

Stuttgart 1948. — Ф. Ф. Губин, Гидроэлектрические станции, Москва-Ленинград 1949. — Р. Җ. Potter, Steam power plants, New York 1949. — D. Pavel, Hidroenergetika generala, Бусарећи 1951. — Е. Р. Сираков, Насосно-аккумулирующие гидроэлектростанции и их применение в энергосистеме, Ленинград-Москва 1952. — G. A. Gaffert, Steam power stations, New York 1952. — A. Roggendorf, Der Eigenbedarf mittlerer und großer Kraftwerke, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1952. — Г. М. Гольденберг, Гидроаккумулирующие электрические станции, Москва-Ленинград 1955. — W. H. Severns, H. E. Degler, J. C. Miles, Steam, air, and gas power, New York 1954. — Җ. Селбелка, Ууузітте водней еnergie, Bratislava 1954. — В. Н. Юренин, А. А. Лаговский (ред.), Тепловые электрические станции, Москва-Ленинград 1956. — A. S. Thompson, O. E. Rodgers, Thermal power from nuclear reactors, New York 1956. — Л. И. Керцелли, В. Я. Рожкин, Тепловые электрические станции, Москва-Ленинград 1956. — H. Goerke, Dampfkraftwerke, München 1956. — M. Mainardis, Centrali elettriche, Milano 1957. — E. Mosonyi, Wasserkraftwerke, 2 Bde, Budapest 1956/59, (i na engleskom: Water power development, Budapest 1957). — Л. Б. Бернштейн, Приливные электростанции в современной энергетике, Москва-Ленинград 1961. — H. Požar, Betrieb von Elektrizitätswerken, Berlin-Heidelberg-New York 1961. — H. Požar, Leistung und Energie in Verbundsystemen, Wien 1963. — N. Buchhold, H. Happold, Elektrische Kraftwerke und Netze, Berlin-Heidelberg-New York 1963. — H. Witte (Herausg.), Handbuch der Energiewirtschaft, Bd. I: Projektierung und Betrieb der Ausrüstung von Wärmekraftwerken, Leipzig 1965. — Җ. Mihajlov, Termoelektrane, Zagreb 1965. — K. Schröder, Große Dampfkraftwerke, 3 Bde, Berlin-Heidelberg-New York 1959/62/66. — L. Musil, K. Knizia, Die Gesamtplanung von Dampfkraftwerken, Bd. I: Die Thermodynamik des Dampfkraftprozesses, Berlin-Heidelberg-New York 1966. — Г. И. Михалин, Эксплуатация дизельных электрических станций, Москва 1968. H. Požar

ELEKTRICITET, STATIČKI, električni naboji u mirovanju, smješteni na prikladnim tijelima. Razlikuje se od dinamičkog elektriciteta (električne struje) po tome što se zadržava samo na površini tijela i što ga ne prate magnetske, kemijske ni toplinske pojave. Tipični su za statički elektricitet često vrlo visoki naponi (i do više stotina milijuna volti) uz razmjerno male količine elektriciteta.

OSNOVE STATIČKOG ELEKTRICITETA

Svaki atom materije sadrži određen broj pozitivno nabijenih čestica (protona) i negativnih elementarnih naboja (elektrona). Ako neko tijelo nije elektrizirano, broj protona u njemu jednak je broju elektrona i oni su unutar atomâ tog tijela u ravnoteži. Za takva tijela kaže se da su električki neutralna. Od elektrona u električnim vodičima (npr. metalima) neki mogu napustiti atomski sistem i preći na druge atome ili molekule. Atomi ili molekule koje su elektroni napustili, tj. kojima nedostaju elektroni, nazivaju se pozitivnim ionima, a oni na koje su elektroni prešli, tj. u kojima pretilu elektroni, negativnim ionima. Prema tome postoje dvije vrste elektriciteta ili elektrike: *pozitivni elektricitet* sačinjavaju pozitivni ioni, a *negativni elektricitet* negativni ioni i slobodni elektroni. Za tijelo u kojemu pretilu ili nedostaju elektroni kaže se da je negativno odn. pozitivno nabijeno ili elektrizirano. Elektricitet u mirovanju (a ne električna struja) naziva se *električnim nabojem*. Po pravilu elektricitet je vezan za materiju; samo negativni elektricitet u obliku elektrona može ponekad biti neovisan o materiji i lebdjeti poput oblaka u nekom prostoru (*prostorni naboj*). Veličina naboja (*količina elektriciteta*, električno opterećenje) nekog elektriziranog tijela ovisi o broju elektrona koji na njemu pretilu ili nedostaju; u mjernom sistemu MKSA mjeri se u kulonima (coulombima, C): $1 \text{ C} = 1 \text{ As}$ (ampersekunda). Naboj jednog elektrona naziva se elementarnim nabojem, on iznosi $e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Svaki drugi naboj može biti jednak samo nekom mnogokratniku elementarnog naboja (v. *Elektrotehnika, osnove*).

Električni naboji istog predznaka (istoimeni, pozitivni ili negativni) među sobom se odbijaju, električni naboji različitog predznaka (raznoimeni, pozitivni i negativni) privlače se.

Električno polje

Električno polje je prostor oko električnog naboja (ili više njih) u kome se pojavljuju električne pojave kao što su npr. odbojno ili privlačno djelovanje na električne naboje, influencija i polarizacija.

Pojam električnog polja uveo je J. C. Maxwell 1873. Do onda su pojave privlačenja i odbijanja dviju odvojenih količina elektriciteta smatrale osnovnim ishodištem znanja o elektricitetu i smatrale su se posljedicom djelovanja električne sile na daljinu, analogno djelovanju gravitacije prema Newtonu.

Električno polje postoji jednako oko vodljivih i nevodljivih tijela na kojima se nalaze električni naboji (statički elektricitet) kao i oko vodiča kroz koje teče električna struja (dinamički elektricitet). Električno polje može postojati u vakuumu, u plinovitim, tekućim i čvrstim nevodljivim tvarima (*dielektricima*), a u unutrašnjosti

vodiča samo ako kroz njih protječe struja, dok ga u unutrašnjosti vodiča i vodljivih tijela (*elektroda*) koja nose statički naboj nema.

Električno polje karakterizirano je dvama vektorima: jakošću električnog polja \vec{E} i elektrostatičkom indukcijom \vec{D} .

Jakost električnog polja (E) je veličina proporcionalna sili \vec{F} kojom električno polje djeluje na naboj Q kad se ovaj unese u njega. E je vektorska veličina, njezin u prostoru određen smjer poklapa se sa smjerom djelovanja sile:

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E}, \text{ tj. } \vec{E} = \vec{F}/Q. \quad (1)$$

U *elektrostatičkom polju*, tj. u električnom polju koje potječe od mirujućih (elektrostatičkih) naboja, jakost se polja (koja je stalno jednaka) može prikazati i kao negativni gradijent jedne skalarne funkcije V koja se naziva *električnim potencijalom* polja:

$$\vec{E} = - \frac{\partial V}{\partial l} = - \text{grad } V. \quad (2)$$

Električni potencijal u određenoj tački elektrostatičkog polja jednak je radu koji je potreban da se jedinični naboj dovede iz beskonačnosti u tu tačku polja, prevladavajući silu koja na taj naboj djeluje. Svaka tačka mirujućeg električnog polja ima dakle određeni električni potencijal. Tačke jednakih potencijala leže na tzv. *ekvipotencijalnim plohama*.

Apsolutne se vrijednosti potencijala ne mogu mjeriti, nego samo vrijednosti razlike potencijala među dvjema tačkama. *Razlika potencijala* $V_1 - V_2$ između dviju tačaka električnog polja predstavlja rad koji je potreban da se jedinični naboj premjesti iz tačke s potencijalom V_1 u tačku s potencijalom V_2 . Razlika potencijala izražava se naponom koji vlada između tih dviju tačaka električnog polja. Uz primjenu pogodnih sondi taj se napon može mjeriti na isti način kao napon između dva vodiča. Ako se potencijalu V_2 proizvoljno pripíše potencijal nula (obično se kao nulti potencijal uzima potencijal zemlje), mjereni napon između neke tačke u polju i jedne tačke s uslovnim nultim potencijalom predstavlja uslovnu vrijednost potencijala u datoj tački električnog polja. Pod potencijalom neke tačke u električnom polju obično se razumijeva, prema tome, napon te tačke prema zemlji.

Da se u električnom polju prenese naboj iz tačke s potencijalom V_1 u tačku s potencijalom V_2 koja se nalazi na udaljenosti l (mjereno duž linije djelovanja sile \vec{F} među tačkama) treba utrošiti mehanički rad W jednak umnošku sile \vec{F} i puta l :

$$W = \vec{F} \int dl. \quad (3)$$

Uvrsti li se \vec{F} iz jedn. (1), dobije se:

$$W = Q \int \vec{E} \int dl. \quad (4)$$

Izraz $\vec{E} \int dl$ jednak je razlici potencijala između tačaka s potencijalima V_1 i V_2 , tj. naponu koji vlada između tih tačaka:

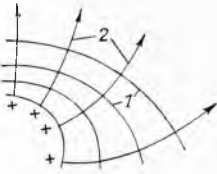
$$U_{12} = V_1 - V_2 = \vec{E} \int dl. \quad (5)$$

Potencijali i razlike potencijala mjere se, dakle, u jedinicama napona, u sistemu mjera MKSA u voltima V. Jakost polja, prema definicijskoj jednadžbi (2), mjeri se u sistemu mjera MKSA u voltima po metru (V/m).

Električni tok. Prema današnjem shvaćanju o električnom polju, o naboju Q govori se samo kad je riječ o naboju elektrode, a u polju se naboj Q nadomješta veličinom koja se zove električni tok ψ ; za nj se pretpostavlja da izlazi iz elektrode s pozitivnim nabojem, prolazi kroz dielektrik i završava na elektrodi s negativnim nabojem, analogno magnetskom toku Φ kroz feromagnetski materijal. Na samoj površini elektrode je $\psi = Q$. Električni se tok, kao i naboj, mjeri u kulonima (C).

Grafički prikaz električnog polja. Grafički se električno polje prikazuje dvodimenzijски ekvipotencijalnim linijama i električnim silnicama. *Ekvipotencijalne linije* predstavljaju presjeke ekvipotencijalnih ploha s prikladnom ravninom kojom je električno polje presječeno (sl. 1). *Električne silnice* (linije sile) su u prostoru zamišljene crte čije tangente u svim tačkama pokazuju smjer djelovanja

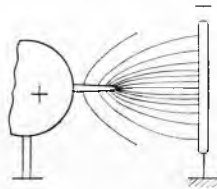
električne sile i okomite su na ekvipotencijalne plohe. Električne silnice izlaze iz pozitivnog naboja i završavaju na negativnom naboju. Za razliku od magnetskih silnica, one pod normalnim uvjetima nisu zatvorene krivulje. Kao smjer električnih silnica uzima se smjer od pozitivnog prema negativnom naboju. Veća ili manja jakost polja prikazuje se u grafičkom prikazu većim ili manjim brojem silnica na istoj površini. Da bi se vidio njihov međusobni položaj, ucrtane su u sl. 1 za istu presječnu ravninu ekvipotencijalne linije i električne silnice.



Sl. 1. Grafičko prikazivanje električnog polja. 1. Ekvipotencijalne linije, 2. električne silnice

U nevodljivim materijalima (npr. u izolatorima) može se jakost polja povećati samo do određene granice, koja se naziva *probojnom čvrstoćom* izolacionog materijala i izražava se u praksi obično u kilovoltima po centimetru (kV/cm). Ako se ta granica prekorači, dolazi pri tzv. probojnom naponu, zbog ioniziranja ili zagrijavanja, do proboja dielektrika, tj. stvara se vodljiva staza kojom poteče struja.

