

U stacionarnom stanju taj moment jednak je zakretnom momentu M_z , pa je:

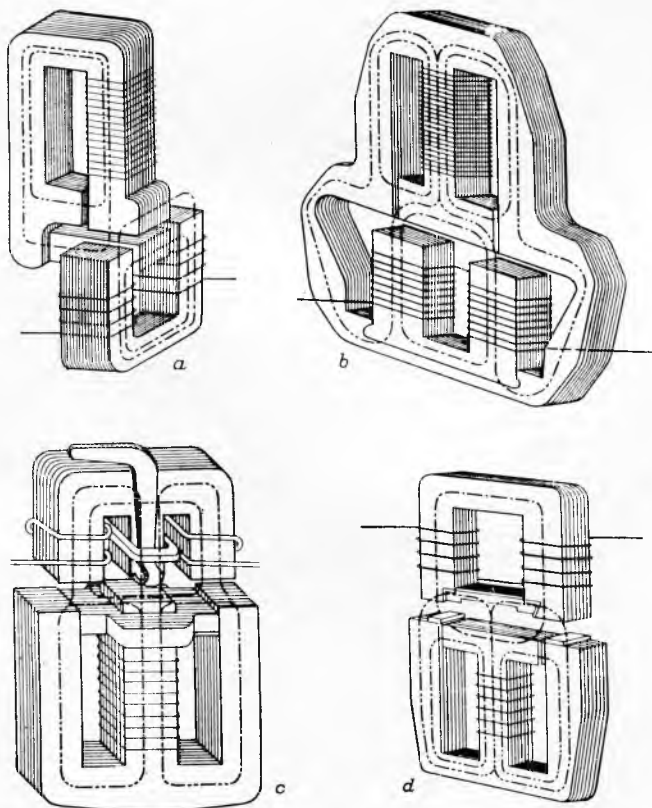
$$c \Phi_u \Phi_i \sin(\alpha - \beta \mp \varphi) = \\ = c \omega \Phi_m^2 + c \omega \Phi_u^2 + c \omega \Phi_i^2 + t_0 + c \omega t,$$

a kutna brzina rotora iznosi

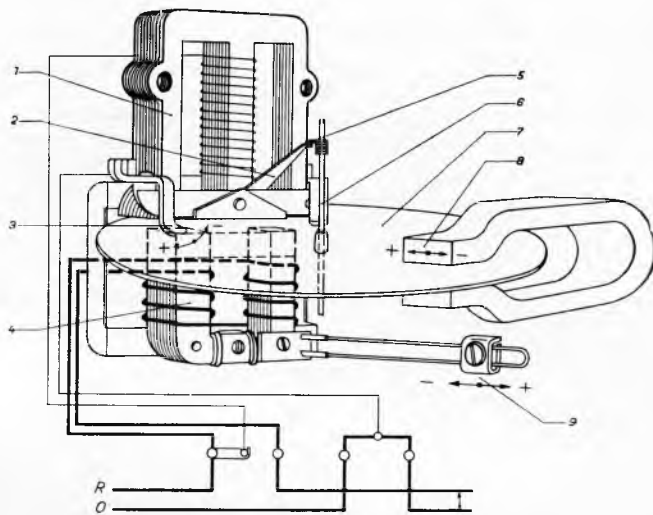
$$\omega = \frac{c \Phi_u \Phi_i \sin(\alpha - \beta \mp \varphi) - t_0}{c \Phi_m^2 + c \Phi_u^2 + c \Phi_i^2 + c t}. \quad (3)$$

Prema tome, kutna brzina nije linearno ovisna o umnošku $\Phi_u \Phi_i \sin(\alpha - \beta \mp \varphi)$, odnosno o $UI \sin(\alpha - \beta \mp \varphi)$, kako bi bilo poželjno, nego se u brojniku i nazivniku izraza za ω pojavljuju sumandi koji uzrokuju pogrešno pokazivanje brojila. Za sumande $c \Phi_m^2$ i $c t$ pretpostavlja se da su konstantni, pa linearnu ovisnost kvare u brojniku sumand $-t_0$ (konstantni udjel trenja) i u nazivniku promjenljivi sumandi $c \Phi_u^2$ i $c \Phi_i^2$ koji su ovisni o naponskom i strujnom prigušenju. Da bi se postigao broj okretaja bar približno razmjeran sa snagom, moraju ta tri promjenljiva člana biti tako malena prema ostalima da se mogu zanemariti, ili na brojilu treba predvidjeti naprave za kompenzaciju loših utjecaja. Proizvodnja brojila još nije pronašla naprave koje bi mogle savršeno kompenzirati štetne utjecaje svih promjena kojima je izvrnuto brojilo (npr. promjena opterećenja i napona) pa se nepromjenljivi član $c \Phi_m^2$ odabire načelno što veći, kako bi se smanjio utjecaj ostalih sumanda. Prema tome prednost ima jako kočenje trajnim magnetom, zbog čega se mora proizvesti i veliki zakretni moment.

Kompenzacija strujnog prigušenja. Strujno prigušenje mijenja se naročito u blizini opterećenja maksimalnom strujom. Zbog toga treba predvidjeti dodatni zakretni moment ovisan o jakosti struje. To se postiže na različite načine, npr. strujnim pregonom tako da se između polova strujnog željeza postavi željezna pločica kroz koju će se putem rasipanja zatvoriti jedan dio ukupnog strujnog toka. Presjek tog *porednog magnetskog spoja* mora biti takav da zasićenje te pločice magnetizmom započne kod nekog većeg strujnog toka (npr. kod tzv. osnovnog opterećenja). Kod malih će opterećenja teći relativno veći dio strujnog toka kroz poredni spoj putem rasipanja a manji će dio prožimati rotor. Kod veće jakosti struje zasitit će se sve više poredni spoj magnetizmom dok strujno željezo, zbog većeg presjeka, još nije zasićeno.



Sl. 12. Shematski prikaz pogonskih sistema i tokova indukcijskih brojila. a) izvod Bergmann, Berlin, b) Danubia, Wien, c) Sodeco, Genève, d) Iskra, Kranj



Sl. 13. Shematski prikaz mjernog sistema jednofaznog indukcijskog brojila. 1 naponski elektromagnet, 2 jezičac za amortiziranje neopterećenog kretanja, 3 poluga za naponski pregon i regulaciju pri malom opterećenju, 4 strujni elektromagnet, 5 zastavica za amortiziranje neopterećenog kretanja, 6 osovinu rotora, 7 diskove rotora, 8 trajni magnet za regulaciju pri velikom opterećenju, 9 petlja za udešavanje faznog pomaka

Korisni strujni tok bit će relativno veći kod većeg opterećenja, a to odgovara većem zakretnom momentu.

Kompenzacija naponskog prigušenja i trenja. Naponsko prigušenje koje se pojavljuje zbog induciranih vrtložnih struja prilikom vrtnje diskosa rotora u izmjeničnom polju naponskog magneta ovisno je o veličini napona. Naponsko se prigušenje kompenzira po pravilu samo za neki određeni napon (npr. referentni) jer se pretpostavlja da se napon neće mnogo mijenjati. Kompenziranje provodi se stvaranjem naponskog pregona, tj. tako da se proizvede dodatni zakretni moment čim se brojilo priključi na napon. Usput se provede prekompenziranje radi kompenzacije konstantnog udjela trenja t_0 prema jedn. (3). Kad je napon promjenljiv, bit će dakle kompenziran samo jedan dio naponskog prigušenja, pa će brojilo imati tzv. *naponsku pogrešku*.

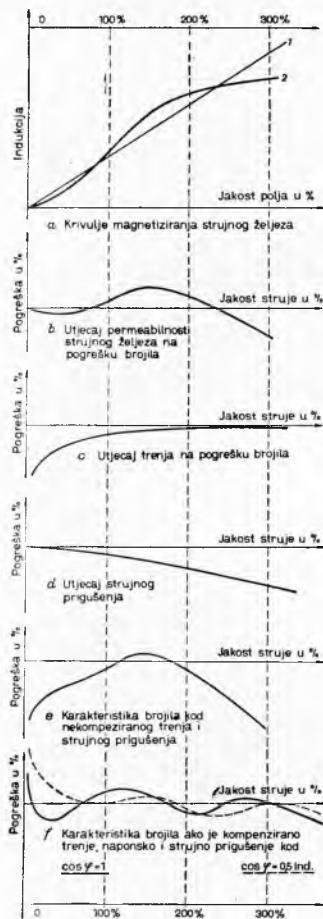
Sprečavanje stalne vrtnje rotora indukcijskih brojila.

Naponskim pregonom proizvedeni dodatni zakretni moment bio bi redovito uzročnik stalnoj vrtnji rotora pa i onda kad potrošač ne uzima struju. Da ne dođe do toga, brojila imaju tzv. *napravu za amortiziranje neopterećenog kretanja*. Najčešće je u tu svrhu pričvršćena na osovinu željezna zastavica (sl. 13, 5) koju, zbog magnetskog djelovanja, zadržava željezni jezičac 2 smješten na naponskom željezu. Umjesto zastavice i jezičca neke tvornice izrađuju u diskosu provrt ili urez u radijalnom smjeru, a druge predviđaju da zastavicu ili komadić željezne pilovine prilijepljene na diskos zadrži trajni magnet kada dođu u njegovu blizinu.

Karakteristike brojila. Na rad brojila utječu mnogi faktori (npr. jakost struje, napon, frekvencija, fazni pomak, temperatura) pa se time izazvana pogreška izražava kao funkcija jednoga od tih faktora, a za ostale se pretpostavlja da se ne mijenjaju. Pogreške brojila prikazane u dijagramu u ovisnosti o odabranoj promjenljivoj veličini određuju nepravilnu crtu koja se naziva *karakteristika brojila*. Karakteristika brojila najčešće se crta kao funkcija opterećenja, jer se u prvom redu za opterećenje predviđaju česte i velike promjene. Katkada je potrebno da se istovremeno uzme u obzir i koja druga promjenljiva veličina (npr. temperatura), pa se tada obično ispituje pogreška brojila kao funkcija opterećenja kod nekih odabranih vrijednosti te druge promjenljive veličine (npr. na -5 , $+10$, $+25$, $+35^\circ\text{C}$). Tako se dobiva pramen od nekoliko karakteristika iz kojega se po potrebi mogu konstruirati novi dijagrami s odabranom varijablom (npr. utjecaj temperature pod nekim odabranim opterećenjem).

