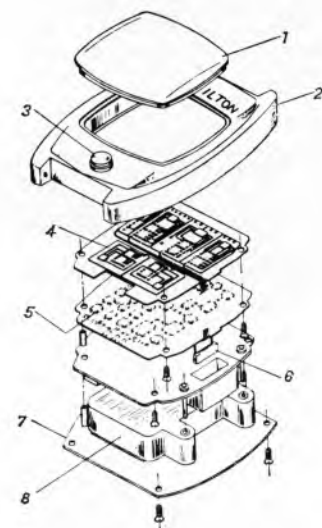


pokazivača. Za kretanje sistema kazaljke predlažu se uglavnom tri vrste pogonskih elektromehaničkih uređaja: rezonantni vibrirajući sistemi koji svoje linearno kretanje s pomoću polužice i zupčanika pretvaraju u kružno, sinhroni motori (sa zakretnim ili pulzirajućim poljem), koji svoje kružno kretanje posredstvom zupčanika prenose na kazaljke, i koračni sistemi (koračni motor, bistabilni polarizirani uređaji) koji na jedan ili drugi način pogone kazaljke. Satovi s elektro-optičkim pokazivanjem daju vrijeme u digitalnom obliku s pomoću svijetlećih brojaka (sl. 30). Brojke na brojčaniku sastoje se od tačaka što ih stvaraju svijetleće diode. Prednost je takvog pokazivanja što se sa sata vrijeme može očitati danju i noću. Da bi jakost svijetljenja brojaka odgovarala osvijetljenosti okoline, ona se automatski regulira na pravu razinu. Brojke koje bi stalno svijetlile trošile bi previše električne energije,

stoga one svijetle samo na zahtjev: nakon pritiska na dugme pojavljuju se na ekranu brojevi koji označavaju sekunde, minute i sate. Nakon kraćeg perioda (npr. 1,25 s) gase se brojke koje označavaju minute i sate, a ostaju samo one koje označavaju sekunde, i to dok god je dugme pritisnuto. Ovakvi satovi nemaju (osim kvarca) nijedan mehanički pomični dio (sl. 31). Oni moraju umjesto mehaničkog brojača (sistema kazaljki) imati elektroničko brojilo koje impulse dobivene iz djelioca frekvencije broji i pretvara u sekunde, minute i sate. S obzirom na veliki broj elektroničkih sklopova, takvi satovi troše relativno mnogo električne energije, što iziskuje bateriju koja zauzima čak do 80% raspoloživog prostora. Kvarcni ručni sat s frekvencijom 32 768 Hz koji je razvila američka kompanija Hamilton Watch Co. radi na tom principu. Njegova greška iznosi samo ~ 3 s u mjesec dana.



Sl. 31. Shematski prikaz ručnog kvarcnog sata s elektro-optičkim brojčanikom. 1 Filtar, 2 kućište, 3 dugme za aktiviranje brojčanika, 4 svijetleće diode, 5 integrirani sklopovi sata, 6 kvarcni oscilator, 7 donji poklopac, 8 baterija

Da bi oscilator sata radio postojano, on se mora napajati iz stalnog izvora u kome je električna energija akumulirana, npr. iz električnog akumulatora ili iz električne baterije. Ako se prihvati zamisao akumulatora, treba predvidjeti i način njegovog punjenja, izvore energije iz kojih će se puniti i pogodne pretvarače energije. Za sada su razvijeni akumulatori koji mogu napajati ručni sat i do 6 mjeseci bez punjenja. Za njihovo punjenje predviđeni su posebni mrežni punjači. Od ostalih izvora energije uzimaju se u obzir: izvori mehaničke energije (micanje rukom), svjetlosne energije (sunčane baterije ugrađene su u tom slučaju u brojčanik) i radio-aktivni materijali. Dok se ne dode do zadovoljavajućih rješenja, upotrebljavat će se i dalje kao izvor električne energije živine baterije (1,35 V) ili baterije od srebro-oksida (1,5 V). Kad bi takva baterija zauzimala zapreminu cijelog sata, davala bi snagu od $\sim 150 \mu\text{W}$.

U Švicarskoj se radi na razvoju električnih satova (ručnih i drugih) koji se upravljaju radio-emisijom. Za razliku od ranijih takvih sistema, signal koji se emitira svake sekunde ne označava samo sekundu već sadrži kompletni podatak o trenutnom tačnom vremenu, dakle o satu, minutama i sekundama. Ako sat kroz neko vrijeme nije primao signale (u zgradi, tunelu itd.), on će nakon primitka prvog signala sam ispraviti eventualno odstupanje. Satovi koji se za ovu svrhu primjenjuju slični su satovima s elektro-optičkim pokazivanjem.

LIT.: F. Hope-Jones, Electric clocks, London 1931. — H. W. Goetsch, Taschenbuch für Fernmeldetechniker, München 1950. — J. W. Player (ed.), E. J. Britten's watch and clockmaker's handbook, Princeton, N. J. 1955. — F. Schmidt, Elektrische Uhren, Halle 1957. — П. В. Саветлов, В. И. Нилов, Методы кварцевой стабилизации в диапазоне частот, Киев 1961. — В. В. Григорян, М. Е. Жаботинский, В. Ф. Золин, Квантовые стандарты частот, Москва 1968.