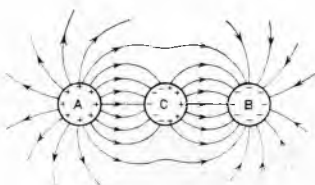
Na istoj se pojavi osniva *djelovanje šiljaka*. U neposrednoj blizini šiljka postavljenog na nekoj nabijenoj elektrodi dolazi do zbijanja električnog polja i u vezi s time do znatnog povećanja njegove jakosti, kako to prikazuje sl. 2. Uslijed povećane jakosti polja u blizini šiljka ranije se prekorači probojna čvrstoća zraka, tako da i pri nižim potencijalima elektrode dolazi do izbijanja elektrode, tj. do pražnjenja koronom, a ako se u blizini nalazi druga elektroda, i do izbijanja iskrom. Djelovanje šiljaka upotrebljava se npr. za pražnjenje nabijenih tijela na kojima je naboj nepoželjan.



Sl. 2. Zbijanje silnica u blizini šiljka

Influencija i polarizacija. Druga karakteristična veličina električnog polja je električna indukcija. S obzirom na to da ova veličina karakterizira sposobnost električnog polja da influencijom stvara naboje u vodljivim tijelima i da vrši polarizaciju dielektrika, u nastavku bit će najprije riječ o tim pojavama.

Influencija. Ako se u električno polje, npr. između dvije raznoimeno nabijene elektrode A i B (sl. 3), unese nenabijeno i od zemlje izolirano tijelo C od vodljivog materijala, dio elektrona koji se mogu na njemu slobodno kretati skupit će se pod utjecajem električnog polja na površini one strane koja leži nasuprot pozitivno nabijenoj elektrodi, a pozitivni ioni (pozitivni naboj) pojavit će se na suprotnoj strani. Jakost polja u unutrašnjosti tijela u tom je slučaju jednaka nuli, a i na površini



Sl. 3. Pojava influencije

ne postoji nikakva komponenta električnog polja, tako da površina takvog tijela predstavlja ekvipotencijalnu plohu. Ako je tijelo prije nego je unijeto u električno polje bilo električki neutralno, bit će suma pozitivnih i negativnih razdvojenih naboja na tijelu jednaka nuli. Razdvajanje naboja suprotnih predznaka na vodljivom tijelu u električnom polju zove se *influencija*. Zbog influencije se osnovno električno polje deformira, a jakost polja pri površini vodljivog tijela postaje veća nego u osnovnom polju. Na sl. 3, koja zorno prikazuje takvo električno polje, izgleda kao da tijelo privlači električne silnice. Influencijom mogu se tijela i za stalno elektrizirati; o tome će biti govora kasnije.

Polarizacija. U nevodljivim tvarima normalno nema slobodnih elektrona. Ako se takvi materijali unesu u električno polje, u njima se prema tome ne mogu influencijom razdvajati raznoimeno naboje, već umjesto toga može doći samo do određene razmještanja naboja unutar atoma i molekula, do stvaranja i/ili poravnana dipola, tzv. polarizacije.

Ova se pojava tumači atomističkom strukturom materije. Pod utjecajem vanjskog električnog polja putanje elektrona koji kruže oko jezgre atoma razvuku

se na stranu suprotnu smjeru vanjskog polja, a jezgre premjeste u smjeru polja. Tako svaki atom postaje nosilac dvaju jednakih naboja elektriciteta suprotnih predznaka, koji su naboji jedan od drugog nešto razmaknuti, tvoreći tzv. dipole. Zbog toga takvi atomi prema vani više nisu neutralni, ukoliko se posmatraju iz neposredne blizine, a u svojoj su unutrašnjosti elastički napregnuti. Ova se pojava naziva *polarizacijom elektrona*. Neke tvari su i izvan električnog polja polarne, tj. njihove asimetrične molekule predstavljaju dipole i ti se dipoli pod utjecajem toplinskog kretanja nalaze u nesređenom stanju. Ako se takve tvari unesu u električno polje, dolazi do poravnavanja tih dipola, tj. do tzv. *dipolne polarizacije*. Polarizacijom elektrona ili dipolnom polarizacijom stvoreni dipolni momenti drže ravnotežu vanjskom električnom polju.

Ukupni dipolni moment po jedinici površine presjeka električnog polja (okomito na silnice) naziva se *polarizacijom* \vec{P} . To je vektorska veličina proporcionalna jakosti polja \vec{E} i ona predstavlja pojačanje električnog polja u odnosu na vakuum. Polarizacija se u sistemu MKSA izražava u kulonima po kvadratnom metru (C/m^2).

Električna indukcija (\vec{D}). Za veličinu influencirajućeg djelovanja i nekih drugih pojava u električnom polju nije mjerodavna samo jakost električnog polja \vec{E} nego i priroda dielektrika. Da bi se obuhvatio i taj utjecaj, uvedena je još jedna za električno polje karakteristična veličina, *električna indukcija* ili *gustoća dielektričnog pomaka* \vec{D} . To je vektorska veličina koja predstavlja influencijom stvoren naboj na jedinici površine presjeka električnog polja. Električna indukcija može se predstaviti također kao gustoća električnog toka ψ , tj. kao tok po jedinici površine A ravnine koja je položena okomito na smjer toka. Električna indukcija definirana je dakle jednadžbom:

$$\psi = \vec{D} A \text{ ili } \vec{D} = \psi/A, \quad (6)$$

Kako je naprijed rečeno, električni tok ψ na samoj je površini elektrode jednak naboju: $\psi = Q$. Prema tome je električna indukcija jednaka površinskoj gustoći naboja σ :

$$\vec{D} = \frac{\psi}{A} = \frac{Q}{A} = \sigma.$$

Ako se u električno polje, npr. polje koje postoji između dvije raznoimene elektrode priključene na izvor istosmjernog električnog napona, unese vodljivo tijelo, može se mjerenjem utvrditi da se je na tom tijelu pojavio određen naboj. Izvede li se taj pokus najprije u vakuumu (ili zraku), a zatim u nekom dielektrikumu (npr. u ulju), izmjerena količina influencijom stvorenog elektriciteta bit će u prvom slučaju manja nego u drugom, mada je napon na elektrodama bio u oba slučaja isti. Zbog toga bit će i električna indukcija (tj. naboj po jedinici površine presjeka polja) \vec{D}_0 u prvom slučaju manja od indukcije \vec{D} u drugom slučaju.

Električna indukcija \vec{D} proporcionalna je jakosti električnog polja \vec{E} ; između njih postoji odnos:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}. \quad (7)$$

U ovom osnovnom zakonu elektrostatike faktor proporcionalnosti ϵ zove se *dielektričnost* (dielektrična konstanta). On predstavlja umnožak dviju veličina: *influencione konstante* ϵ_0 i *relativne dielektričnosti* ϵ_r :

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r. \quad (8)$$

U sistemu MKSA influenciona je konstanta $\epsilon_0 = 8,859 \cdot 10^{-12}$ As/Vm = F/m (farada po metru). Ova konstanta kazuje kolika je električna indukcija u vakuumu pri jakosti električnog polja 1 V/m. Prema tome je:

$$\vec{D}_0 = \epsilon_0 \vec{E}. \quad (9)$$

Relativna dielektričnost ϵ_r je bezdimenzijski broj koji ovisi o materijalu medija (dielektrika) i kojim se označava koliko je puta veća indukcija u dielektriku nego u vakuumu:

$$\vec{D} = \epsilon_r \vec{D}_0. \quad (10)$$

Relativna dielektričnost ϵ_r iznosi za većinu materijala do 10, u nekim keramičkim masama do 100, a u nekim specijalnim materijalima (npr. barijum-titanatu) do 10 000.

Kako je u vakuumu $\epsilon = \epsilon_0$, to se ϵ_0 zove i dielektričnost vakuumu.

Razlika između električne indukcije u vakuumu \vec{D}_0 i indukcije u nekom mediju (npr. ulju) \vec{D} tumači se pojavom polarizacije.

Zbog toga se ponekada (naročito u teoretskoj fizici) povećana indukcija u dielektrcima ne izražava pomoću relativne dielektričnosti ϵ_r , već se u osnovni zakon o statičkom elektricitetu (7) uvrštava polarizacija kao dodatna indukcija. Razlika između indukcije u nekom mediju \vec{D} i indukcije u vakuumu \vec{D}_0 jednaka je naime polarizaciji:

$$\vec{D} - \vec{D}_0 = \vec{P} \quad \text{ili} \quad \vec{D} = \vec{D}_0 + \vec{P}. \quad (11)$$

Ako se u ovu jednadžbu uvrsti izraz (9), dobiva se:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}. \quad (12)$$

Prema tome je:

$$\vec{P} = \vec{D} - \epsilon_0 \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} - \epsilon_0 \vec{E} = \epsilon_0 E (\epsilon_r - 1) \quad \text{i} \quad P = \xi \epsilon_0 E, \quad (13)$$

gdje se izraz $\xi = \epsilon_r - 1$ zove *električna susceptibilnost*.

Kapacitet. Kondenzator je naprava sastavljena od dvije metalne elektrode koje su jedna od druge izolirane. Ako se obje elektrode priključe na istosmjerni izvor napona U , kondenzator će se nakon kratkog vremena napuniti (nabiti) određenom količinom elektriciteta Q koja će ostati na njemu i nakon isključenja izvora. Naboj Q koji se skupio na kondenzatoru proporcionalan je naponu U , što je izraženo jednadžbom:

$$Q = C U, \quad (14)$$

u kojoj je C faktor proporcionalnosti nazvan *kapacitetom*. Veličina kapaciteta ovisi o obliku, dimenzijama i razmaku elektroda, kao i o dielektrikumu među njima. Kondenzatori mogu imati različite oblike. Pločasti kondenzator, npr., koji se sastoji svega od dvije paralelne metalne ploče, ima kapacitet

$$C = \frac{\epsilon A}{d}, \quad (15)$$

gdje A znači površinu ploča, d razmak među njima, a ϵ dielektričnost. Kapacitet se mjeri faradima (F).

Jakost polja i indukcija u dielektriku kondenzatora proporcionalni su naponu U .

Kao što postoji kapacitet između dva obloga kondenzatora, tako on postoji i između drugih nosilaca statičkih naboja ili između nosioca i zemlje.

Rad i energija u električnom polju. Za nabijanje kondenzatora potrebna je određena energija koja se oduzima izvoru. Ta energija ostaje na kondenzatoru kao potencijalna energija i nakon isključenja izvora. Ona iznosi:

$$W = \frac{Q U}{2} = \frac{1}{2} C U^2 \quad (16)$$

(ako se za Q uvrsti izraz 14). Nosilac te energije je električno polje koje se pojavljuje čim se pojavi napon.

Za svako pomicanje naboja u električnom polju, u pravcu silnica, potreban je određen rad. Ako rad vrši električno polje, npr. privlačenjem nekog nabijenog ili nenabijenog tijela, taj rad ide na račun tog polja. Ako se, pak, tijelo s nabojem pomakne u polju za dužinu l zbog djelovanja neke vanjske mehaničke sile F , rad vrši ta sila ($W = Fl$). Ako se za primjer uzme opet izraz (15) za pločasti kondenzator čiji kapacitet iznosi $C = \epsilon A/d$, vidi se da se razmicanjem ploča, tj. povećanjem razmaka d za n puta, smanjuje njegov kapacitet C na n -ti dio, tj. na C/n . Tako će se i pri svakom razmicanju nosilaca naboja smanjiti njihov kapacitet. Ako se u toku tog događaja naboj Q nije promijenio, a smanjio se kapacitet, mora se prema izrazu (14) zbog rastezanja polja povećati napon za n puta jer je:

$$Q = \frac{C}{n} n U. \quad (17a)$$

Prema (16) iznosi električna energija smještena u kondenzatoru prije razmicanja njegovih elektroda: $W_1 = \frac{1}{2} C U^2$. Nakon razmicanja i nakon što se zbog toga povećao napon za n puta povećat će se i energija u kondenzatoru i iznositi će:

$$W_2 = \frac{1}{2} \frac{C}{n} (n U)^2 = n \frac{1}{2} C U^2 = n W_1. \quad (17b)$$

U ovom slučaju energija povećala se za n puta jer je izvršena konverzija mehaničke energije (utrošene za razmicanje) u električnu

energiju. Ova se pojava javlja vrlo često u proizvodnji i u prirodi, a uzrokom je stvaranja elektrostatičkih naboja vrlo visokih napona.