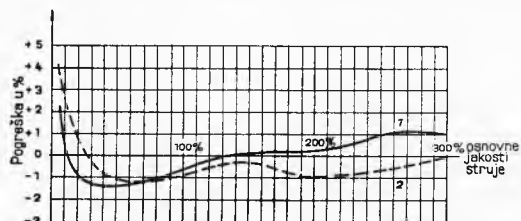
Karakteristika indukcijskih brojila, prikazana u ovisnosti o opterećenju, ponajčešće je valovita krivulja koja siječe dva do tri puta (a karakteristika brojila s proširenim opsegom mjerenja i po pet puta) neki srednji pravac koji je paralelan s osi apscisa. Valoviti oblik karakteristike u prvom redu potječe od permeabil-

nosti strujnog željeza; ona je ovisna o jakosti magnetskog polja koje se mijenja s opterećenjem. U idealnom bi slučaju linija magnetiziranja bila pravac (sl. 14a, 1), ali u stvarnosti, kako je poznato, ona je prikazana krivuljom 2 koja tri puta siječe pravac 1. Predočiti se razlike ordinata između pravca 1 i krivulje 2 u dijagramu (sl. 14b), dobiva se karakteristika brojila u kojoj je uzet u obzir samo utjecaj permeabilnosti željeza.



Sl. 14. Kako dolazi do valovitog oblika karakteristike induksijskih brojila

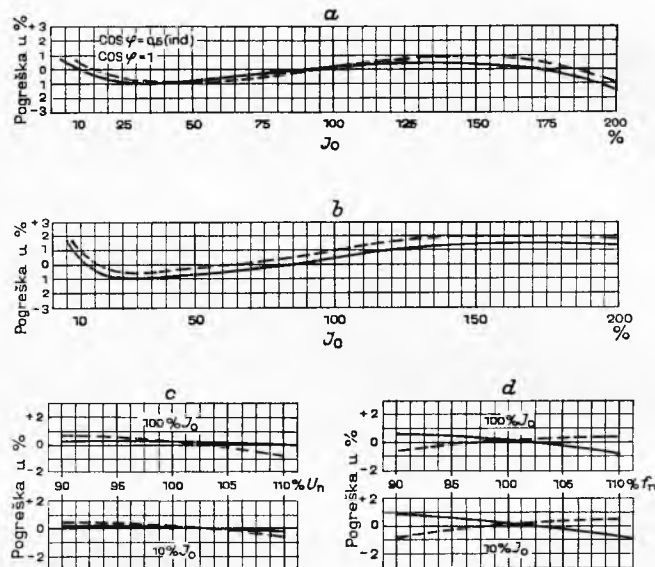
mjenljiva. Utjecaj temperature na ispravnost rada brojila prilično je velik ukoliko nisu poduzete potrebne mjere da se on spriječi. Za smanjenje temperature pogreške upotrebljavaju se bimetalne pločice ili legure kojima je magnetska vodljivost ovisna o temperaturi. Te pločice smještaju se na naponsko željezo (v. sl. 12 d) ili na trajni magnet (v. sl. 4). Viša harmonička titranja do kojih može doći u naponskom ili strujnom krugu mogu također prouzročiti dodatnu pogrešku. Nastupe li u naponskom i strujnom krugu viša harmonička titranja istog reda, nastaje u brojilu zakretni moment koji — zbog ovisnosti pogreške o frekvenciji — može imati velik utjecaj na pogrešku brojila. Nastupe li viša titranja samo u naponskom ili strujnom krugu, dodatne pogreške mogu se najčešće zanemariti jer titranja trećeg reda nastaju zbog trošila manjih snaga (npr. živinih svjetiljki ili slabo opterećenih transformatora) a najvažniji proizvođači viših titranja (npr. mje-



Sl. 15. Karakteristika jednofaznog brojila, proizvod 'Iskra', Kranj; tip E3, 220 V, 10 (30) A. 1 kod faktora snage 1, 2 kod faktora snage 0,5 induktivno

Trenje ima relativno najveći utjecaj kad su opterećenja mala (sl. 14 c). Utjecaj nekompensiranog strujnog prigušenja prikazan je u sl. 14 d. Pretpostavi li se da brojilo radi pod konstantnim naponom i da je naponsko prigušenje potpuno kompenzirano, dobiva se algebarskim zbrajanjem pogrešaka prema sl. 14 b, c i d karakteristika brojila (sl. 14 e) kad je kompenzirano naponsko prigušenje ali nije kompenzirano trenje i strujno prigušenje. Kompenzira li se naponskim pregonom utjecaj trenja i strujnim pregonom utjecaj strujnog prigušenja, dobiva se karakteristika brojila prema sl. 14 f, u kojoj su ucrtane dvije krivulje, jedna za faktor snage 1 i druga za 0,5 induktivno. Stvarna karakteristika brojila poprima u praksi redovito drugačiji oblik nego što izlazi iz ovog idealiziranog promatranja. U sl. 15 prikazana je stvarno snimljena karakteristika pogrešaka nekog jednofaznog brojila.

Dodatne pogreške induksijskog brojila. Dodatne pogreške u pokazivanju brojila (sl. 16) nastaju zbog promjena naponskog toka, struje I_u inducirane u rotoru i kuta između napona mreže U i struje i u naponskom svitku, do kojih dolazi ako je frekvencija promjenljiva.



Sl. 16. Karakteristike trofaznog brojila kod promjenljivih uslova rada. Puno izvučene krivulje odnose se na faktor snage 1, a crtkane na faktor snage 0,5 induktivno. a pogreška brojila kao funkcija simetričnog opterećenja izraženog u % osnovne jakosti struje, b pogreška brojila kao funkcija jednofaznog opterećenja izraženog u % osnovne jakosti struje, c dodatna pogreška zbog promjene referentnog napona za $\pm 10\%$ kod osnovne struje i kod 10% opterećenja, d dodatna pogreška zbog promjene referentne frekvencije za $\pm 10\%$ kod osnovne struje i kod 10% opterećenja

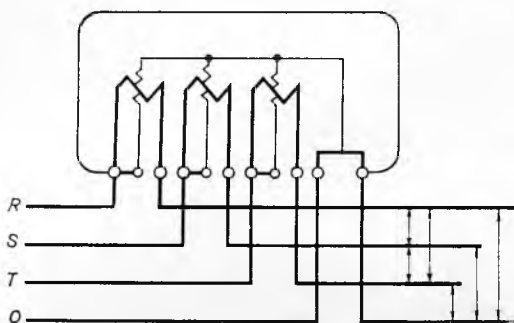
njači i jako opterećeni transformatori) proizvode viša titranja petog ili višeg reda s manjim amplitudama.

Namještanje faznog pomaka. Kut ψ što ga zatvaraju korisni naponski i strujni tok u slučaju istofaznosti napona i struje, tj. kad je $\varphi = 0$, mora za brojila djelatne energije iznositi 90° . Mijenjanjem uložka c (v. sl. 11) može se promijeniti u grubom opsegu tok rasipanja željeza, a prema tome također smjer i veličina vektora korisnog naponskog toka. Fina regulacija može se postići na različite načine, npr. tako da se oko strujnog željeza postave kratko spojeni prsteni od metala koji se mogu odstranjivati ili dodati, ili se dodaje nekoliko zavoja žice u čiji se krug uvrštava promjenljiv otpor (sl. 7 i 8). Na taj se način više ili manje opteretiti strujni magnet pa se vektor strujnog toka pomakne prema vektoru naponskog toka ili se od njega odmakne.

Regulacija brzine vrtnje rotora induksijskih brojila vrši se na različite načine: gruba time što se mijenja razmak između strujnog i naponskog željeza (veći razmak prouzrokuje smanjenje naponskog i strujnog toka a prema tome i brzine), finija time što se odmicanjem i primicanjem trajnog magneta mijenja njegova udaljenost od osovine rotora, a najfinija pomoću mikrometarskog vijka ili sličnih naprava na trajnom magnetu (v. sl. 7). Regulacija kutne brzine promjenom momenta kočenja trajnog magneta djeluje uglavnom tako da se karakteristika pogreški pomiče paralelno prema gore ili dolje. Zbog toga je u prvom redu važno da karakteristika brojila bude što «uža» tj. da gornje i donje ekstremne vrijednosti pogreške ne budu «daleko» jedna od druge; takva se karakteristika može lako dovesti u potrebnu udaljenost od osi apscisa.

Višefazna brojila. Za integriranje djelatne snage višefaznog sustava potrebno je prema ranije rečenom toliko mjernih sistema koliko sustav ima vodova, manje 1. Nije pri tom važno da li su svi ti mjerni sistemi smješteni tako da djeluju na isti rotor (tzv. višefazno brojilo) ili tako da svaki sistem djeluje na posebni rotor (nekoliko jednofaznih brojila). Zbog praktičkih razloga i zbog veće tačnosti daje se prednost višefaznim brojilima. Za pogonske sisteme višefaznih brojila tvornice najčešće upotrebljavaju pogonske sisteme svojih jednofaznih brojila. Trofazno brojilo namijenjeno za trovodne električke sustave, koje integrira snagu po poznatoj metodi dvaju vatmetara (spojeno u tzv. Aronovu spoju) ima dva mjerna sistema. Rotor takvih brojila ima po pravilu dva aluminijska diskosa; na svaki od njih djeluje po jedan pogonski sistem i trajni magnet za kočenje. Brojilo mora ispravno mjeriti i kad su opterećenja nesimetrična pa mora postojati mogućnost

neovisne regulacije svakog pojedinog mjernog sistema. Takva su brojila zbog toga redovito snabdjevena udesivim napravama za izjednačenje zakretnih momenata obaju mjernih sistema. To se može postići mijenjanjem razmaka između strujnog i naponskog magneta u onom pogonskom sistemu gdje je potrebno, ili — najčešće — pomoću udesivih vijaka koji su postavljeni u naponskim



Sl. 17. Priključni plan trofaznog četverovodnog (trosistemskog) brojila (stari način prikazivanja)

magnetima kao poredni magnetski spoj, ili pomoću željeznih pločica u rasporu magneta. Trofazno brojilo namijenjeno za četverovodne sustave (sl. 17) ima po pravilu tri mjerna sistema; svaki od njih integrira snagu jedne faze, tj. strujna staza leži u jednoj fazi (npr. R) a naponska je priključena između dotične faze i neutralnog vodiča (npr. između R i O). Rotor takvih brojila ima redovito dva diskosa; na jedan od njih djeluju dva pogonska sistema a na drugi djeluje treći sistem i magnet za kočenje. Jednako kao za dvosistemsku brojila postoji i za trosistemsku mogućnost izjednačavanja zakretnih momenata pojedinih sistema. Brojila za simetrično opterećene faze upotrebljavaju se ako se može pretpostaviti da su linijski odnosno fazni naponi jednaki i simetrični i da je električki sustav simetrično opterećen. U tom slučaju može se električka energija mjeriti pomoću jednog mjernog sistema. U četverovodnim električkim mrežama upotrebljava se tada jednofazno brojilo koje mjeri potrošak jedne faze, a prijenosni odnos prigona do brojčanika odabere se tako da brojčanik pokazuje trostruku vrijednost, ili se podatak običnog jednofaznog brojila množi sa 3. U trovodnim mrežama, u slučaju simetrično opterećenih faza i simetričnih napona, može se također upotrijebiti jedno jednofazno brojilo. U mnogim državama, pa i u nas, zabranjena je upotreba brojila za simetrično opterećene faze.

Posebne vrste induksijskih brojila. Trošila koja uzimaju iz mreže električku struju koja nije u fazi s naponom, tj. kojima je faktor snage manji od 1 (npr. motori) opterećuju mrežu više nego kada bi uzimala jednaku snagu uz faktor snage 1. Brojila djelatne energije integriraju samo djelatnu snagu, koja ima vrijednost $P_d = UI \cos \varphi$, pa registrirana energija odgovara struji $I \cos \varphi$ a ne struji I koja teče kroz generator, vodove, transformatore itd. Električka postrojenja moraju se ipak dimenzionirati za veću struju I , dakle graditi uz veće troškove. Osim toga će ta veća struja jače ugrijavati vodiče kroz koje prolazi pa će nastati veći gubici u bakru u obliku Jouleove topline. Zbog toga se kod većih potrošača, u elektranama, transformatorskim stanicama i sl. često osim brojila djelatnog potroška priključuju brojila jalovog, prividnog ili mješovitog potroška. Te posebne vrste induksijskih brojila primjenjuju se redovito samo u većim postrojenjima pa dolaze u obzir samo za mjerenje energije trofaznih sustava.

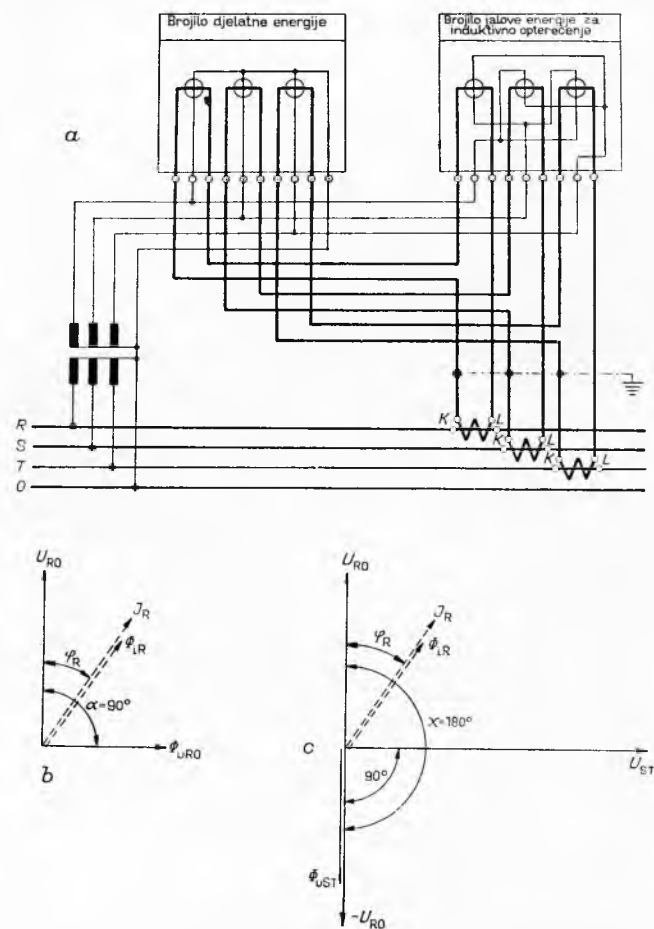
Jednadžba

$$M_z = c UI \sin(\psi \mp \varphi)$$

(v. str. 530), gdje je $\psi = \alpha - \beta$, važi za svako induksijsko brojilo. Brojila se mogu graditi za vrlo različite vrijednosti kutova α i β , a prema tome i za različite vrijednosti unutarnjeg kuta pogonskog sistema ψ , tj. kuta što ga u nekom pogonskom sistemu zatvaraju korisni naponski i strujni tokovi u slučaju istofaznosti struje i napona u mreži, tj. kad je $\varphi = 0$. Tako npr. kut α , tj. kut faznog zaostajanja korisnog naponskog toka za naponom koji određuje snagu u dotičnom mjernom sistemu, može primiti različite vrijednosti ne samo zbog toga što je on ovisan o izboru odnosa ja-

lovog i djelatnog otpora naponskog elektromagneta nego i zbog toga što se naponski svitak može priključiti na bilo koji od faznih ili linijskih napona ako se radi o trofaznoj struji. Kut β , tj. kutna pogreška strujnog toka, također se može izvoditi za različite vrijednosti (npr. priključivanjem porednih otpornika uz strujni svitak elektromagneta). Zakretni moment brojila koje je građeno za $\psi = 90^\circ$ imat će vrijednost $M_z = c UI \cos \varphi$ (uz induktivno opterećenje), tj. brojilo će registrirati djelatnu energiju. Brojilo građeno za $\psi = 0$ ili 180° imat će $M_z = \mp c UI \sin \varphi$, tj. registrirat će jalovu energiju (*brojilo jalove energije*). Brojilo koje nije građeno ni za jednu od tih vrijednosti kuta ψ naziva se *mješovito*. Zapravo je svako induksijsko brojilo u manjem ili većem opsegu mješovito, jer kut ψ ne može baš kod svakog opterećenja zadržati tačnu vrijednost $0^\circ, 90^\circ$ ili 180° . Npr. mješovito brojilo koje bi bilo građeno za $\psi = 60^\circ$ imat će $M_z = c UI \sin(60 - \varphi)$. Rotor toga brojila mirovat će kod $\varphi = 60^\circ$, dakle kod faktora snage $\cos \varphi = 0,5$; rotirat će na jednu stranu — npr. nadesno — ako je $\varphi < 60^\circ$ (tj. $\cos \varphi > 0,5$) a na drugu — dakle nalijevo — ako je $\varphi > 60^\circ$ (tj. $\cos \varphi < 0,5$). Ugradi li se u to brojilo naprava za sprečavanje registriranja u nepoželjnom smjeru vrtnje rotora (npr. nadesno), brojilo će integrirati tzv. *pretičak jalove energije* pa se naziva *brojilo jalovog pretička*. Izvede li se brojilo za $90^\circ < \varphi < 180^\circ$, nastaje mješovito brojilo koje se može iskoristiti kao *brojilo prividne energije* jer na ograničenom pojasu faktora snage može prilično tačno mjeriti prividnu energiju. Rotor toga brojila rotira kod svih vrijednosti kuta φ nadesno a postizava najveću brzinu kod $\varphi = \psi - 90^\circ$. Brojila se mogu izvoditi i za kut $\psi > 180^\circ$, pa nastaju mješovita brojila koja se mogu iskoristiti kao brojila jalovog pretička ili kao brojila prividne energije na ograničenom pojasu faktora snage.

Velika induktivnost naponskog svitka i prirodna mala induktivnost strujnog svitka omogućavaju da se induksijska brojila djelatne energije vrlo lako izvode s potrebnim unutarnjim kutom



Sl. 18. Mjerni agregat: brojilo djelatne energije - brojilo jalove energije, priključen preko mjernih transformatora u četverovodnom trofaznom sistemu. Brojilo jalove energije izvedeno za pomak 90° . a) priključni plan, b) i c) vektorski dijagrami jednog mjernog sistema (sa strujom u fazi R) u slučaju induktivnog opterećenja

pogonskog sistema, tj. $\psi = \alpha - \beta = 90^\circ$ (npr. $\alpha = 90^\circ$, $\beta = 0^\circ$). Naponski svitak brojila djelatne energije može se zbog toga uvijek priključiti na onaj napon, a strujni u onaj strujni krug, koji određuju djelatnu snagu dotičnog mjernog sistema. Kod brojila jalove energije ne može se tako jednostavno postići ispravna vrijednost kuta ψ , tj. da bude $\alpha - \beta = 0^\circ$ ili 180° . Naponski svici brojila jalove energije priključuju se zbog toga često na pomoćne napone koje pruža trofazni sustav, a ne na one koji određuju jalovu snagu. Iskorištavanjem tih pomoćnih napona omogućeno je da se unutar samog pogonskog sistema naponski tok pomakne za 90° , 60° (ili 120°) prema naponu koji je upotrijebljen da se on proizvede. Zbog toga razlikujemo tri vrste trofaznih brojila za jalovi potrošak: brojila s pomakom 180° , 90° i 60° . Međutim, unutarnji kut svakog pogonskog sistema, tj. kut što ga čini naponski tok s naponom koji u tom sistemu određuje snagu, mora — kod desnohodnih brojila — ostati u svakom slučaju 180° . Jednofazna brojila određena za dvovodni izmjenični sustav mogu se izvoditi samo s pomakom 180° , jer u tom sustavu ne stoje na raspolaganju pomoćni naponi. Da bi se ostvario takav pomak, priključuje se naponski svitak jednofaznog brojila jalove energije u smjeru koji je suprotan smjeru kod analognog brojila djelatne energije. Time je već postignut potrebiti pomak od 180° . Ali kako naponski tok zbog induktivnosti naponskog svitka još zaostaje za neki kut α' , bit će ukupni pomak $\alpha = 180^\circ + \alpha'$, dakle veći od 180° . Zbog toga se mora pogreška strujnog toka izvesti tako da bude $\beta = \alpha'$, tj. da bude na koncu $\psi = \alpha - \beta = 180^\circ$. Da bi se to postiglo, mora se paralelno sa strujnim svitkom postaviti omski otpornik s pomoću kojega će se povećati pogreška strujnog toka, a ujedno se nastoji da se naponski magnet izvede sa što manjim kutom α' , tj. da se što više smanji pogreška naponskog toka. Analogno se izvede trofazna brojila s pomakom 180° . Ta brojila imaju prednost pred brojilima koja su izvedena za pomak 90° ili 60° , jer ispravnost registriranja nije ovisna o redosljedu faza niti o simetričnosti naponskog trokuta odn. naponske zvijezde električke mreže.