Sile u električnom polju. Na površini zamišljene kugle s radijusom r i središtem u naboju Q_1 indukcija iznosi $\vec{D}_1 = \psi_1/A$, gdje je $A = 4 r^2 \pi$. Kako između \vec{D}_1 i jakosti polja \vec{E}_1 postoji prema izrazu (9) u većini slučajeva linearni odnos: $\vec{D}_1 = \epsilon \vec{E}_1$, to će jakost polja (prema 6 a) na udaljenosti r od naboja Q_1 iznositi:

$$E_1 = \frac{D_1}{\epsilon} = \frac{\psi_1}{\epsilon A} = \frac{Q_1}{4 \pi \epsilon r^2}. \quad (18)$$

Stavi li se u isto polje još i druga količina elektriciteta Q_2 , djelovat će polje na tu količinu, prema izrazu (1), silom $\vec{F} = \vec{E}_1 Q_2$, pa iz toga izlazi:

$$F = E_1 Q_2 = \frac{Q_1 Q_2}{4 \pi \epsilon r^2} = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}, \quad (19)$$

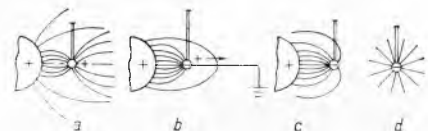
gdje k znači faktor proporcionalnosti. To je tzv. Priestley-Coulombov zakon, iz kojeg proizlazi da se dva istoimena naboja odbijaju, a dva raznoimena privlače silom F koja je upravo proporcionalna veličini naboja i obratno proporcionalna kvadratu razmaka među njima.

Stvaranje statičkog elektriciteta

Statički elektricitet može nastati na tri načina: a) ako se dvije međusobno izolirane elektrode priključe na izvor istosmjernog napona, b) ako se dvije različite tvari jedna o drugu taru i onda razdvoje i c) električnom influencijom. Ako se dvije međusobno izolirane elektrode (npr. kondenzator kapaciteta C) priključe na izvor istosmjernog napona U , na njima će se skupiti, prema (14), električni naboj: $Q = C U$ i tu ostati i nakon prekida veze s izvorom.

Ako se dvije različite tvari (dvije nevodljive ili jedna vodljiva i druga nevodljiva) približe trenjem jedna drugoj na razmak reda veličine dimenzije molekula (10^{-8} cm), dolazi do djelovanja među električnim nabojima njihovih atoma i do stvaranja tzv. kontaktnog napona. Električno polje između atomskih naboja u tom je slučaju toliko jako da dolazi do čupanja i privlačenja elektrona i iz nevodljivih tvari. Pri tome elektroni izlaze iz onih tvari u kojima je za izlazak elektrona potreban manji rad, i one se pri tome nabijaju pozitivno. Materijali se razvrstavaju prema sposobnosti stvaranja elektriciteta u red u kojemu veću sposobnost imaju mahom tijela s većom relativnom dielektričnošću ϵ_r . Ako se pod utjecajem neke vanjske mehaničke sile (npr. djelovanja nekog stroja u proizvodnji) pomenute dvije tvari opet razdvoje i naboji time jedni od drugih udaljuju, troši se na ovo određeno mehanički rad. Kako se pri tome količine elektriciteta ne mijenjaju, ali smanjuje kapacitet i električno polje rasteže, dolazi prema izrazima (14) i (17 b) do povišenja napona i do povećanja električne energije na račun utrošenog mehaničkog rada. Prilikom takvih postupaka naponi mogu postići i više desetaka hiljada volti (v. tabl. 1), što može izazvati pražnjenje iskrum. Većina električnih naboja u svakodnevnoj praksi nastaje zbog trenja, udaranja ili stiskanja različitih materijala i njihovog naknadnog razdvajanja.

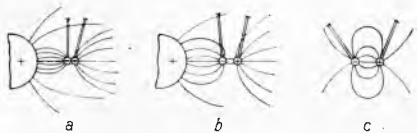
Do stvaranja stalnog naboja i trajnog elektriziranja nekog vodljivog i od zemlje izoliranog tijela influencijom dolazi ako se



Sl. 4. Nabijanje tijela influencijom uzemljenjem elektrode. a) Unošenje elektrode u polje nabijenog tijela, b) odvođenje drugog (razdvojenog) naboja u zemlju, c) na elektrodi postoji još samo jedan naboj koji (d) ostaje na njoj i ako se ona iz polja izvuče

nakon razdvajanja naboja pod utjecajem električnog polja jedan od oba naboja odvede ili neutralizira, npr. kratkotrajnim spajanjem tog tijela sa zemljom, kao što je prikazano na slikama 4 a...d. Isto tako, ako se vodljiva elektroda koja je sastavljena od dva dijela nakon razdvajanja naboja rastavi na ta dva dijela, na oba dijela

ostat će jednaki naboji suprotna predznaka, koji ne nestaju ni nakon nestanka ili promjene jakosti polja (sl. 5 a--e). Ove pojave,



Sl. 5. Nabijanje tijela influencijom razdvajanjem elektrode na dva dijela. a) Unosjenje spojenih elektroda, b) njihovo razdvajanje, c) obje imaju jednak naboj ali suprotnog predznaka

koje se iskorišćavaju u strojevima za elektriziranje i generatorima visokih napona (v. Elektrostatski generator u članku *Akceleratori nuklearnih čestica*, TE 1, str. 40), također su u prirodi i tehnici uzrok stvaranja električnih naboj.

Faradayev kavez

Influencija može služiti i za zaštitu od električnih polja. Ako se naprave koje treba zaštititi od djelovanja električnih polja stave u šuplju metalnu posudu, na njezinoj će se površini doduše uslijed influencije pojaviti naboji, ali će u unutrašnjosti te posude jakost polja biti jednaka nuli. Umjesto posude može se upotrijebiti i kavez od vodljive metalne mreže (Faradayev kavez 1827, v. *Električna mjerenja*). Faradayevi kavez upotrebljavaju se za zaštitu osjetljivih mjernih aparatura od smetnji uslijed vanjskih električnih polja i pri zaštiti važnih objekata (npr. skladišta eksploziva) od groma i prenapona.

STATIČKI ELEKTRICITET U SVAKODNEVNOJ PRAKSI

Statički elektricitet koji se susreće u svakodnevnom životu, u tehnici i u prirodi može biti za život i praksu ponekad koristan a ponekad štetan. Koristan je kad se primjenjuje u proizvodnim procesima, npr. pri nanošenju premaza, pri odjeljivanju prašine i dima (v. *Čišćenje plinova*, str. 121), pri rastavljanju finoizmatih tvari, pri doradi tekstila (v. *Dorada tekstilnih proizvoda*, str. 386), pri obradi papira i dr. Na njegovu se djelovanje zasnivaju i električne leće, elektronski mikroskopi i generatori vrlo visokih napona. Međutim, njegova pojava je ponekad neugodna i štetna. Tako npr. statički elektricitet uzrokuje privlačenje električki nabijene prašine na fotografske filmove, gramofonske ploče i precizne mjerne aparate. Električna pražnjenja iskrom koja se javljaju često pri dodiru nabijenih tijela mogu postati uzročnikom požara ili eksplozije lakozapaljivih tvari. I udarac groma može izazvati ozljede, smrt, oštećenje objekata i požara, a na električnim vodovima, osim oštećenja, i prekid prenosa električne energije.

Pojava statičkog elektriciteta. Do elektrostatskih naboj dolazi u svakodnevnom životu i tehničkoj praksi zbog influencije a još češće zbog međusobnog trenja dviju različitih materija (od kojih jedna može biti i vodljiva, v. str. 582). Veći naboji i viši naponi postižu se ako je vodljiva materija dobro izolirana od zemlje.

Primjeri pojave statičkog elektriciteta mogu se lako naći u svakidašnjem životu; evo njih nekoliko.

Elektrostatski se nabiju tekstilna vlakna od perlona, najlona, vune, pamuka kada se podižu sa svojih podloga ili pri trenju s površinama u proizvodnji tekstila. Slične pojave nastaju i u preradi i proizvodnji papira, pri štampanju rotacionim strojem itd. Tu nastaju naboji jer se papir stalno rastavlja i rasteže a tlak između papira i strojeva mijenja. Naročito se to dešava ako se strojevi brzo okreću.

Jedan od vrlo važnih i opasnih slučajeva elektrostatskog naboj nastaje kod strujanja nevodljivih i zapaljivih tekućina. U praksi se najčešće nabijaju te tekućine pri strujanju kroz cijevi, pri izlazu iz cijevi, pipaca ili miaznica, a mogu se također nabiti i pri gibanju u spremnicima. U tim se slučajevima naboji jednog predznaka skupljaju na zidovima cijevi, spremišta itd., a naboji drugog predznaka otječu s tekućinom. Ako se nabijena tekućina umiri, nestaje naboj kroz relativno kratko vrijeme. Kao česti nosioci naboj u praksi su poznati eter, sumporouglik, benzol i benzin; teže se nabijaju esteri, ketoni i alkoholi. Količina elek-

triciteta koja se na takav način može skupiti ovisi o brzini strujanja i vodljivosti zidova cijevi, posude itd.

Naboj može nastati i kad plinovi izlaze pod tlakom, a sobom nose različita čvrsta ili tekuća onečišćenja, kao što su to čestice rđe, kapljice vode.

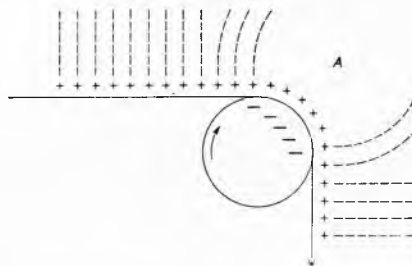
U praksi se često dešava da se i prah nabije statičkim elektricitetom, što može biti uzrok zapaljenja. Zapaljiv je naročito prah organskog porijekla, npr. brašno, prašina ugljena, gume, plastičnih masa, tekstilnih materijala, eksploziva i lijekova, ali mogu biti zapaljive i prašine anorganskog porijekla, npr. disperzije sumpora, magnezija, aluminijska itd. Čestice tih vrsta praha nabijaju se pri gibanju u proizvodnom procesu; pri mljevenju, drobljenju, miješanju, transportiranju u cijevima, prolazanju filtracionim uređajima i pakovanju. Neugodno je u naprijed iznjetim slučajevima upravo to što su prašine i plinovi koji se stvaraju pri proizvodnji ili pri transportu često i sami zapaljivi ili čak eksplozivni. U tim se slučajevima pojavljuju zapaljive i eksplozivne tvari u neposrednoj blizini izvora statičkog elektriciteta.

Do naboj može doći i na motornim vozilima kada se kreću na određenim podlogama. U tom se slučaju stvara napon između karoserije i zemlje.

Nabijaju se i metalni dijelovi na brzim drvenim čamcima, ako nisu uzemljeni, zbog trenja sa zrakom koji je pomiješan s morskom vodenom prašinom.

Avion koji leti kroz uzduh u kome ima čestica vode, snijega ili leda biva također nabijen, a veličina naboj zavisi od količine čestica i brzine letenja. Tom prilikom se postižu potencijali i do 10^6 V pa zbog toga dolazi na nekim oštrim ivicama do električnog izbijanja (korone).

Naboj može nastati pri odvajanju remena s remenice (sl. 6). U tom slučaju veličina skupljenog naboj ovisi o vodljivosti i



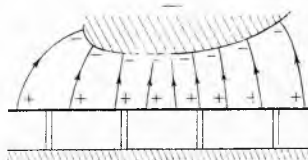
Sl. 6. Elektrostatski naboj pri kretanju nekog nevodljivog materijala preko valjka. A) prostor u kome ne postoji električno polje

brzini remena i remenice kao i o vrsti materijala od kojih su napravljeni. Naboj se javlja i pri odvajanju transportnih traka od valjaka koji im služe kao vodilice.