U sl. 18 prikazan je priključni plan mjernog agregata: brojilo djelatne energije - brojilo jalove energije, koji je priključen preko mjernih transformatora u četverovodnom trofaznom sustavu.

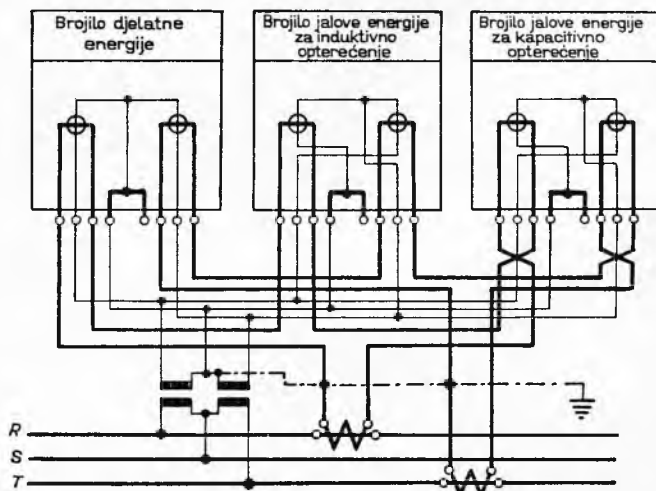
Brojila prividnog potroška. Prividni potrošak W_p lako bi se mogao odrediti čitanjem stanja dvaju brojila, jednog djelatne i drugog jalove energije, kad bi fazni pomak između struje i napona ostao nepromijenjen. U tom je slučaju $W_p = \sqrt{W_d^2 + W_j^2}$. Ali fazni pomak između struje i napona redovito nije konstantan pa je prividnu energiju vrlo teško mjeriti. Brojila za registriranje prividne energije izrađuju se s vrlo kompliciranim mehanizmima koja većinom iskorištavaju poznatu okolnost da se funkcija sinus mijenja polagano kod veličine kuta oko 90° , tj. kad je vrijednost funkcije približno 1. Za vrijednosti $\psi - \varphi \approx 90^\circ$ bit će veličina zakretnog momenta

$$M_z = c UI \sin(\psi - \varphi) \approx c UI,$$

pa će brojilo moći poslužiti za mjerenje prividne energije ako se fazni pomak kreće u nekom ograničenom pojasu. Kod brojila djelatne energije jest $\psi = 90^\circ$, pa se svako takvo brojilo može kod malih vrijednosti kuta φ (npr. između 15° induktivno i 15° kapacitivno) upotrijebiti za prilično tačno mjerenje prividne energije. Izvede li se brojilo s unutarnjim kutom pogonskog sistema većim od 90° , moći će se srednja vrijednost kuta φ pomaknuti od 0° tako da je zadovoljeno uvjetu $\psi - \varphi = 90^\circ$, pa će brojilo pokazivati prividni potrošak koji će biti prilično tačan kod srednje vrijednosti faznog pomaka φ veće od 0° . Takva brojila prividne energije nazivaju se *brojila prividne energije s ograničenim faktorom snage*. Područje faktora snage može se lako proširiti ako se primijeni nekoliko takvih mješovitih brojila izvedenih za različite unutarnje kutove pogonskog sistema i ta brojila posebnim prigronom tako povežu da na zajednički brojčanik uvijek djeluje onaj rotor koji rotira najvećom brzinom. Tako se npr. s dva mješovita brojila od kojih je jedan udešen za $\psi = 90^\circ$ a drugi za $\psi = 135^\circ$ može postići da zajedno registriraju prividnu energiju s tačnošću $\pm 3\%$ uz faktore snage od 0,94 kapacitivno do 0,5 induktivno. Tvornica Landis & Gyr gradi pod nazivom »Trivector« brojilo koje u biti radi po istom principu. Sastavni su mu dijelovi jedno brojilo djelatne i jedno jalove energije. Brojilo ima tri brojčanika, tj. za djelatni, jalovi i prividni potrošak. Brojilo djelatne i brojilo jalove energije djeluju preko posebno izvedenog mehanizma na

brojčanik za prividni potrošak iskorištavajući činjenicu da rotor brojila djelatne energije ima najveću brzinu kad je fazni pomak 0° , a rotor brojila jalove energije kad je fazni pomak 90° . Brojila prividnog potroška koja proizvodi tvornica Siemens & Schuckert također su sastavljena od jednog brojila djelatne i jednog jalove energije. Kutne brzine njihovih rotora zbrajaju se geometrijski, a kao prijenosni mehanizam služi kuglični prigon. Staklenu, nahrenjavljenu i čeličnom jezgrom otežanu kuglicu toga prigona pokreću dva koturića, jedan povezan s rotorom brojila djelatne a drugi s rotorom brojila jalove energije. Kutna brzina trećeg, zakretljivog koturića, koji ujedno služi za pridržavanje kuglice, proporcionalna je s prividnom snagom. Vrtanja tog koturića iskorištava se ujedno za pokretanje pokazivača maksimuma, a osovina zakretljivog koturića povezana je s kazaljkom koja pokazuje vrijednost faktora snage.

Mjerni agregati brojila djelatne, jalove i prividne energije. Kad se mjere veće količine električke energije, potrebno je da postoji mogućnost registriranja električke energije i u slučaju kad brojilo zataji, npr. kad pregori naponski svitak, kad se s vremenom promijene pogreške itd. U takvim slučajevima priključuju se dva djelatna brojila u tzv. *kontrolni spoj*; analogni strujni svici obaju brojila spajaju se tada u seriju a naponski svici paralelno. Brojila u kontrolnom spoju neće uvijek registrirati jednako jer imaju različite pogreške, nego će im se podaci nešto razlikovati (i za nekoliko postotaka). Obično se za obračunavanje električke energije uzima kao mjerodavna aritmetička sredina podataka obaju brojila. U pogonima gdje je potrebno mjeriti djelatnu i jalovu snagu postavljaju se mjerni agregati od jednog brojila djelatne i jednog brojila jalove energije. Takvi mjerni agregati mogu se upotrijebiti samo uz pretpostavku da se opterećenje neće promijeniti iz induktivnog u kapacitivno ili obratno, jer bi u tom slučaju rotor brojila jalove energije rotirao u negativnom smjeru. Da se to spriječi, često se propisuje da brojilo jalove energije mora imati *napravu za sprečavanje proturegistriranja* (npr. za sprečavanje obrnutog rotiranja rotora ili negativnog registriranja). Budući da kapacitivno trošilo po pravilu popravljiva faktor snage, može mu se to odobriti tako da se brojilo jalove energije izvede bez naprave za sprečavanje proturegistriranja. Kod induktivno-kapacitivnog potrošača postavljaju se ponajčešće uz jedno brojilo djelatne energije dva brojila jalove, jedno za induktivno a drugo za kapacitivno opterećenje. Oba brojila jalove energije (sl. 19) moraju imati napravu za sprečavanje proturegistriranja. Strujne staze spajaju se tada u seriju, ali u protuspoju, a naponske paralelno. Kad se mjere djelatna i jalova energija koje mogu teći u oba smjera, mjerni agregat treba da ima dva brojila djelatne i četiri brojila jalove energije, dva za induktivno, a dva za kapacitivno opterećenje. Svako od tih brojila mora imati napravu za sprečavanje proturegistriranja, tako da brojilo djelatne energije ne može registrirati poslije promjene smjera toka energije, a brojila jalove energije ni onda kad se induktivno



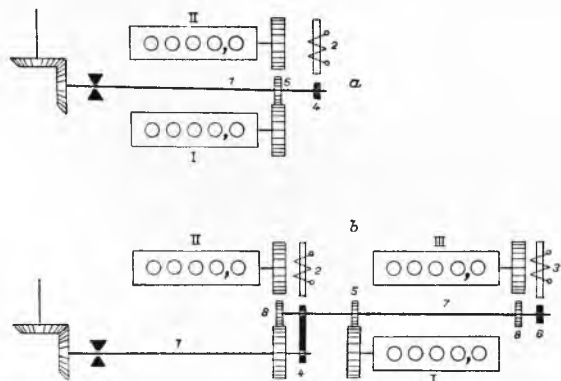
Sl. 19. Priključni plan mjernog agregata sastavljenog od jednog brojila djelatne i dvaju brojila jalove energije, koji su priključeni preko mjernih transformatora na trofaznu trovodnu mrežu. Brojila jalove energije služe za mjerenje induktivnog odnosno kapacitivnog potroška, pa moraju imati naprave za sprečavanje proturegistriranja

opterećenje promijeni u kapacitivno, ili obratno. Budući da brojila jalove energije ne reagiraju ispravno na promjenu smjera toka električne energije, mora se s pomoću posebnog releja upravljati njihovim radom tako da registrira samo onaj par koji je određen za dotični smjer. Najčešće je u tu svrhu jedno od djelatnih brojila snabdjeveno pomoćnim kontaktom na koji djeluje rotor kad se promijeni smjer vrtanje, tj. smjer toka energije. Taj kontakt djeluje na relej koji pri davanju električne energije stavlja pod napon po jedno od brojila jalove energije namijenjenih za induktivnu i kapacitivnu struju, a pri primanju električne energije stavlja pod napon ostala dva brojila jalove energije i brojilo djelatne energije. Prvo brojilo djelatne energije mora biti izvedeno tako da mu rotor može rotirati u oba smjera, ali da brojčanik registrira samo kad se električna energija daje. Umjesto četiri brojila jalove energije mogu se upotrijebiti dva dvotarifna. Tvornica Landis & Gyr izvodi mjerne agregate s dodatnim brojčanicima za prividni potrošak pod nazivom »Trivector za četiri kvadranta«. Takvim agregatom mogu se u svakom trenutku ustanoviti podaci o jalovoj, djelatnoj i prividnoj energiji u oba smjera toka. Prividnu energiju mjere dva dvotarifna brojila po principu koji je gore opisan za brojilo »Trivector«. S obzirom na to da se radi o davanju i primanju električne energije, proteže se fazni kut između napona i struje za svaku stranu na sva četiri kvadranta pa je tim agregatom omogućeno mjerenje djelatnog potroška prilikom davanja i primanja, jalovog potroška uz induktivno opterećenje, i to prilikom davanja i primanja, i jalovog potroška uz kapacitivno opterećenje za oba smjera toka energije. Osim toga omogućeno je mjerenje prividnog potroška prema shemi koja je opisana za brojila jalove energije.

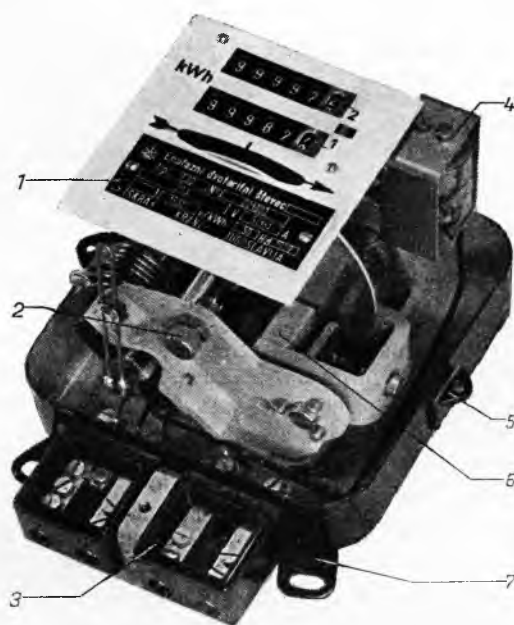
TARIFNA BROJILA

Tarifna brojila služe za što prikladnije provođenje tarifne politike prodaje električne energije. Izvode se tako da prilikom registriranja električnog potroška uzimaju u obzir različite značajne okolnosti upotrebe električne struje, kao npr. doba dana u kojem se uzima struja (vremenska tarifa), visina opterećenja (učinska tarifa), smjer toka električne energije (tarifa davanja i primanja) itd. Mnogobrojne mogućnosti izvođenja električkih brojila potpomognute različitim vrstama dodatnog pribora imale su kao posljedicu da se tarifna politika prodaje električne energije razvila i profinila u vrlo velikom opsegu. Tako su se npr. razvila brojila s napravama za prebacivanje na različite tarifne položaje brojčanika (višestruka tarifa), za upravljanje početka registriranja tek kad se postigne stanovito opterećenje (vršna tarifa), za registriranje srednjeg opterećenja postignutog u nekom vremenskom intervalu i za pokazivanje maksimuma tog srednjeg opterećenja (maksimalna tarifa), za brojenje učestalosti prekoračenja ugovorenog potroška (količinska tarifa) itd.

Općenito, brojila mogu biti *jednotarifna* ili *višetarifna*. Višetarifna brojila mogu se izvoditi sa dvije, tri ili četiri tarife, pa se nazivaju dvotarifna, trotarifna, odnosno četverotarifna. Jednotarifna imaju brojčanik s jednim brojačem, tj. s jednim nizom znamenaka za čitanje stanja. Višetarifna brojila mogu se snabdjeti jednotarifnim ili višetarifnim brojčanicima. Višetarifni brojčanik



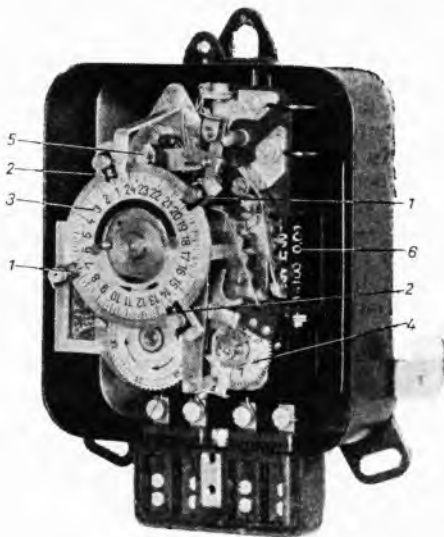
Sl. 20. Shematski prikaz višetarifnog brojčanika. a s dva tarifna položaja, b s tri tarifna položaja. 1 i 7 osovine brojčanika stalno povezane preko prigona s rotorom brojila, 2 i 3 releji za prebacivanje rada na tarifne položaje II i III, 4 i 6 pokretljivi ležajevi koje mogu privući releji, 5 i 8 čeonci zupčanici za pokretanje koturica brojčanika



Sl. 21 Jednofazno dvotarifno brojilo s proširenim opsegom mjerenja. 1 oznaka pločica, 2 donji ležaj, 3 priključnica, 4 relej za prebacivanje tarife, 5 ušica za pričvršćenje glavnog poklopca, 6 magnet za kočenje s mikrometarskom regulacijom, 7 ušica za pričvršćenje brojila

ima dva ili više brojača koji se nazivaju *tarifni položaji* ili — kada — naprosto tarife (npr. prva i druga, visoka, srednja i niska tarifa) a ugrađuju se samo u motorna brojila. U sl. 20 shematski je prikazan rad višetarifnog brojčanika sa dva i tri tarifna položaja. Releji 2 i 3 aktiviraju se u vremenskim tarifnim brojlama time što se stave pod napon preko sklopnog sata, a u ostalim tarifnim brojlama time što se stave pod napon, ili se u njih pušta struja, u ovisnosti o namjeni. Sklopni sat može biti ugrađen u samom brojilu ili se smješta odijeljeno. Sklopni sat ugrađen u brojilu može upravljati radom pojedinih tarifnih položaja izravno, tj. mehaničkim prijenosom, pa su releji nepotrebni. Sl. 21 prikazuje jednofazno dvotarifno brojilo sa skinutim poklopcem, tako da se vidi relej 4 za prebacivanje tarife. Relej se aktivira preko odijeljenog smještenog sklopnog sata.

Vremensko višetarifno brojilo povezano je sa sklopnim satom koji u stanovito doba dana izravno, dakle mehaničkim pri-



Sl. 22. Sklopni sat za aktiviranje releja dvotarifnog brojila (proizvod »Siemens-Schuckertwerke«). 1 jahači za visoku tarifu, 2 jahači za nisku tarifu, 3 dnevna pločica sa jahačima koji uključuju nisku tarifu od 1^h do 7^h i od 14^h do 20^h, a visoku tarifu od 7^h do 14^h i od 20^h do 1^h, 4 tjedna pločica, 5 pregibna sklopka, 6 namot asinhronog motora za navijanje sata

jenosom, ili električki, preko releja, djeluje na uređaj za prebacivanje tarifnog položaja. Sklopni sat pokreće mehanizam za pokretanje (čelično spiralno pero na ručno navijanje ili električko navijanje pomoću sinhronog ili Ferrarisovog elektromotora). U njemu se nalazi (sl. 22) *vremenska ili dnevna pločica* sa 24-satnom podjelom, na koju se može na različitim mjestima pri rubu postaviti 2, 4, 6 ili više pomičnih jahača. Na slici 22 prikazani sklopni sat, budući da nije ugrađen u samom brojilu, ima posebno kućište i priključnicu s potrebnim brojem stezaljki. Dnevna pločica rotira jednoliko i nosi jahače koji u odabrano doba dana djeluju mehanički na pregibnu sklopku pa ova aktivira releje na višetarifnom brojčaniku. Često se postavlja i tzv. *tjedna pločica* s mirnim kontaktom, pomoću koje se tjedno jedanput (npr. od subote u 13^h do ponedjeljka u 6^h) isključuje rad visoke tarife ili pokazivača maksimuma (v. dalje). Sklopni satovi često su snabdjeveni i *učinskom sklopkom* koja služi za izravno uključivanje i isključivanje trošila (npr. bojlera, frižidera, ulične rasvjete itd.).

Brojila s otežanim kretanjem. Uz pretpostavku da će neka trošila snage u kućanstvima (npr. glačala, električki štednjaci itd.) biti priključena u vrijeme kad je elektrana manje opterećena, električka energija za takva trošila prodaje se jeftinije nego npr. za rasvjetu (tzv. *degresivna tarifna politika*). U kućanstvima koja imaju električku instalaciju za rasvjetu postavlja se osim uobičajenog brojila za mjerenje skupnog potroška *brojilo s otežanim kretanjem*, koje se također naziva kućansko, prijenosno ili odobravajuće. Razlika električkih potrošaka glavnog brojila i brojila s otežanim kretanjem naplaćuje se uz višu tarifu a električki potrošak koji je registriralo brojilo s otežanim kretanjem uz nižu. Nekoć su se u nas mnogo primjenjivala ta brojila, ali povezivanjem električkih mreža velikih proizvođača električke energije ta je vrsta tarife izgubila svoj smisao.

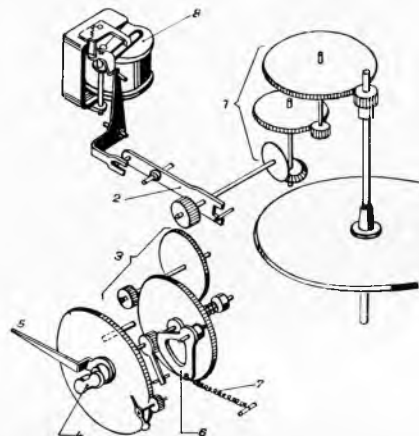
Brojila pretička registriraju pretičak električke energije kad opterećenje premaši određenu graničnu vrijednost. Ova brojila mogu biti *vršna* ili *suptrakciona*, već prema tome da li je brojilo snabdjeveno samo brojčanikom za pretičak ili osim njega postoji i brojčanik za ukupnu potrošnju. Tarifna politika uz primjenu tih brojila svodi se na to da se kod naručenog vršnog opterećenja plaća manji iznos — većinom paušalni — ili jedinični iznos prema potrošku koji je registriralo skupno brojilo, a kad opterećenje premaši vršno, zaračunava se velika tarifa za pokriće troškova spremnosti elektrane, kako bi se potrošač ponukao da drži opterećenje ispod ugovorene granice.