U bolnicama, posebno u operacionim dvoranama, može doći do neželjenog nabijanja gibanjem plahti i pokrivača na podlogama od gume ili plastičnih masa; nošenjem cipela s gumenim donovima; upotrebom nosila i stolova koji su prevučeni plastičnim prevlakama; strujanjem kisika i ugljične kiseline pod tlakom.

Statički naboj se javlja i na samim ljudima. Tako se npr. može pojaviti statički naboj na čovjeku koji ima cipele sa donovima od nevodljiva materijala, a hoda, recimo, po podu od plastične mase; isto tako pri drugim pokretima. Na čovjeku se javlja statički naboj i ako dolazi do trenja između njegove odjeće i rublja od vune ili sintetičkih vlakana. Do naboj može doći i povlačenjem češlja kroz kosu. Naboji izazvani influencijom opaženi su i na osobama pri radu na pogonskim uređajima pod visokim naponom.

Kao praktičan primjer stvaranja naboj influencijom može poslužiti dalekovod ili telekomunikacioni vod u kome je negativnom elektrikom nabijeni oblak influencijom izazvao pozitivni naboj (sl. 7). Ako takvo stanje potraje izvjesno vrijeme, suprotni će naboj (tj. negativni) zbog odvoda postepeno nestati u zemlju. U trenutku pražnjenja oblaka u drugi oblak ili zemlju



Sl. 7. Stvaranje električnog naboj u dalekovodu influencijom iz oblaka

znatna količina pozitivnog elektriciteta oslobodit će se na vodu. Ona izaziva u tom slučaju prenaponski val koji može oštetiti priključene električne uređaje, npr. transformatore, mada u vod izravno nije udario grom.

Visina napona koji se pojavljuje na različnim tijelima zbog statičkog elektriciteta može se sasvim općenito prema izrazu (14) izračunati iz formule: $U = Q/C$, gdje je U napon, Q naboj, a C kapacitet. Napon će biti veći ili manji u ovisnosti o mnogim faktorima, pa se radi ilustracije u tabl. 1 navodi nekoliko podataka dobivenih u praksi ili ispitivanjima.

Tablica 1
NAPONI KOJI MOGU NASTATI ELEKTROSTATIČKIM NABIJANJEM

Slučajevi nabijanja	Napon prema zemlji V
Čovjek koji hoda na gumenim potplatima	1 000
Vuna pri preradi	3 700
Sintetska vlakna pri preradi	9 000
Papir u strojevima za duboki tisak	80 000
Guma u strojevima za rezanje	150 000
Celuloid pri trenju	40 000
Pogonsko remenje pri brzini kretanja:	
3 m/s	25 000
10 m/s	50 000
15 m/s	80 000
Benzol pri strujanju kroz željeznu cijev pod 1,5 at	3 500
Benzin pri slobodnom padu	4 000
Plinovi pri strujanju iz plinskih boca	9 000

Iz izrazâ (17 a) i (18) vidi se da napon nije ovisan samo o naboju nastalom pri nabijanju već i o kapacitetu i njegovoj promjeni. Približavanjem nosilaca naboja kapacitet se naime povećava, a udaljavanjem smanjuje. Uz istu veličinu naboja Q se dakle pri smanjenju kapaciteta napon povećava. Ta je pojava značajna za prosuđivanje opasnosti od eksplozije. Kao što se vidi iz tablice, naponi nađeni u praksi ili određeni pokusima mogu katkada dosegnuti dosta visoku vrijednost.

Opasnost od statičkog elektriciteta. Statički elektricitet s kojim se susrećemo u svakodnevnom životu ne predstavlja direktnu opasnost za ljude jer je energija koju sadrže statički naboji obično vrlo mala, osim kod udara gromom. Međutim, statički elektricitet može postati opasan kad se okupljeni naboji izbijaju (neutraliziraju) putem iskre, koja može zapaliti ili dovesti do eksplozije zapaljive i eksplozivne smjese plinova, para i prašine. Izbijanje iskom može prouzročiti eksploziju zapaljivih plinova, para ili prašine samo ako se njihova koncentracija nalazi unutar granica eksplozivnosti i ako se kroz dovoljno dugo vrijeme zagriju na dovoljno visoku temperaturu (v. *Eksplozije u rudnicima*, str. 520), što ovisi najviše o tome da li iskra pri izbijanju prenosi dovoljno veliku energiju. Do sada su rezultati istraživanja o količini energije potrebnoj za paljenje veoma različiti. No zna se da najmanja količina energije koja može biti veći opasna iznosi $\sim 10^{-6}$ Ws. Za paljenje lako zapaljivih čvrstih tvari potrebna je veća količina energije, ali ako su te tvari usitnjene te imaju veliku površinu, kao npr. prašina, potrebna je manja količina energije za paljenje.

Pri izbijanju iskrom prenesena energija W može se izračunati po relaciji (16):

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{Q^2}{2C}, \quad (20)$$

gdje je C kapacitet, a U napon. Naboj, a pogotovo kapacitet, nije lako tačno odrediti. Kapacitet se približno izračunava time što se nabijena tijela svedu na jednostavne oblike, npr. kuglu ili ploču. Najgrublje računajući, kapacitet nekog tijela u pikofaradima procjenjuje se da iznosi polovinu njegove dužine u centimetrima (npr. kapacitet čovjeka se uzima da iznosi 100 pF).

Ona tijela koja dolaze u obzir za elektrostatičko nabijanje većinom su malog kapaciteta, pa prema tome mora biti napon dosta visok da bi moglo doći do paljenja. Iskustva u praksi pokazuju da do paljenja obično dolazi tek kad napon pređe 1000 V.

Kako su podaci o energiji paljenja oskudni i vrlo nesigurni, a kapaciteti i naboji mogu se odrediti samo približno, sve rezultate računa treba shvatiti samo kao grubu procjenu i oslanjati se na njih samo uz vrlo velik oprez.

Zaštitne mjere protiv statičkog elektriciteta. Da bi se mogle izbjeći smetnje i opasnosti, najvažnije je dokazati da uopće postoji naboj. To se može, istina, često primijetiti promatrajući privlačenje i odbijanje tvari koje se nabijaju, ali siguran dokaz da postoji naboj dobiva se upotrebom tinjalice, elektrostatičkim voltmetrom ili elektrometrom. Za vrijeme ispitivanja važno je da je nosilac instrumenta ili sam instrument uzemljen. Dobro je da nosilac instrumenta ima cijepel od vodljivog materijala i da stoji na podlozi koja je uzemljena.

Spomenutim instrumentima utvrđuje se *postojanje naboja* i veličina njegova napona, ali to nije dovoljno za procjenu da li postoji dovoljna energija za paljenje. Treba zato odgovarajućim instrumentima mjeriti i naboj. No ovdje treba opuzoriti na to da i ovakav način dobivanja podataka o veličini moguće energije paljenja treba primjenjivati oprezno jer su za mnoge tvari podaci o potrebnoj energiji paljenja nepoznati ili nesigurni.

Zbog teških posljedica koje mogu nastati uslijed požara ili eksplozije potrebno je i kod najmanje mogućnosti pojave energije izbijanja poduzeti *zaštitne mjere*. Ako se utvrdi da negdje postoji mogućnost elektrostatičkog nabijanja koje se ne može spriječiti, a u blizini ima lakozapaljivih plinova, para ili prašine, treba da se radi zaštite upotrijebi zatvorena aparatura i transport vrši u zatvorenom sistemu cijevi; da se upotrijebi zaštitni plin; da se prostorije zrače ili plinovi, pare i prašine odsisavaju, i to po mogućnosti na mjestu nastajanja ili na izlazu; da se zamijene, ako je moguće, lakozapaljive tvari teško zapaljivima ili nezapaljivima. Inače, po pravilu, treba poduzeti sve moguće mjere da se naboji ili spriječe, ili smanje, ili odvedu.

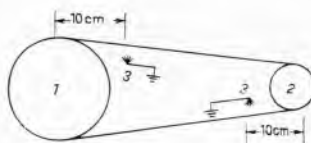
Mjere za *sprečavanje ili umanjavanje električnog nabijanja* obično smetaju procesu proizvodnje ali se u nekim slučajevima mogu primijeniti. Tlak valjaka, tlak udara prašinstih tvari, brzina traka papira, plastičnih masa i gume, brzina transportnih traka i brzina strujanja plinova treba da se održavaju ispod stanovitih granica, da bi se naboji smanjili. Gdje je to moguće, treba smanjiti trenje pogodnim oblikovanjem površina.

Vrlo djelotvorna mjera za sprečavanje opasnih posljedica od izbijanja naboja je *odvođenje ili neutraliziranje naboja* ili, drugim riječima, izbijanje na bezopasan način. Odvođenje naboja može se postići izravnim uzemljenjem, okruživanjem nabijenih tijela vodljivim uzduhom, povećavanjem vodljivosti nevodljivih nosilaca elektrostatičkih naboja i pražnjenjem naboja preko šiljaka.

Uzemljenje je povezivanje svih električki vodljivih dijelova međusobno i sa zemljom. Pokretni dijelovi kao osovine, valjci i sl. mogu se uzemljiti posredstvom ugljenih ili mjedjenih četkica, koje treba pomoću jakih pera pritisnuti na rotirajuće dijelove. Povećanje vodljivosti elektrostatički nevodljivih tvari postiže se upotrebom vodljivih podova, npr. od betona ili vodljive gume. Međutim, treba paziti da ti podovi ne postanu opasni kao podloga za dodir s ostalim električnim uređajima. Podržavanjem visoke relativne vlažnosti uzduha postiže se da se na slabo vodljivim površinama, gdje se nakupio naboj, stvori tanki sloj vode, koji olakšava odvođenje tog naboja. Ionizacijom zraka postiže se da se naboj premješta i giba kroz zrak pa tako neutralizira. Za ionizaciju se upotrebljavaju električni ili radioaktivni eliminatori ili neutralizatori i ultraljubičaste zrake. Pri upotrebi električnih ionizatora upotrebljava se za ionizaciju visokofrekventno polje visokog napona (40...60 kH, 75 kV). U eliminatorima s beta-zrakama upotrebljavaju se kao izvori zrakâ po pravilu umjetni radioaktivni izotopi, npr. talijum-204 ili stroncijum-90.

Antistatičkom preparacijom sprečava se nakupljanje električnih naboja na tkaninama od sintetičkih i vunenih vlakana i time pojava da se takve tkanine lijepe za tijelo i druge predmete i da se na njima nakuplja prašina i prljavština (v. Antistatička preparacija u članku *Dorada tekstilnih proizvoda*, str. 387).

Pražnjenjem preko šiljaka uz primjenu influencije mogu se odvoditi električni naboji i sa predmeta u kretanju, npr. sa pogonskih remena (sl. 8), ali u tom slučaju je pražnjenje samo djelomično jer šiljci počinju djelovati tek od određene jakosti polja.



Sl. 8. Odvod naboja s pogonskog remena influencijom. 1 Remenica stroja, 2 remenica motora, 3 metalne uzemljene četkice ili šiljci

Zaštitne mjere pri radnim postupcima provode se, u okviru općih zaštitnih mjera koje su spomenute, tako da se odabere ili jedan, najprikladniji, način zaštite ili više njih. Posebno se za neke radne postupke ukratko u nastavku navodi nekoliko zaštitnih mjera.

Papir koji se upotrebljava za tiskanje na strojevima za duboki tisak ne smije biti potpuno suh. Površinu gumenog pogonskog remena treba namazati smjesom glicerina i alkohola, a kožnog remena ribljim tutkalom. Zapaljive tekućine ne smiju strujati velikom brzinom i slobodnim mlazom, a svi metalni dijelovi uređaja moraju biti dobro uzemljeni. To se posljednje naročito odnosi na prevozne cisterne i na tankove aviona koji se za vrijeme vožnje i leta elektrostatički nabijaju; nije pouzdano uzemljenje vozila provedeno povlačenjem jednog vodiča po cesti. Kad struje komprimirani plinovi, treba ih pročistiti pomoću pogodnih filtera, a posebno treba u njima održavati visoku relativnu vlagu (do 70%). Prašine i eksplozivi se štite time što se izbjegava njihovo uzvrtavanje, što se transportiraju malim brzinama gibanja, što se uzemljavaju i što se održava visoka relativna vlaga uzduha.

U našoj tehničkoj praksi doneseno je niz propisa i pravilnika koji upućuju na provedbu općih mjera sigurnosti (v. npr. knjigu Ivčić, Solić, Magerl: Zbirka propisa o higijenskim i tehničkim mjerama pri radu, Zagreb 1961, te propise i naredbe u Službenim listovima).

STATIČKI ELEKTRICITET U ZEMLJINOJ ATMOSFERI

Statički elektricitet se javlja na površini Zemlje i u njezinoj atmosferi. Njegovo se postojanje pripisuje djelovanju kozmičkih zračenja i radioaktivnom zračenju zemaljske kore. U vezi s ovim elektricitetom postoje i električna polja u atmosferi Zemlje. Jakost ovih polja manja je u mirnoj atmosferi, a za nevremena poprma znatne vrijednosti.

Električno polje Zemlje u mirnoj atmosferi

U elektrotehnici se obično kao potencijal nula uzima potencijal Zemlje (v. str. 580), pa se neka nabijena tijela mogu nazivati pozitivnim ili negativnim prema tome da li su na višem ili nižem potencijalu nego Zemlja. Međutim, to ne znači da je Zemlja bez naboja; novija su istraživanja utvrdila da je površina Zemljine kugle nabijena negativnim elektricitetom. Do tog zaključka došlo se istraživanjem jakosti Zemljinih električnih polja u mirnoj atmosferi, tj. za lijepa vremena. Mjerenjima je utvrđeno da je električno polje Zemlje usmjereno prema njezinoj površini i da na ravnom terenu stoji okomito na nju. Prosječna jakost tog polja iznosi u srednjoj Evropi u mirnom vremenu ~ 130 V/m. Jakost Zemljinog polja varira prema godišnjem doba i satu dana između ~ 60 i 500 V/m.

Istraživanja su pokazala da postoji osim toga jedinstvena dnevna varijacija jakosti električnog polja za čitavu Zemlju s amplitudom od ~ 40 V/m. Maksimalnu jakost nastupa oko 19 sati po srednjem griničkom (Greenwich) vremenu (GMT), a minimum oko 5 sati GMT. Ovo je već 1922 navelo C. T. R. Wilsona (o komu će još biti govora) na tvrdnju da postoji veza između grmljavina i električnog polja Zemlje, budući da maksimum jakosti polja pada u vrijeme kad na zemlji vlada najveća grmljavinska aktivnost (to je u doba oko lokalnog podneva u ekvatorijalnim predjelima Afrike i Južne Amerike).

Ako se pretpostavi da srednja jakost električnog polja uz površinu Zemlje iznosi npr. $E = -135$ V/m, iz tog se podatka može za taj slučaj prema jedn. (7) izračunati gustoća električnog toka (električna indukcija) $D = \epsilon E$, koja je uz površinu Zemlje jednaka površinskoj gustoći naboja σ (v. jedn. 6 a); nadalje je prema jedn. (6 a) ukupni naboj (tj. ukupna količina elektriciteta) Zemlje $Q = \sigma A$, a električni potencijal Zemlje prema nekoj tački u

beskonačnosti, prema jedn. (5) i (18): $V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R}$. U ovim formulama znače: ϵ dielektričnost koja je za uzduh skoro jednaka influencionoj konstanti $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m (farada po metru), A površinu Zemlje, koja iznosi $A = 510 \cdot 10^{12}$ m² i R srednji polumjer Zemlje, koji je jednak $R = 6,37 \cdot 10^6$ m. Ako se te vrijednosti uvrste u naprijed navedene jednadžbe, dobiva se da

gustoća Zemljina naboja (tj. naboj po jedinici površine) iznosi $\sigma = 1200 \cdot 10^{-12}$ C/m², njezin ukupni naboj $Q = -612 000$ C, a njezin potencijal $V = -850 \cdot 10^6$ V.

Međutim, mjerenja s pomoću balonskih sondi pokazuju da se jakost električnog polja s visinom brzo smanjuje i da iznosi 2 km iznad površine Zemlje samo još jednu petinu vrijednosti na površini, a na visini od 10 km jedva nekoliko volta po metru. Ove činjenice očito govore da električno polje u donjem dijelu atmosfere ne potječe samo od negativnog Zemljinog naboja, jer bi u tom slučaju jakost polja opadala polaganije. S druge strane utvrđeno je također da postoji u donjim slojevima atmosfere slobodan pozitivni elektricitet koji s visinom nestaje. Taj elektricitet postoji kao prostorni naboj vezan za sitne lebdjeće čestice a njegova se gustoća naboja u donjim slojevima kreće oko 10^{-12} C/m³. On predstavlja protunaboj negativnom naboju Zemlje. Prema tome se električno polje u nižim slojevima atmosfere formira između pozitivnih prostornih naboja u atmosferi i odgovarajućih negativnih naboja na površini Zemlje, tako da se cijeli sistem može promatrati kao sferni kondenzator naboja $5 \cdot 6 \cdot 10^6$ C s razlikom potencijala oko $4 \cdot 9 \cdot 10^6$ V. Izjednačenje tih dvaju elektriciteta vrši se stalno strujama koje teku kroz nešto vodljivu atmosferu od pozitivnih naboja prema negativnim. Gustoća tih struja kreće se oko $j \approx 3 \cdot 10^{-12}$ A/m², a jakost ukupne struje za čitavu Zemlju procjenjuje se na 1800 A. Povremeno vrši se izjednačenje i s pomoću kiše, a najintenzivnije s pomoću munja za vrijeme oluja.

Kako je zrak loš vodič elektriciteta, ovaj kondenzator ne bi »curio« kad ne bi u atmosferi dolazilo do ionizacije. Do ionizacije u atmosferi dolazi na najmanje četiri načina. Zbog toga zrak ima dosta veliku električnu vodljivost, koja s visinom postaje sve veća. Vodljivost omogućava postojanje struje kojom kondenzator »curi«, a čija se jakost za čitavu zemlju procjenjuje na 1800 A. Ta bi struja ispraznila ovaj kondenzator na jednu trećinu stvarne vrijednosti za svega $4\frac{1}{2}$ minute. To se pražnjenje kondenzatora ne dešava; iz toga slijedi da postoji mehanizam kojim se kondenzator neprestano nabija, a koji je povezan s električnim svojstvima grmljavinskih oblaka. U oblaku kumulonimbusu i oko njega električno polje je posve drukčije nego oko Zemlje za lijepa vremena. Moguće je dati proračun koji pokazuje da sva električna pražnjenja u grmljavinskim oblacima daju upravo struju od ~ 1800 A kojom se kompenzira isto tolika suprotna struja izbijanja kondenzatora.

Zemlja kao cjelina djeluje prema svemirskom prostoru u glavnom kao neelektrično tijelo jer u višim slojevima postoje električna polja samo neznatne jakosti, koja su još i zaštićena dobro vodljivim ioniziranim i više stotina kilometara debelim slojevima tzv. ionosfere, koja iznad atmosfere okružuje Zemlju.

Statički elektricitet u atmosferi za nevremena

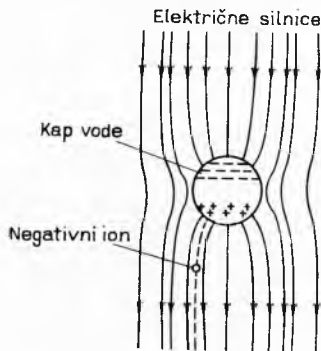
U abnormalnim prilikama, npr. za nevremena (grmljavine), naprijed opisana se ravnoteža statičkog elektriciteta poremećuje i u atmosferi se pojavljuju veći električni naboji s jačim električnim poljima. Jakost tih polja naraste prije pojave munje ili groma na više stotina kilovolta po metru, a razlike potencijala između naboja ponekad dostižu i vrijednost od više stotina milijuna volti. Takve se pojave (grmljavine) javljaju u konvektivnim oblacima kumulonimbusima pod određenim meteorološkim uvjetima, npr. pri nailasku hladnih vremenskih frontova i žestokih vertikalnih strujanja uzduha. Za vrijeme tih pojava dolazi nakon nagomilavanja veće količine elektriciteta u oblacima do atmosferskih električnih pražnjenja unutar i između oblaka (*munja*) kao i između oblaka i površine Zemlje (*gromova*). Ova pražnjenja popraćena su svjetlosnim pojavama (bljeskom, sijevanjem) i zvučnim pojavama (grmljenjem).

Na povezanost grmljavinskih pojava sa statičkim elektricitetom ukazao je Nijemac J. H. Winkler već 1746, a da je Zemlja stalno okružena električnim poljem utvrdio je Francuz Le Monier 1752. Iste godine je Amerikanac B. Franklin, nakon višegodišnjih pokusa, dokazao postojanje električnih naboja u olujnim oblacima i utvrdio da grom udara prvenstveno u povišene objekte, a da ne djeluje na tijela zaštićena metalnim štitom ili kavezom. Te je godine on također predložio da se upotrijebi štapni gromobran kao zaštita od groma. Ova se naprava još danas prema njemu naziva Franklinovim gromobranom. Do pred otprilike 45 godina znalo se vrlo malo o biti atmosferskih pražnjenja. Inicijativa da se naučno prouče pojave u vezi sa stvaranjem električnih naboja u olujnim oblacima i razjasni tok događaja prilikom atmosferskih pražnjenja proistekla je prvenstveno iz potrebe da se zaštite električna postrojenja (dalekovi, transformatori i na njih priključeni uređaji) od štetnog djelovanja groma i da se smanji broj prekiđa u prenosu električne energije. Premda se problemima atmosferskog elektriciteta i atmosferskih pražnjenja bavio velik broj učenjaka (C. T. R.

Wilson, G. C. Simson, F. J. Scrase, B. F. J. Schonland i drugi), i to naročito u razdoblju između oba svjetska rata, neke pojave su ostale još uvijek nedovoljno razjašnjene, npr. obrazovanje električnih naboja u oblacima.

Postanak atmosferskog elektriciteta. I pored nastojanja da se razjasni postanak statičkog elektriciteta u grmljavinskim oblacima atmosfere, do sada na to pitanje nije dokraja odgovoreno. O tome postoji više teorija. Najpoznatije među njima su teorije o postanku atmosferskog elektriciteta C. T. R. Wilsona, G. C. Simsona i njegovih saradnika. Prema svim tim teorijama za stvaranje atmosferskog elektriciteta važne su tri pojave: postojanje električnog polja u atmosferi Zemlje, stvaranje pozitivno i negativno nabijenih čestica vode unutar oblaka i njihovo prostorno odvajanje.

Teorija C. T. R. Wilsona zasniva se na činjenici da električno polje Zemlje, koje postoji i za lijepa vremena, vrši influencijom razdvajanje naboja unutar većih kišnih kapljica koje padaju. S donje se strane kapljice zbog negativnog naboja na površini Zemlje skuplja pozitivni a s gornje negativni elektricitet (sl. 9). Polazeći od pretpostavke da je u atmosferi prisutan velik broj pozitivnih i negativnih iona, on tvrdi da padajuće kapljice privlače negativne ione, koji neutraliziraju pozitivni naboj u donjem dijelu kapljice. Kapljice koje nakon neutralizacije postaju negativno nabijene odbijaju pozitivne ione prema gore. Prema njemu je dakle donji dio oblaka negativan a gornji pozitivan.