Brojila i pribor za maksimalnu tarifu. Tarifnom politikom prodaje električke energije nastoji se potrošač stimulirati da što jednoličnije raspodijeli svoj potrošak električke energije i da ga u stanovito doba dana (npr. navečer) ograniči na što manju vrijednost. Običnim jednotarifnim brojilima ne može se kontrolirati u koje doba dana potrošač najviše opterećuje električku mrežu, a ne može se kontrolirati ni jednolikost opterećenja. Vremenska dvotarifna brojila djeluju doduše na potrošača onamo da nastoji podmiriti svoje potrebe na energiji što više u doba dana koje odgovara proizvođaču električke energije, ali ne pružaju mogućnost kontroliranja jednoličnosti opterećenja. Proizvođači električkih brojila izradili su zbog toga naprave za pokazivanje maksimuma opterećenja, koje su najčešće povezane s električkim brojilima. Te naprave imaju zadatak da registriraju maksimalno opterećenje koje prouzrokuju trošila u stanovitom vremenskom razdoblju, npr. 10, 15, 30 ili 60 minuta. Pomoću takvih naprava može se kontrolirati maksimalno srednje opterećenje i primijeniti način zaračunavanja električke energije koji stimulira potrošača da svoje potrebe raspodijeli jednolično i koji se time prilagođuje troškovima proizvodnje.

Termički pokazivač maksimuma jest jednostavna i jeftina sprava pomoću koje se kod malih potrošača kontrolira najveća srednja vrijednost opterećenja. Strujom se grije bimetalna pločica koja se time savija i pomiče kazaljku ostavljajući je uvijek u položaju najvećeg uklona. Čitač stanja električkog brojila vraća, prilikom čitanja, kazaljku u početni položaj.

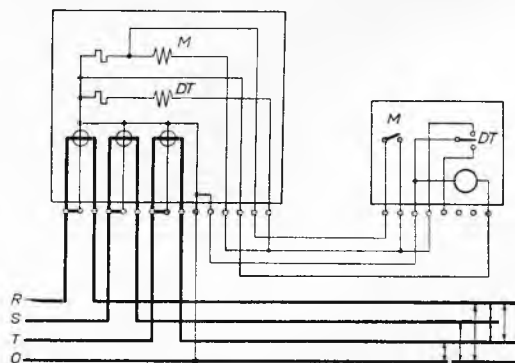
Brojilo s pokazivačem maksimuma prikazan je na sl. 23. Osovina rotora običnog brojila pokreće za vrijeme perioda registriranja preko prigona 1, dvokrake pregibne poluge 2, prigona 3 i prijenosnika 4 kazaljku 5 pokazivača maksimuma. Pri tom se s

pomoću nazubljenog segmenta 6 nateže opruga 7. To pokretanje traje dok god je relej 8 aktiviran, tj. dok on drži čelnik pregibne poluge 2 priljubljen uz čelnik prigona 3. Nakon završenog perioda registriranja, koji po pravilu iznosi 15 ili 60 minuta, odijeljeno



Sl. 23. Shematski prikaz rada pokazivača maksimuma. 1 i 3 prigoni, 2 dvokrake pregibne poluge, 4 prijenosnik, 5 kazaljka pokazivača, 6 nazubljeni segment, 7 čelična opruga, 8 relej aktiviran od odijeljeno postavljenog sklopnog sata

smješteni sklopni sat prekine kroz nekoliko sekundi kratkim spajanjem namota releja njegovo djelovanje, pregibna poluga rastavi mehanički spoj obaju čelnika, opruga 7 preko segmenta 6 okrene prijenosnik 4 u početni položaj, a kazaljka 5, zbog trenja, zaostane na postignutom položaju maksimalnog uklona. Veće opterećenje prouzročit će brže okretanje rotora brojila pa će se kazaljka pokazivača maksimuma pomaknuti dalje, a njen položaj bit će mjera za srednju vrijednost opterećenja za vrijeme perioda registriranja. Ispod kazaljke nacrtana je kružna skala koja je građurana tako da se množenjem uklona kazaljke s tzv. *konstantom pokazivača maksimuma* dobiva srednja vrijednost opterećenja (npr. u kilovatima). Ako je srednje opterećenje u slijedećem periodu registriranja manje nego u ranijim periodima, prijenosnik 4 neće dohvatiti kazaljku 5 pa će ona ostati na prijašnjem položaju. Ako je srednje opterećenje u kasnijem periodu registriranja bilo veće, prijenosnik će kazaljku, pošto je dohvati, pomicati naprijed do nekog novog položaja, koje označuje veće srednje opterećenje. Kazaljka će prema tome ostati na položaju maksimalnog srednjeg opterećenja koje je postignuto između dva čitanja stanja brojila (npr. u mjesec dana). Čitač stanja brojila prilikom čitanja brojila pomoću naprave koja se može plombirati pomakne kazaljku u

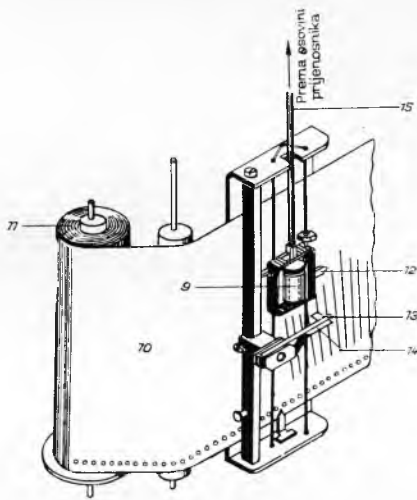


Sl. 24. Priključni plan trofaznog trosistemskog dvotarifnog brojila s pokazivačem maksimuma i odijeljeno postavljenog sklopnog sata. Maksimum se registrira samo za vrijeme visoke tarife. DT relej i sklopka za prebacivanje tarife, M relej i sklopka pokazivača maksimuma

početni položaj. Brojilo s pokazivačem maksimuma ima uvijek ugrađen jednotarifni ili višetarifni brojčanik koji registrira potrošenu energiju. Pokazivač maksimuma može se pomoću sklopnog sata priključiti tako da radi samo u zapornom vremenu, tj. za vri-

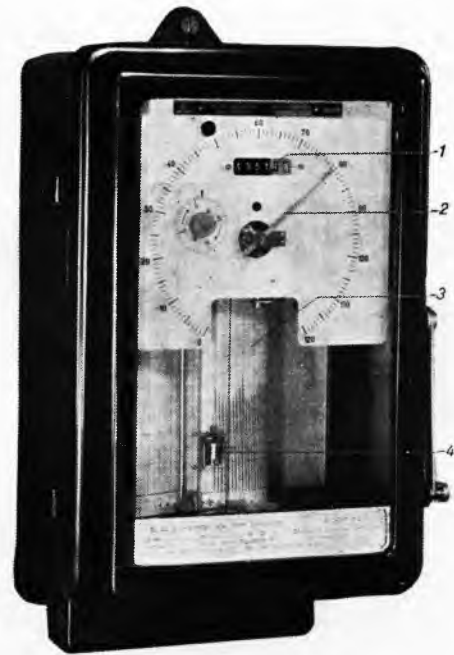
jeme visoke tarife. Takva brojila mogu se snabdjeti i dvama pokazivačima maksimuma koji se odijeljeno uključuju pomoću svojih releja ako tarifna politika prodaje energije predviđa svakog dana dva zaporna vremena ili ako se srednji maksimum za vrijeme visoke tarife zaračunava uz cijenu koja je različita od cijene za vrijeme niske tarife. U sl. 24 nacrtan je priključni plan dvotarifnog brojila s pokazivačem maksimuma i odijeljeno postavljenog sklopnog sata. Pod nazivom *kumulativni pokazivač maksimuma* proizvode se brojila s dodatnim brojčanikom koji registrira maksimalno opterećenje koje je pokazala kazaljka pokazivača prije vraćanja u početni položaj. Stanje kumulativnog brojčanika ne mijenja se do slijedećeg čitanja pa se u slučaju spora može naknadno utvrditi koje je maksimalno srednje opterećenje bilo utvrđeno prilikom posljednjeg čitanja.

Brojilo s registriranjem maksimuma. U stanovitim slučajevima važno je znati kako se tokom dana mijenja opterećenje, u koje je vrijeme nastupio maksimum itd. U tu se svrhu proizvode brojila s registriranjem maksimuma, tzv. *maksigrafi*. Na osovini prijenosnika brojila s pokazivačem maksimuma (v. sl. 23, 4), može se ukliniti profilirani točak i oko njega namotati vrpca 15 (sl. 25) s



Sl. 25. Shematski prikaz pisane naprave brojila za registriranje maksimuma. 9 pisaca naprava, 10 papirnata traka, 11 papirnat smotak, 12 izdanak za spajanje i rastavljanje kontakta, 13 i 14 kontakti za signaliziranje, 15 vrpca koja je na drugom kraju omotana oko osovine prijenosnika za pokazivanje maksimuma

pričvršćenom piscu posudicom 9 koja može na papirnatu traci 10 ucrtavati srednju vrijednost opterećenja postignutog za vrijeme svakog perioda registriranja. Papirnatu traku pomiče jednolikom brzinom od ~ 10 mm/h satni mehanizam koji može ujedno poslužiti kao sklopni sat za kratko spajanje releja pokazivača. Pisaca posudica može se snabdjeti izdankom 12 koji će prilikom prolaza spajati kontakte 13 i 14 i tako signalizirati da je opterećenje premašilo odabranu vrijednost. Pokazivač maksimuma i pisaca naprava najčešće se smještaju u neposrednoj blizini električkog brojila koje je izvedeno uobičajenim načinom, a povezuje ih samo osovina koja je s pomoću pužnog vijka i pužnog kola povezana s osovino brojila. Često se izvode brojila sa suhim registriranjem maksimuma, npr. utiskivanjem rupica (8 po mm duljine) koje daju dojam kontinuiranog dijagrama, ili s pomoću tiskarske naprave koja na koncu perioda registriranja utisne velikom tačnošću veličinu maksimuma. Tvornica Landis & Gyr proizvode takve sprave pod nazivom »printomaksigrafi«. U novije se vrijeme mnogo primjenjuje tzv. *perforator maksimuma* na kojem se iz položaja izbušenih rupica u papirnatu traci može zaključiti koliki je bio maksimum i kada je zabilježen posljednji srednji maksimum. Sinhronim zbrajanjem podataka sa više mjesta potroška energije može se s pomoću posebnih računskih strojeva vrlo brzo ustanoviti kada je nastupio zajednički srednji maksimum i kolika mu je bila vrijednost. U sl. 26 prikazan je daljinski brojčanik, pokazivač maksimuma i pisaca naprava za registriranje opterećenja odnosno maksimuma s impulsnim pokretanjem, a u sl. 27 dvotarifni da-

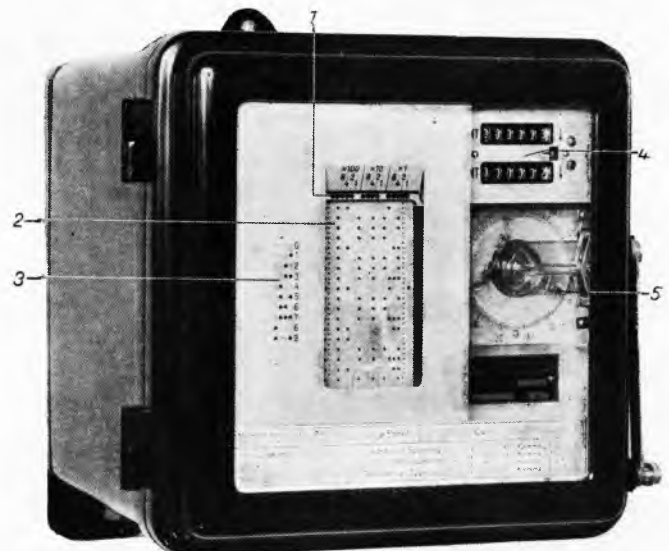


Sl. 26. Daljinski brojčanik, pokazivač maksimuma i pisaca naprava za registriranje opterećenja s impulsnim pokretanjem (proizvod »Siemens-Schuckertwerke«). 1 brojčak, 2 kazaljka pokazivača maksimuma, 3 papirnat traka za registriranje opterećenja, 4 držalo s perom za pisanje opterećenja odnosno maksimuma

ljinski brojčanik, pokazivač maksimuma i perforator srednjeg opterećenja s impulsnim pokretanjem, fabrikat tvornice Siemens-Schuckertwerke. Takav perforator može istodobno bušiti rupice u četiri trake.

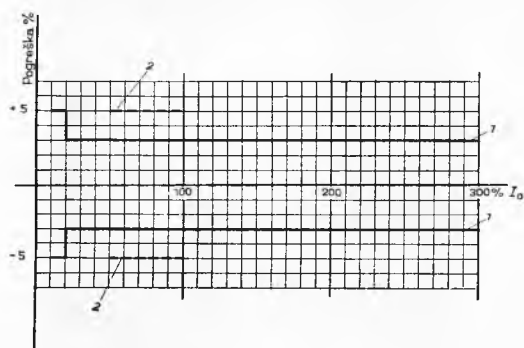
Brojač učestalosti prekoračenja ugovorenog potroška.

Pokazivači maksimuma imaju nedostatak što ne daju podatke o tome koliko je puta u razdoblju između dva čitanja stanja prekoračen neki ugovoreni maksimum. Srednji maksimum u tom razdoblju mogao je biti inače vrlo malen, a samo jedanput je možda nastupio velik maksimum, ali potrošač će morati platiti veliki iznos kao da je stalno opterećivao s pokazanim srednjim maksimumom. Da bi se uklonio taj nedostatak, konstruirana su posebna brojila snabdjevena brojačem učestalosti prekoračenja ugovorenog potroška. On daje podatke ne samo o učestalosti prekoračenja ugovorenog potroška nego i o stepenu preopterećenja; drugim



Sl. 27. Daljinski brojčanik, pokazivač maksimuma i perforator srednjeg opterećenja s impulsnim pokretanjem (proizvod »Siemens-Schuckertwerke«). 1 vodilica probijača, 2 papirnat traka sa tri dekadski mjesta, 3 ključ za čitanje dualnih znamenaka, 4 dvotarifni brojčanik, 5 pokazivač maksimuma

riječima, iz njegovih podataka može se zaključiti kolik je faktor raznolikosti pa se može primijeniti količinska tarifa prodaje električne energije.



Sl. 28. Granice dozvoljenih pogrešaka brojila izmjenične struje prema jugoslavenskim propisima iz 1938. 1 za brojila djelatne energije kod faktora snage 1 do 0,8 i za brojila jalove energije od 0 do 0,2, 2 za brojila djelatne energije kod faktora snage od 0,8 do 0,5 i za brojila jalove energije od 0,2 do 0,5

Registriranje stanja fotografiranjem. Za male potrošače bilo bi skupo kad bi se — makar i na kratko vrijeme — priključila brojila za registriranje opterećenja. Za slučaj da je i u tom slučaju potrebno poznavati dijagram opterećenja, neke tvornice (npr. Siemens-Schuckertwerke) proizvode jednostavne fotografske aparate koji u jednakim vremenskim razmacima snimaju stanje brojčanika. Takav fotografski aparat, poznat pod nazivom »fotomaks«, može se pričvrstiti na svako električno brojilo i on automatski, u jednakim intervalima vremena (npr. 15, 30 ili 60 minuta), snima stanje brojila.

KONTROLA I ISPITIVANJE ELEKTRIČKIH BROJILA

Kao sva druga sredstva za mjerenje u javnom prometu, tako i električna brojila stoje pod nadzorom državne vlasti, koja im kontrolira tačnost i ispravnost.



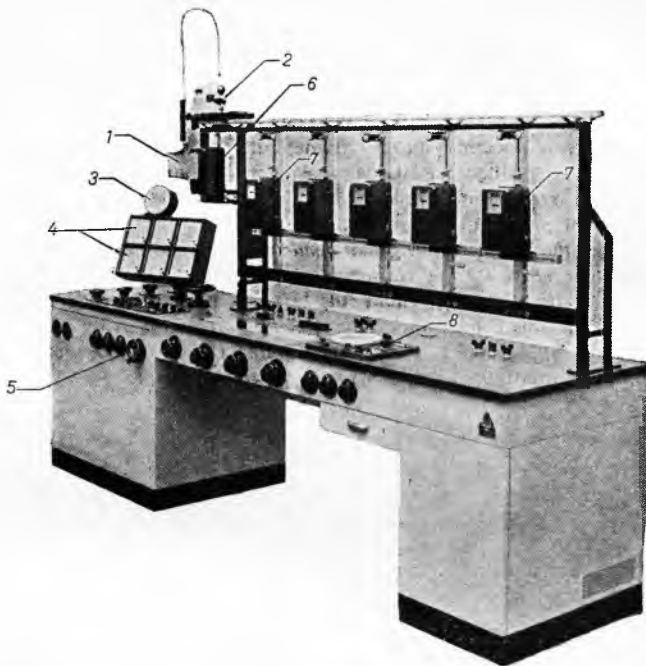
Sl. 29. Jednofazno baždarsko brojilo (proizvod »Compagnie des compteurs«). 1 brojčanik s kazaljka, 2 okretljivo dugme za postavljanje kazaljki brojčanika u nulti položaj, 3 stezaljke za naponsku stazu, 4 stezaljke za strujnu stazu

ničkim komitetom priprema propise prema kojima će se u javnom prometu kao najslabija klasa tačnosti predvidjeti klasa 2.

Ispitivanje ispravnosti brojila ne mora uvijek biti vezano sa službenim pregledom brojila, nego se može obavljati i s namjerom da se *justiranjem*, tj. stanovitim udešavanjem regulacijskih organa, izmijeni pogreška brojila. Takvo ispitivanje koje je povezano s justiranjem naziva se i *baždarenjem brojila*; najčešće se obavlja u radionicama gdje se brojila popravljaju.

Električna brojila mogu se ispitivati na mjestu svog stalnog priključka ili u laboratorijima. Na mjestu priključka mogućnost ispitivanja ograničena je na upoređivanje ispitivanog brojila sa *baždarskim brojilom* (sl. 29).

U laboratorijima upotrebljavaju se jednofazni i trofazni uređaji za ispitivanje brojila, u stabilnoj (sl. 30) ili prevozivoj izvedbi. U tim uređajima ugrađene su potrebne sklopke, aparati za biranje i reguliranje jakosti struje i veličine napona, precizni mjerni



Sl. 30. Stabilni uređaj za ispitivanje trofaznih brojila s prigradenim regalom za smještanje brojila (proizvod »Zera«, Königswinter). 1 fotoelektrička glava za brojenje okretaja, 2 pojačalo impulsa, 3 sekundomjer na ručno i električno upravljanje, 4 ampermetri i voltmetri, 5 ručica faznog regulatora, 6 precizno ili baždarsko brojilo, 7 brojila koja se ispituju, 8 upravljačka ploča za automatsko brojenje okretaja

transformatori, reduktori i instrumenti, aparati za postizanje povoljnog faznog pomaka između struje i napona (tzv. fazni regulatori), aparati za postizanje i indiciranje simetričnosti naponskog trokuta i naponske zvijezde ako se radi o uređaju za ispitivanje trofaznih brojila itd. Kad se za određivanje stvarne vrijednosti veličine koju brojilo integrira upotrebljavaju precizni ampermetri, voltmetri ili vatmetri, mora osim spomenutih uređaja postojati i uređaj za savršenu i brzu automatsku stabilizaciju napona. Na uređaje za ispitivanje redovito se postavljaju tzv. regali, tj. jednostrani ili dvostrani stalci za smještanje i priključivanje brojila. Na takve stalke može se smjestiti do 40 jednofaznih ili 20 trofaznih brojila. Kod serijskog ispitivanja većeg broja komada brojila postavljaju se dodatni stabilni ili prevozi regali (sl. 31), na koje se mogu smještati brojila na jednoj strani ili na obje. Biranu



Sl. 31. Prevozi regali za justiranje i ispitivanje jednofaznih i trofaznih brojila

i stabiliziranu električku struju odnosno napon dobivaju regali od opisanih uređaja za ispitivanje brojila preko vodova (npr. preko kabela koji se mogu po potrebi premještati od regala do regala, ili preko vodova koji su položeni u podu prostorije za ispitivanje).

Prilikom ispitivanja većeg broja brojila najčešće se strujne staze istovrsnih brojila (npr. jednofaznih ili istosmjernih) povezuju u seriju a naponske staze paralelno. Pri tom se odabiru brojila za priključak na iste napon i frekvencije, a najčešće i za iste jakosti struje. Kod nekih metoda ispitivanja vrši se tada serijsko ispitivanje u punom smislu riječi, tj. istovremeno se ispituju pogreške svih brojila; kod drugih metoda, pak, svako se brojilo ispituje pojedinačno, iako je više brojila spojeno u seriju. Pri tom se najčešće ispituje istovremeno nekoliko brojila, ali se za svako brojilo upotrebljava posebna sprava prilikom ispitivanja, npr. sekundomjer ili baždarsko brojilo.