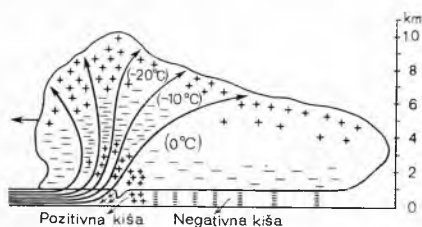


Sl. 9. Razdvajanje električnog naboja u kapljici vode influencijom električnog polja Zemlje

G. C. Simson zasniva svoju teoriju na uzlaznim strujama uzduha koje se redovito javljaju na čelu olujnih oblaka. On se mnogo godina bavio proučavanjem atmosferskog elektriciteta i utvrdio da kapljice kiše više ne mogu padati ako vertikalna komponenta brzine uzdušne struje prekorači brzinu od 8 m/s. Kapljice koje u takvim uslovima lebde u uzduhu i u kojima je električni naboj zbog influencije razdvojen, vjetar razbija na krupnije (donje dijelove) i sitnije (gornje dijelove) kapi i raspršava ih. Sitnije kapi, koje su negativno nabijene, vjetar odnosi prema gore. One predaju svoj negativni naboj višim slojevima oblaka, spajaju se zatim s drugim malim kapljicama u veće i ponovo padaju. Taj se postupak ponavlja više puta uzastopce. Veće kapi vode, koje su ostale nakon razbijanja pozitivno nabijene, ostaju i dalje u lebdećem stanju u zoni razdvajanja ili se spuštaju iza područja vertikalnog strujanja kao pozitivna kiša.

S obzirom na to da su obje teorije u nekim postavkama suprotne, Simson je nakon dugotrajnih prethodnih eksperimenata i mjerenja sa sondama, a u saradnji s F. J. Scraseom i kasnije sa G. D. Robinsonom, modificirao svoju teoriju. Njegovo konačno mišljenje prikazuje sl. 10, iz koje se vidi da je naboj u olujnim oblacima raspodijeljen na tri oblasti. Pri ulazu uzdušne struje, tj. u zoni razdvajanja, postoje pozitivno nabijene kapljice, cio ostali donji dio oblaka je negativno nabijen, dok se u gornjem dijelu oblaka, i to u području gdje vlada temperatura ispod nule i gdje se kapi pretvaraju u kristale, nalazi opet pozitivan naboj.

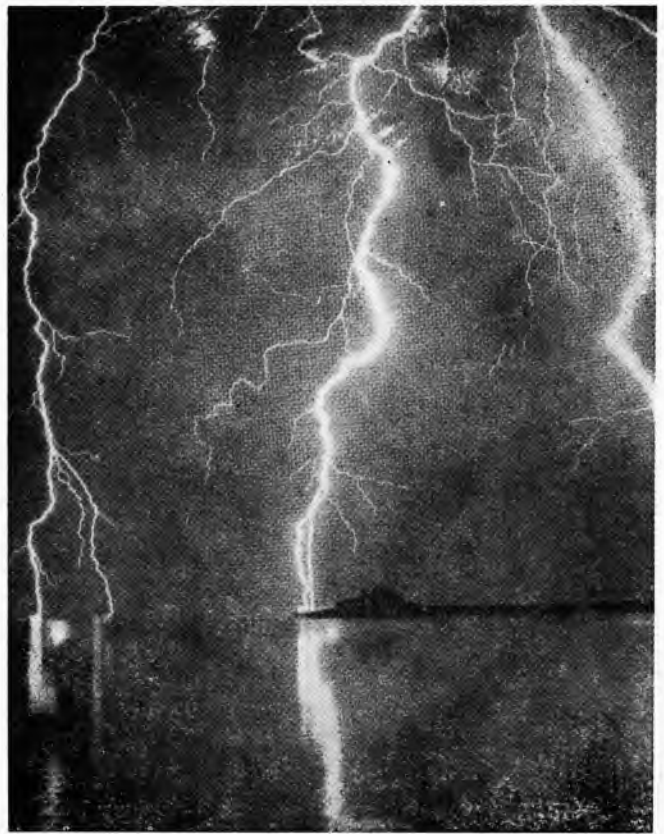
Lakše negativno nabijene dijelove razbijenih kapljica vertikalna struja vjetra sve više diže i time ih sve više razdvaja od do-



Sl. 10. Raspored električnih naboja u grmljavinskom oblaku prema modificiranoj teoriji G. C. Simsona

njih, većih, pozitivno nabijenih dijelova. S obzirom na to da se oba naboja, koji imaju različite predznake, međusobno privlače, potrebno je da se za razdvajanje utroši određen rad. Razdvajanjem se naboj (Q) kapljice ne mijenja, ali se kapacitet (C) između oba dijela kapljice smanjuje, a električno polje između oba naboja rasteže. Prema izrazima (14) i (17 a) $U = Q/C$, iz čega izlazi da se razdvajanjem oba dijela kapljice zbog smanjenja kapaciteta C napon U povećava. Energija koja je potrebna za razdvajanje i povišenje napona podmiruje se iz energije vjetra (v. izraz 17 b). Višekratnim uzastopnim ponavljanjem događaja potencijal kapljica sve više raste dok njihovo električno polje ne postigne jakost koja je dovoljna za proboj uzduha.

Postanak groma i munje. Pod gromom i munjom razumijeva se pražnjenje naboja grmljavinskih oblaka električnom iskrom u Zemljinoj atmosferi uz sijevanje i grmljenje. Električni naboji koji se u određenim meteorološkim prilikama nagomilaju u grmljavinskim oblacima ograničeni su na prostor pojedinog oblaka ili čak samo na jedan njegov dio. Kad jakost polja koje se javlja zbog nagomilanih električnih naboja prekorači probojnu čvrstoću uzduha, dolazi do atmosferskog pražnjenja, koje nazivamo munjom



Sl. 11. Snimci putanja gromova

kad se zbiva između oblaka, a gromom kad se zbiva između oblaka i zemlje. Pri tom se ne radi, kako to izgleda promatraču, o pražnjenju jednim udarom, već o nizu pražnjenja. Pojavu groma i munje opisao je pored drugih autora detaljnije i B. F. J. Schonland sa svojim saradnicima (1934—1938) na osnovu mjerenja, opažanja i fotografiranja munje izvršenih u Južnoj Africi s pomoću Boysove rotacijske kamere. Prema njemu i još nekim izvorima ovi se događaji odvijaju kako je opisano u nastavku.

Kada jakost električnog polja u olujnoj atmosferi prekorači električnu čvrstoću uzduha pomiješanog s kapljicama vode ($5 \cdot 10^6 \text{ kV/cm} = 0,5 \cdot 10^7 \text{ MV/m}$), dolazi do pražnjenja naboja električnom iskrom (v. *Električna pražnjenja u plinovima*). Utvrđeno je da velika većina svih pražnjenja počinje u oblacima; samo kad udari grom u jako visoke zgrade i tornjeve, polazi pražnjenje ponekad i sa zemlje. Svako električno pražnjenje munjom u atmosferi sastoji se od više udara, a svaki udar sastoji se od tri faze, i to: od prethodnog pražnjenja, povratnog toka i glavnog udara.

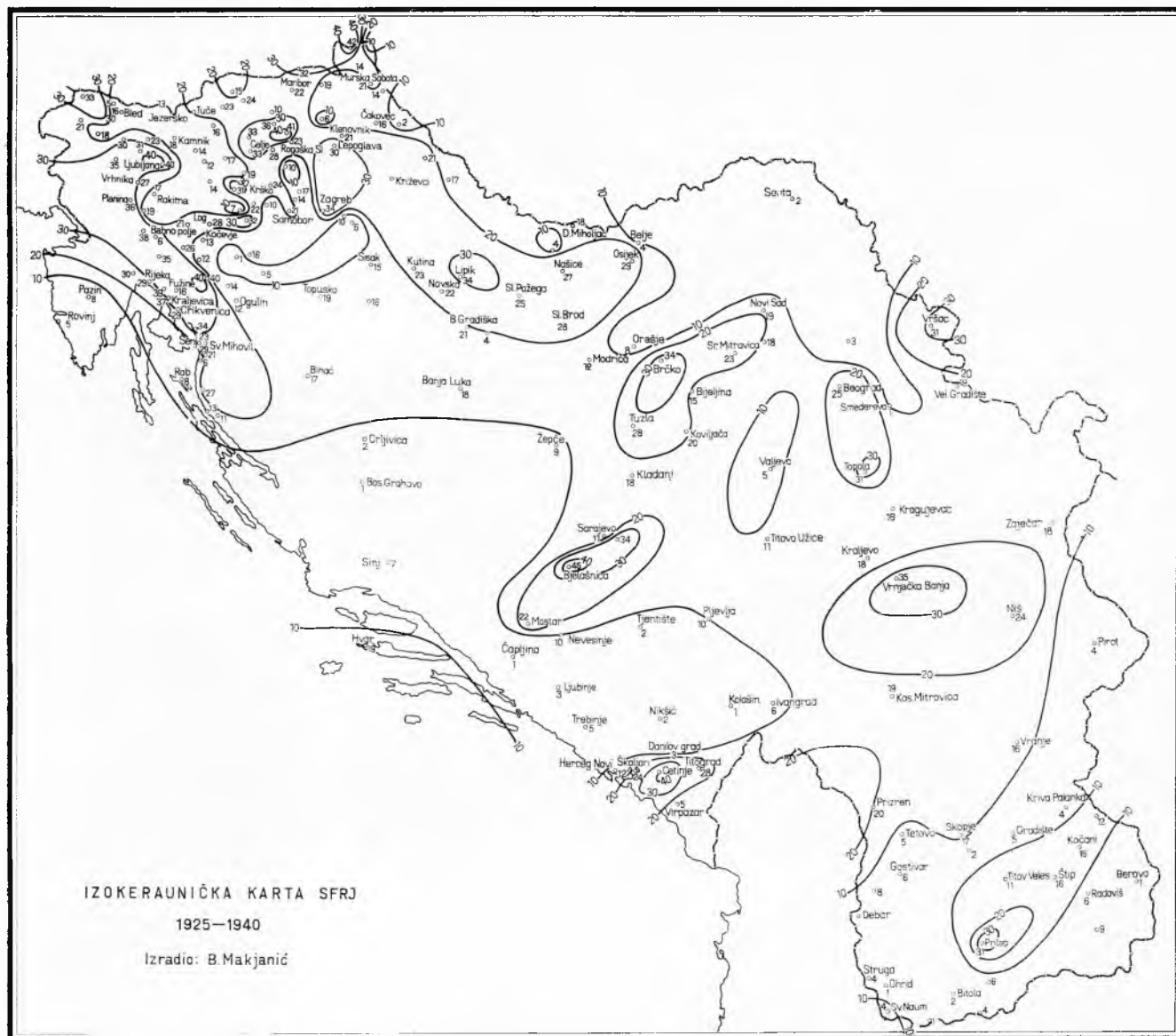
Svakom pojedinom udaru munje ili groma prethodi prethodno pražnjenje, tzv. predvodnik ili lider (engl. *leader*). Za vrijeme njegova trajanja nastaje udarna ionizacija čestica uzduha i stvara se vodljiv kanal za kasniji udar. Naročito zanimljivo je prvo prethodno pražnjenje, tzv. *upravljajući tok*. On se probija skokovito kroz još neprobijenu i slabo ioniziranu atmosferu. Do pojedinačnih proboja dolazi na udaljenosti do 50 m. Nakon svakog preskoka obično se mijenja smjer izbijanja, a od glavnog stabla upravljačkog toka odvaja se veći broj grana koje sve traže put prema drugim nabojima ili prema zemlji. Proces se nastavlja sve dok jedan od predvodnika, koji se svi kreću brzinom od $\sim 10\,000$ km/s, ne stigne do naboja ili zemlje. Takvom formiranju kanala treba pripisati također krivudav i razgranat oblik putanje groma (sl. 11). Čim predvodnik stigne do zemlje i udari u tlo, javlja se jaka termoionizacija, koja se velikom brzinom u vidu *povratnog toka* širi prema oblaku stvarajući dobro vodljiv kanal. Kroz njega spušta se na zemlju *glavni udarni naboj* koji se sastoji od svih naboja koji se nalaze duž kanala. Mada ukupni naboj iznosi samo $20\cdots 100$ C i mada je ukupna energija koja se prenosi na taj način relativno mala, kanalom teku ipak kratkotrajno vrlo jake struje, $1000\cdots 200\,000$ A. Cijeli događaj traje najviše $100\ \mu\text{s}$.