Električka brojila koja imaju strujne i naponske staze ispituju se u laboratorijima najčešće tako da se svakoj stazi podjeljuje struja i napon iz odijeljenih mreža, npr. preko posebnih mjernih transformatora nakon što je prethodno načinjen potrebni pomak faze, ili se strujne i naponske staze poje od odijeljenih generatora. Za postizanje potrebnog faznog pomaka između ispitne struje i napona može se, kod izmjenične struje, jedan od tih generatora izvesti s okretljivim satorom; u tom slučaju ne treba predvidjeti fazni regulator.

O preciznosti mjernih transformatora, reduktora, vatmetara, baždarskih brojila itd. ovisi tačnost postignutih rezultata ispitivanja. Za ispitivanja trofaznih brojila moraju se upotrijebiti dva ili tri precizna jednofazna vatmetra ili baždarska brojila, jer se trofazni vatmetri i baždarska brojila ne mogu lako izvesti s dovoljnom preciznošću.

LIT.: Meter Committee technical national section, National Electric Light Association: Handbook for electrical metermen, New York 1923. — J. A. Möllinger, Wirkungsweise und Entwurf der Motorzähler und Meßwandler, Berlin 1925. — W. Kravouski, Grundzüge der Zählertechnik, Berlin 1930. — G. Paul, Die Elektrizitätszähler, Stuttgart 1940. — Edison Electric Institute, Electrical metermen's handbook, New York 1940. — Physikalisch-technische Bundesanstalt, Eichordnung für elektrische Meßgeräte vom 1. Januar 1942. — A. Palm, Registrierinstrumente, Berlin 1950. — P. M. Pflüger, Elektrische Meßgeräte und Meßverfahren, Berlin 1951. — K. Schmiedel, Prüfung der Elektrizitätszähler: Meßeinrichtungen, Meßmethoden und Schaltung, Berlin 1954. — P. M. Pflüger, Elektrizitätszähler, Tarifgeräte, Meßwandler, Schaltuhren, Berlin 1954. — W. Beetz, Elektrizitätszähler, Tarifgeräte und Schaltuhren, Braunschweig 1958. Z. Hukavec

BROM (bromum, Br, at. br. 35, at. tež. 79,909), kemijski element koji je u prosječnom sastavu Zemljine kore zastupan malim procentom (0,00016%). Primarno raspršen u difuznom stanju u magmatskim stijenama, on se izlučuje površinskim vodama i tako dospijeva u more, u slana jezera, slane izvore i vodu naftnih bušotina. Iz slanih voda ga uzimaju i u svom organizmu nagomilavaju neke vodene biljke i životinje (npr. bagarke, morski puževi iz kojih se nekad dobivao purpur). U morskoj vodi (sa 0,0065% Br) nalazi se 99% svega tehnički iskoristivog broma.

Kudikamo najveće količine broma upotrebljavaju se danas u obliku spoja etilen-dibromida kao dodatak benzinu za eksplozivne motore; ostatak se u obliku velikog broja spojeva (~ 200) upotrebljava u manjim količinama za najrazličitije svrhe.

A.-J. Balard je 1826 otkrio brom kad je (u nastojanju da izolira jod) uvodio klor u vodenu otopinu pepela nekih morskih biljaka ili u matični lug koji zaostaje nakon dobivanja soli iz morske vode. Bolje reći, Balard je prvi uočio i dokazao da tako dobivena mrka tekućina predstavlja dotada nepoznat element, jer je prije njega nekoliko istraživača imalo u rukama brom, a da nisu uočili njegovu prirodu. Tako je nekoliko godina prije Balarda Liebig na isti način kao i on dobio brom iz matičnog luga kemijske fabrike u Salzhausenu, koja je preradivala vodu slanih izvora u Kreuznachu, ali mu nije poklonio pažnju, smatrajući da je to klorid joda. C. Löwig je iste godine kao i Balard, a iz istog izvora kao Liebig, dobio brom i ispitivao ga, ali očito nije na vrijeme uspio dokazati njegovu elementarnu prirodu. Po prijedlogu Vauquelina, Thenarda i Gay-Lussaca, Balard je novootkrivenom elementu dao ime prema grč. βρωμιος bromos smrad. Prvi postupak za industrijsku proizvodnju broma izradio je A. Frank (oko 1860). God. 1921 otkrili su Th. Midgley i njegovi saradnici da etilendibromid dodat benzinu koji sadržava tetraetilolovo kao antidetonator sprečava taloženje olova u cilindru motora; to je otkriće mnogostruko povećalo potražnju za bromom i obim njegove proizvodnje.

Jedini minerali koji sadrže brom kao bitnu sastojinu jesu neki rijetki halogenidi srebra, kao bromirit AgBr, embolit Ag(Cl,Br) i jodobromit 2AgCl · 2AgBr · AgI. U naslagama soli nastalima isušivanjem mora, npr. u Elzasu (Francuska) i kraj Stassfurta u Njemačkoj, brom se koncentrira u lakše topljivim solima, zamjenjujući izomorfno klor u karnalitu KCl · MgCl₂ · 6H₂O, tahihidritu 2MgCl₂ · CaCl₂ · 12H₂O i bišofitu MgCl₂ · 6H₂O.

Prirodni brom smjesa je približno jednakih količina dvaju stabilnih izotopa, ⁷⁹Br i ⁸¹Br. Elektronska je konfiguracija spoljne ljuske bromova atoma 4s²4p⁵, pa se on u periodnom sistemu elemenata nalazi u grupi VII (halogeni: F, Cl, Br, J, At). Najstabilnija valentna stanja su mu -1 (bromidi) i +5 (bromati). Spojevi s valentnim stanjem +1 (hipobromiti) manje su postojani nego odgovarajući spojevi klora. Postojanje spojeva s valentnim stanjem -3 (bromiti) ne smatraju svi autori dokazanim. U skladu s položajem u periodnom sistemu elemenata, karakteristike elementarnog broma i bromovih spojeva nalaze se između odgovarajućih karakteristika za klor i za jod.

ELEMENTARNI BROM

Osobine elementarnog broma. Elementarni brom je u običnim uvjetima teška tekućina (d_4^{25} 3,1055) oštra i intenzivna vonja, u odbijenom svjetlu tamnoljubičaste, skoro crne, u prolaznom svjetlu tamnocrvene boje. Pod normalnim pritiskom ključa na 58,8 °C i pretvara se u žutomrku paru koja se sastoji od molekula Br₂ (kao i tekućina); još na 1284 °C samo je 18,3% molekula disocirano na atome Br. Na -7,32 °C tekućina očvrstne u svijetlo-crvenu masu sa slabim metalnim sjajem, $d \sim 3,4$, koja na -252 °C postaje bezbojna. Kritična mu je temperatura 311 °C, kritični pritisak 102 at; latentna toplota taljenja 16,14 cal/g, latentna toplota isparivanja 44,8 cal/g; srednji atomski toplinski kapacitet tekućeg broma (između 13 i 45 °C) iznosi 8,6, čvrstog (između -192 i -108 °C) 5,6 cal/g-atom °C. Linearni koeficijent toplinskog rastezanja broma u temperaturnom intervalu 0-30 °C iznosi $11 \cdot 10^{-4}$, specifični električki otpor čvrstog broma je $< 10^8 \Omega \text{ cm}$.

Brom se u svakom omjeru miješa s alkoholom, eterom, benzenom, kloroformom, ugljik-disulfidom, tetraklormetanom, ledenom oćenom kiselinom, etilen-dibromidom, nitrobenzenom, titan-tetrakloridom, fosfor-oksikloridom. U 100 g vode otapa se na 20 °C 3,41 g broma; zasićena otopina, tekućina žutomrke boje, zove se bromna voda. U prisutnosti bromida topljivost broma u vodi silno poraste; sa 48%tnom bromovodičnom kiselinom brom se miješa u svakom omjeru. Topljivost vode u bromu je ~ 0,05%. Iz zasićene vodene otopine taloži se pri ohlađenju ispod 5,84 °C hidrat broma Br₂ · 8H₂O u obliku crvenih oktaedarskih kristala. Brom je slabo topljiv u 95%tnoj sumpornoj i 85%tnoj fosfornoj kiselini.

Kemijsko ponašanje elementarnog broma karakterizirano je, u općem smislu, njegovim svojstvima kao oksidant. I u tom pogledu on se nalazi između klora i joda, pa stoga može klor da ga istiskuje iz bromnih spojeva, a on sam istiskuje iz jodnih spojeva elementarni jod. Upoređenjem oksidacijskih potencijala može se zaključiti da je elementarni brom jači oksidant nego trovalentno željezo ili razrijeđena dušična kiselina, a slabiji nego kisik ili cer-sulfat, ali u nekim slučajevima brom djeluje jače oksidativno nego kisik, pa čak i nego klor, s obzirom na to da nastaju sekundarne reakcije i da pri oksidaciji bromom može biti brzina reakcije veća.

S vodikom brom se u plinovitom stanju direktno spaja na povišenoj temperaturi, pod djelovanjem katalizatora i u polju tihog električnog izbijanja. Ako se plinovi pomiješaju u stehiometrijskom omjeru i zapale, oni se spajaju eksplozivno; reakcija se odvija glatko i kontinuirano ako struja plinovitog broma sagorijeva u atmosferi vodika. Brom se direktno spaja i s nekim nemetalima: suhi sumpor daje sumpor-monobromid S₂Br₂, selen i telur daju po dva produkta: SeBr₂ i SeBr₄, TeBr₂ (nestabilan) i TeBr₄. Reakcije s fosforom (produkti PBr₃ i PBr₅) i arsenom (produkt: AsBr₃) vrlo su burne ako se provode među čistim elementarnim tvarima, mirno se odvijaju ako se struja bromovih para uvodi u otopinu drugog elementa u njegovu tribromidu. Na suhom aktivnom ugljenu brom se adsorbira bez reakcije; u nazočnosti vlage ugljik se djelomično oksidira, a brom se reducira na bromovodik (hidrogen-bromid). Mnogi se metali spajaju direktno s bromom. U odsutnosti vode na nekim se metalima (željezu, cinku, bizmutu, kalcijumu, litijumu, natrijumu) vjerovatno obrazuje neprekinut sloj bromida koji ih zaštićuje od daljeg djelovanja broma. Tako je natrijum otporan prema suhom bromu i na 300 °C jer mu se pri spajanju s bromom povećava volum, pa nastali spoj bromida ostaje neprekinut; kalijum, naprotiv, kojemu bromid ima manji volum nego metal od kojeg je nastao, pa ga