Od trenutka kad se stvori prvi predvodnički tok prema zemlji ili prema nekom drugom naboju, počinju se pojavljivati slični predvodnici i oko drugih centara naboja. Ovi predvodnici povezuju s prvim sve više nabojnih centara, koji se zatim jedan iza drugog



Sl. 12. Kuglasta munja

prazne po istom kanalu na zemlju. Predvodnici ovih naknadnih udaraca više nemaju skokovitih pojava. Čim svaki od njih stigne na zemlju nastupa opet povratni tok, a nakon toga glavni udar.



Sl. 13. Izokeraunička karta Jugoslavije

Tako se to višestruko pražnjenje ponavlja u vremenskim razmacima od 0,01...0,1 s 30...40 puta. Međutim, prvi glavni udar ipak je obično najjači.

Trenutno jako zagrijavanje uzduha naglo povećava njegov tlak i volumen, što stvara tlačni val koji prouzrokuje grmljenje.

Električni naboj koji se kreće iz oblaka prema zemlji i obratno isijava poput dipolne antene elektromagnetske valove sa širokim spektrom frekvencija i stvara time tzv. *atmosferske smetnje*, koje naročito smetaju radio-prijemu, pretežno na nižim frekvencijama (najviše do 30 MHz).

Prema obliku kanala što ga stvara upravljački tok, koji oblik ovisi o trenutnom stanju ioniziranosti atmosfere, može putanja munje poprimiti različite oblike. Tako se razlikuju: linijska munja kad je putanja svijetleća razgranata pruga, plošna munja kad se pokazuje veća osvijetljena površina, kuglasta munja (sl. 12) i niz kuglastih munja kad se jedna ili više svijetlećih gruda vide kroz dulje vrijeme. Prema temperaturi na mjestu udara razlikuje se hladna i topla munja.

Pojave grmljavina. Atmosfersko pražnjenje ne javlja se svagdje istom učestalošću. Tako npr. u polarnim krajevima skoro uopće nema grmljavina, a u pojasu oko ekvatora grmljavine su veoma česta pojava, i to češća iznad kopna nego iznad mora. Idući prema sjeveru i jugu od ekvatora, pojava grmljavina se sreće sve rjeđe. Kao mjerilo učestalosti grmljavina uzima se broj *grmljavinskih dana* (dana kad se bar jedanput čulo grmljenje) u jednoj godini. Pojas oko ekvatora ima i do 200 grmljavinskih dana godišnje, a u našoj zemlji, koja je u umjerenom pojasu, taj se broj kreće između 1 i 45 grmljavinskih dana godišnje.

Broj grmljavinskih dana u godini bilježe u svijetu meteorološke stanice. Na temelju tih podataka mnoge zemlje izrađuju *izokeramičke karte* (sl. 13). Na njima su linijama spojena mjesta s istim prosječnim brojem grmljavinskih dana u godini. Osim toga skupljaju se i podaci o pojavi grmljavine u ovisnosti o dobu dana. Primijećeno je da je pojava grmljavine češća u popodnevnom i večernjim satima (od 14 do 22 sata). Do sada su provedena i neka istraživanja o utjecaju topografskih i geoloških faktora na atmosfersko pražnjenje, ali se zbog nedovoljnih podataka još ne mogu donijeti pouzdani zaključci. Više je ili manje sigurno da se grmljavinski oblaci kreću određenim putevima koji ovise o lokalnom obliku zemljišta. Zbog toga postoje između različitih mjesta velike razlike u gustini nepogoda i udara groma. Isto tako visoki objekti, bez ikakve sumnje, utječu na početne tokove i na uzastopna izbijanja. Specifični otpor i geološka struktura tla također imaju utjecaja na trajanje, a možda i na veličinu izbijanja.

Mjerne naprave za izučavanje groma. Radi proučavanja i rasvjetljavanja pojava koje se odigravaju prilikom udara groma vrše se različita mjerenja i za tu se svrhu primjenjuju specijalne mjerne naprave. Karakteristično je za ta mjerenja da treba mjeriti različite veličine unutar velikog opsega, npr. vrijeme između mikrosekunda i sekunda, struju između više stotina ampera i nekoliko stotina kiloampera itd. Kako se ne može unaprijed znati mjesto gdje će udariti grom, treba imati u pripremi veći broj mjernih naprava, koje stoga ne smiju biti preskupe.

Ovakvim se napravama mjere tjemene vrijednosti struje, prenaponi, naponi udarnih valova na dalekovodima i vremenski razmaci, utvrđuje se polaritet, broj udara i oblik vala pražnjenja, naročito čela i završetka. Za tu svrhu služe aparati koji se ovdje neće opisivati. Njihov se rad zasniva npr. na probijanju iskrišta različitog razmaka, na magnetiziranju mirujućih ili rotirajućih čeličnih štapića (fulhronograf). Čelični štapići postavljaju se bilo izravno uz vodove ili u električne krugove s različitim vremenskim konstantama, što omogućuje mjerenje u određenom trenutku nakon udara groma (magnetski registratori i integratori). Nadalje se vrši fotosnimanje munja specijalnim rotirajućim kamerama (Boysova kamera) i snimanja sa ekrana katodnog osciloskopa. Između jedne šiljate i jedne pločaste elektrode nastaje djelovanjem naponskog vala izbijanje koje se registrira na fotografskom filmu smještenom između elektroda (klidonograf). Iz dobivenog klidonograma može se odrediti polaritet napona, njegova visina i oblik vala. Može se registrirati na rotirajući film i svjetlo koje se pojavljuje pri pražnjenju (registrator udarne struje). Ponekad se primjenjuju i rastalne žice različitih presjeka za utvrđivanje jakosti struje.

Zaštita od groma. Gromobranske instalacije

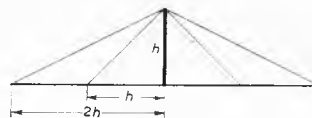
Zaštita od groma treba da zaštiti stanovnike, objekte i predmete u njima od štetnih posljedica atmosferskog električnog pražnjenja (smrti, opekotina, požara i oštećenja). Naprave za zaštitu od groma nazivamo *gromobranima*. Izgradnjom gromobranskih instalacija ne mogu se eliminirati sve štetne posljedice groma, ali se mogu svesti na najmanju mjeru. Gromobranskom zaštitom moraju prema postojećim propisima biti zaštićeni svi građevinski objekti koji se po svome obliku, veličini, visini i površini razlikuju od okolnih objekata, a osim toga sve bolnice, škole, kasarne itd.; zgrade naučne i umjetničke vrijednosti (biblioteke, arhivi itd.) i sve veće poljoprivredne zgrade pokrivene lako zapaljivim materijalom; objekti u kojima se prerađuju ili uskladištavaju veće količine materijala (radionice, garaže za više vozila, hangari, skladišta za smještaj tekućeg goriva itd.); objekti čije bi oštećenje uslijed udara munje moglo izazvati poremećaj industrijske proizvodnje (tvornička postrojenja, tvornički dimnjaci, termoelektrane, hidroelektrane, razvodna postrojenja itd.).

Gromobranska instalacija. Osnovna koncepcija takve instalacije polazi sa stanovišta da je zaštita nekog objekta to sigurnija što je mreža na njemu postavljenih metalnih vodiča gušća. Time se u granicama praktičkih mogućnosti primjenjuje princip zaštite Faradayevim kavezom.

Gromobranska instalacija na nekom objektu sastoji se od tri glavna dijela: od prihvatnog voda odnosno hvataljke, odvoda ili spusnih vodova i uzemljenja.

Za prihvaćanje direktnih udara groma služe bilo vertikalne motke sa šiljkom, tzv. hvataljke, postavljene na odgovarajućim najvišim tačkama objekta, ili metalni vod položen duž najviših ivica krova i nadgrada, tzv. glavni prihvatni vod.

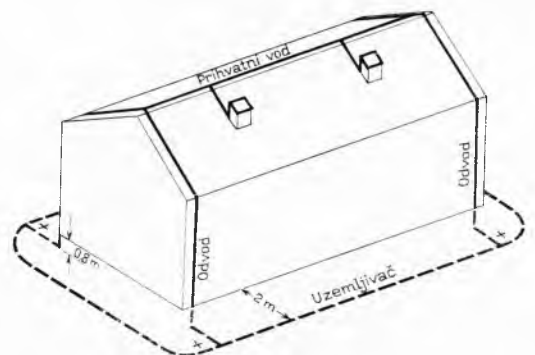
Hvataljke s motkom dužine 300...2000 mm nazivaju se i Franklinovim gromobranom. Unutar konusa (tzv. zaštitnog konusa)



Sl. 14. Zaštitni konus gromobrana s hvataljkama

čiji je polumjer osnove jednak visini motke (sl. 14) po sada stečenom iskustvu udari groma izvanredno su rijetki, a unutar konusa s polumjerom dvostruke visine rijetki. Međutim, kako sigurna zaštita s takvim gromobranima zahtijeva veći broj hvataljki, ovakvi se gromobrani upotrebljavaju danas samo još na vrlo uskim i šiljastim objektima kao što su tornjevi, crkveni zvonici, visoki tvornički dimnjaci i jako visoki neboderi.

Iskustvo je pokazalo da grom obično udara u povišene dijelove zgrada kao što su sljeme, zabat, ivice krova ili dimnjaci; stoga se sada na većini objekata umjesto hvataljki radi zaštite od groma postavljaju *glavni prihvatni vodovi*. To su duge trake od pocinčanog željeza, punog presjeka, koje se postavljaju uzduž ivica najvišeg dijela zgrade, npr. uzduž sljemena idući od jedne do druge ivice krova (sl. 15). Položaj glavnog prihvatnog voda



Sl. 15. Shema gromobranske instalacije s prihvatnim vodom

ovisi o dužini, širini i obliku krova, kao i o visinskoj razlici između sljemena i strehe, ivice i zabata.

Odvodi su drugi dio gromobranske instalacije, a služe kao spojnice između glavnog prihvatnog voda i uzemljivača. Oni su

od istog materijala i istog presjeka kao i glavni prihvatni vod. Razmak između dva odvoda na jednoj zgradi ne smije biti veći od 20 metara, ali svaka ivica zgrade treba da ima po jedan vertikalni odvod.

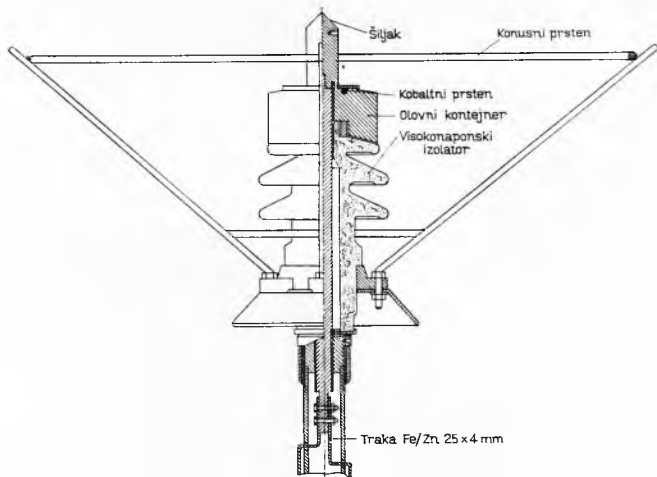
Uz odvode treba spomenuti i *pomoćne priključne vodove* koji vezuju metalne površine kao što su metalni oluci, olučne cijevi i fimeni dijelovi krovnih konstrukcija, nadalje televizijske antene i prihvatni vodovi s dimnjaka i drugih isturenih nadgrađa, s glavnim prihvatnim vodom. Mogući direktni udar groma u te dijelove nije jedini razlog za njihovo povezivanje s prihvatnim vodom. Kada naime grom udari u gromobranksku instalaciju, javlja se naponska razlika između gromobrankske instalacije i ostalih bliskih metalnih dijelova, ukoliko nisu s njome vodljivo vezani. Budući da ta naponska razlika teži izjednačenju, koje se obično događa putem iskre, ona može izazvati požar lako zapaljivih materijala, npr. drvene krovne konstrukcije, ili prouzročiti druge štete i nesreće. Iz tih razloga se obavezno povezuju metalni dijelovi preko gromobrankske instalacije najkraćim putem sa zemljom.

U odvodu ili spusnom vodu koji spaja prihvatne vodove s uzemljenjem nalazi se nešto iznad razine zemlje *rastavna spoj-nica* kojom se odvod može prekinuti radi mjerenja i provjere otpora uzemljenja, što se prema propisima mora obavljati u određenim vremenskim razmacima.

Uzemljivač spaja odvod sa zemljom. Da taj spoj predstavlja dobro izvedeno uzemljenje, tj. da uzemljivač bude u zemlju pravilno ukopan, vrlo je važno za dobro funkcioniranje gromobrana. Uzemljivač se postavlja kao prsten oko objekta koji se štiti i ukopava na dubinu $\sim 0,8$ m u zemlju, a na udaljenosti od zida koja nije manja od 2 m. Prelazni otpor između uzemljivača i zemlje ne smije prekoračiti propisanu vrijednost, npr. $5 \dots 10 \Omega$. Propisima je predviđeno da se taj otpor uzemljenja mora redovito kontrolirati. Otpor uzemljenja mjeri se izmjeničnom strujom od ~ 35 Hz (v. *Električna mjerenja*).

Gromobrankske instalacije izvode se standardiziranim materijalom i prema važećim propisima. Propisan je i način održavanja. (JUS N. B4.901 do B4.950, Tehnički propisi za gradnju i održavanje gromobrana, Službeni list FNRJ 13/1968).

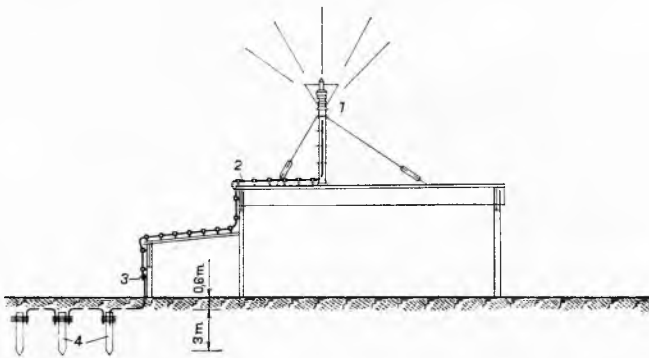
Radioaktivni gromobran je zaštitna naprava koja se počela upotrebljavati tek od nedavna. Ona se sastoji od štapaste hvataljke na kojoj je pri vrhu ispod šiljka učvršćen izvor radioaktivnog zračenja, od spusnog voda, mjernog spoja i uzemljenja. Kao izvor zračenja može poslužiti npr. pločica od radioaktivnog kobalta-60 koja isijava γ -zrake. One ioniziraju uzduh iznad gromobrana,



Sl. 16. Konstrukcija hvataljke radioaktivnog gromobrana

čime se povećava vodljivost uzduha. Smjer kretanja čela groma ovisi naime o mjestu i stepenu ionizacije uzduha. Takvom ionizacijom usmjeruje se dakle čelo groma prema šiljku hvataljke, pa se na taj način povećava promjer zaštitne zone gromobrana i njegova efikasnost. Poluprečnik zaštitne zone radioaktivnih gromobrana ovisi o aktivnosti radioaktivnog izvora. Kako s vremenom aktivnost izvora zračenja opada, postepeno se smanjuje i promjer

zaštitne zone. Stoga treba radioaktivni izvor nakon određenog vremena zamijeniti novim. Izvor zračenja, hvataljku i razmak između pojedinih gromobrana treba dimenzionirati tako da u vrijeme kada treba izvršiti zamjenu izvora zaštitna zona upravo još odgovara postavljenim zahtjevima. Slika 16 pokazuje vrh takva gromobrana (konstrukcija Instituta B. Kidrič i tvornice Elind). Šiljak prihvata pražnjenje koje se preko spojnih i veznih elemenata (sl. 17) odvodi u zemlju. Kobaltni prsten isijava zrake



Sl. 17. Primjer postavljanja radioaktivnog gromobrana na nekom objektu. 1 Hvataljka, 2 odvodni spusni vod, 3 rastavna spojka za mjerenje, 4 uzemljenje

prvenstveno prema gore jer njegovo djelovanje prema dolje sprečava olovni štitnik (kontejner). Konusni metalni prsten, koji je s pomoću visokonaponskog izolatora montiran izolirano od hvataljke, služi za usmjeravanje električnog polja i time poboljšava efikasnost radioaktivnog gromobrana.

Zaštita električnih vodova od groma. Najveći broj smetnji i šteta na električnim vodovima nastaje zbog direktnih udara groma. Vodovi se zato zaštićuju zemnim užetima i odvodnicima prenapona.

Zaštitno ili zemno uže postavlja se na vrhu dalekovodnih stupova iznad faznih vodiča radi njihove zaštite od udara groma i prodora prenapona. Prema izvedbi stupova i broju vodiča upotrebljava se jedno ili dva zaštitna užeta. Uže je na svakom stupu uzemljeno. Ono djeluje kao gromobranski prihvatni vod i stvara ispod sebe zaštitnu zonu u kojoj se moraju nalaziti vodiči. Veličinu zaštitnog kuta obrazuje vertikalna kroz zaštitno uže i linija položena kroz zaštitno uže i najudaljeniji fazni vodič. Ukoliko je manji kut utoliko je broj direktnih udara u fazne vodiče manji. Kut od 20° potpuno zadovoljava, dok su rezultati s kutom od 45° lošiji. U nas se primjenjuje kut od 30° (v. *Dalekovodi*, sl. 3).

Ako dođe do direktnog udara groma u fazni vodič, kao zaštita služi *odvodnik*. On ima zadatak da ograniči prenapon na vrijednosti koje svi dijelovi postrojenja mogu izdržati a da pri tome ne dođe do proboja ili preskoka ni do prekida snabdijevanja električnom energijom. Postoje uglavnom tri vrste odvodnika prenapona od kojih svaki ima svoje područje primjene; to su: iskrišta, cijevni odvodnici i ventilni (katodni) odvodnici (v. *Rasklopna postrojenja*). Od dobrog se odvodnika traži da prenapon bilo koje veličine svede na bezopasnu mjeru. Od svih vrsta odvodnika najbolji je ventilni odvodnik. Glavni su dijelovi takva odvodnika iskrište sastavljeno od više u seriju spojenih iskrišnih elemenata i specijalni otpornik s nelinearnom i o naponu ovisnom karakteristikom. Napon na takvom otporu ovisi o struji prema relaciji

$$U = K I^a, \quad (21)$$

gdje je U napon na svakom otporu, I jačina struje, K konstanta jednaka naponu na svakom otporu kada je struja 1 A, a a konstanta nelinearnosti. Konstanta nelinearnosti a karakterizira ventilne osobine odvodnika. Vrijednosti $a = 1$ odgovarao bi konstantni otpor (napon se mijenja po Ohmovom zakonu, tj. $U = K \cdot I$ ili $U = R \cdot I$), a kod vrijednosti $a = 0$ odvodnik bi imao idealna svojstva. Teži se tome da se napon na odvodniku što manje mijenja u trenutku prolaza valova napona, pa je u praksi postignuta vrijednost a od 0,15 do 0,20. Odvodnik se priključuje jednim krajem na fazni vodič, a drugim krajem na uzemljivač.

Osim spomenutih glavnih zaštita vodovi se štite iskrištima i drugim vrstama odvodnika (cijevnim odvodnicima), ali te ostale

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

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

M. Padelin

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

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

ELEKTRIČNI MJERNI INSTRUMENTI I UREĐAJI

Instrumenti i uređaji kojima se vrše električna mjerenja sastoj se od jednog ili više mjernih sistema, smještenih u pogodnom kućištu, i dodatnog pribora (predotpornika, ispravljač itd.) koji može biti ugrađen, pridodat ili se može naknadno priključiti.

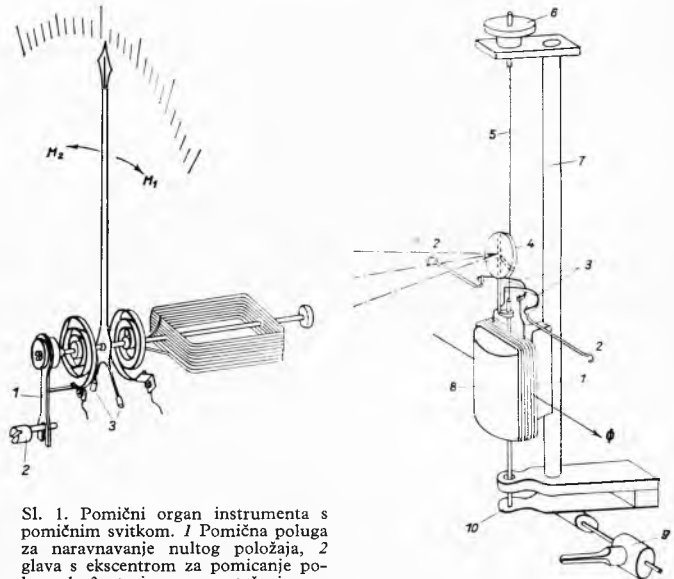
Električne mjerne naprave mogu se podijeliti na pokazne, registracione i kontaktne instrumente, na oscilografe i osciloskope, na mostove i kompenzatore, na električna brojila, na elektroničke i digitalne instrumente i brojače, na etalone (normale), mjerna pojačala, izvore struje i neke druge naprave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

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

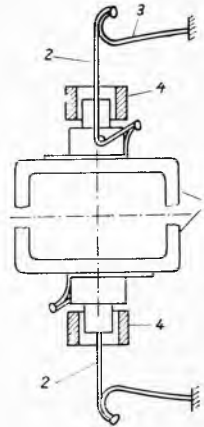
ELEKTRIČNI MJERNI INSTRUMENTI

Konstrukcija mjernih sistema i opće karakteristike električnih mjernih instrumenata

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



Sl. 1. Pomični organ instrumenta s pomičnim svitkom. 1 Pomična poluga za naravnavanje nultog položaja, 2 glava s ekscentrom za pomicanje poluge 1, 3 utezi za uravnoteženje pomičnog organa s kazaljkom

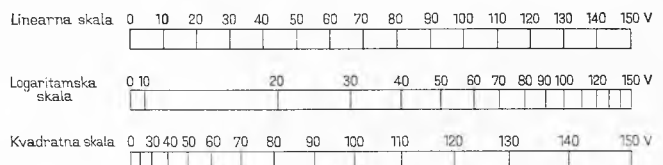
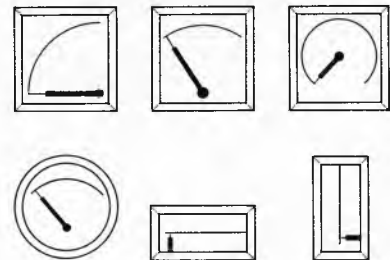


Sl. 2. Zrcalni galvanometar sa zavješanim sistemom. 1 Pomični svitak, 2 i 3 dovodi do pomičnog svitka, 4 zrcalo, 5 traka za zavješanje pomičnog svitka, 6 okretljivo dugme, 7 nosač, 8 jezgra od mekog željeza (magnet nije prikazan), 9 ručka za aretiranje, 10 elastično pero

na pomični organ. Veličina momenta ovisi o jakosti struje koja protječe kroz taj svitak (kvocijenti i diferencijalni instrumenti).

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

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



Sl. 4. Skale za instrumente