I. Marincek

ELEKTRIČNI SKLOPNI APARATI, aparati koji služe za uspostavljanje, održavanje i prekidanje kontinuiteta ili diskontinuiteta strujnih krugova. Vršeci ovu funkciju, koja obuhvaća uklapanje i isklapanje, pokretanje i regulaciju, zaštitu i komandu, sklopni aparati upravljaju radom uređaja za proizvodnju, transformaciju, konverziju, prenos i potrošnju električne energije. Njihovo djelovanje, označeno zajedničkim terminom *sklapanje*, svodi u krajnjoj liniji na promjenu vlastite impedancije i dielektrične čvrstoće. To se postiže u sklopkama i relejima time što se otvaraju i zatvaraju kontakti, u osiguračima time što pregaraju rastalnice, u odvodnicima prenapona time što se probijaju i gase iskrišta i što reagiraju nelinearni otpori, u regulatorima time što se stepenasto uključuju otpornici i prigušnice, u tekućinskim pokretačima time što se kontinualno uronjavaju elektrode ili mijenja vodostaj, u statičkim aparatima promjenom magnetskog zasićenja transduktora ili ventilnim djelovanjem poluvodičkih elemenata.

Sklopni aparati, koji obuhvaćaju širok izbor uređaja, mogu se dijeliti prema namjeni, prema njihovoj funkciji, prema nazivnom naponu i prema drugim kriterijima.

Podjela sklopnih aparata prema namjeni razlikuje ove najvažnije grupe aparata: rastavljače, sklopke, prekidače, pokretače, regulatore, osigurače, odvodnike prenapona, releje, pribor i sklopne blokove.

Rastavljači su aparati koji služe za otvaranje i zatvaranje strujnih krugova kad se time prekidaju ili uklapaju zanemarljivo male struje (npr. struje naponskih mjernih transformatora ili kapacitivne struje kratkih neopterećenih kabela) ili kad sklapanjem većih struja ne dolazi do znatnije promjene napona među stezaljkama pojedinog pola (npr. u slučaju premošćenja zatvorenih kontakata prekidača). Rastavljači mogu trajno voditi normalne pogonske struje, a trenutno i struje kratkog spoja. Između njihovih kontakata mora postojati propisni razmak, tzv. *rastavni razmak*, čije postojanje mora u otvorenom položaju biti pouzdano vidljivo jer o njemu ovisi sigurnost postrojenja i osoblja koje na njima radi.

Sklopke mogu uklapati, trajno voditi i prekidati struje normalnog pogona i eventualnih preopterećenja, a trenutno podnose i struje kratkog spoja. Neke izvedbe mogu uklapati (ali ne prekidati) struje kratkog spoja. Sklopke koje u otvorenom položaju ostvaruju i propisni rastavni razmak, zovu se *rastavne sklopke*. S obzirom na sposobnost vođenja, uklapanja i prekidanja struje mogu se u ovu grupu ubrojiti još sklopnici (kontaktori) i motorske sklopke. Značajka je *sklopnika* da se ne pokreću ljudskom snagom, te da imaju samo jedan položaj mirovanja u koji se vraćaju njihovi pomični kontakti kad im se pogonski mehanizam (obično elektromagnet) ne napaja energijom. Općenito su predviđeni za veliku učestalost sklapanja. *Motorske sklopke* služe za upravljanje elektromotorima. Mogu sadržavati i elemente za zaštitu od preopterećenja, a karakteristike su im prilagođene strujama zaleta i ostalih pogonskih stanja motora.

Prekidači, pored toga što mogu sklapati i voditi normalne pogonske struje, mogu uklapati i prekidati struje kratkog spoja; za automatsko prekidanje u kratkom spoju imaju posebne zaštitne organe. Ako im kontakti u otvorenom položaju stvaraju propisni rastavni razmak, nazivaju se *rastavnim prekidačima*.

Pokretači služe za pokretanje motora ili puštanje u pogon drugih trošila, te često omogućuju da pri tome određene pogonske veličine (struja, moment vrtnje) ostanu u propisanim granicama.

Regulatori održavaju neku pogonsku veličinu (napon, struju, snagu, brzinu, temperaturu) na praktički konstantnoj vrijednosti, ili je mijenjaju na odabrani način.

Osigurači su sklopni aparati koji taljenjem posebno dimenzioniranih elemenata (*rastalnice*) automatski otvaraju strujni krug kad struja kroz određeno vrijeme prekoračuje zadanu vrijednost. Osigurači prekidaju veće struje kratkog spoja prije nego što one narastu na maksimalnu vrijednost. Proizvode se i kombinacije sklopki, odnosno prekidača, s osiguračima, u kojima osigurači služe kao pomični kontakti ili su serijski vezani s njihovim polovima.

Odvodnici prenapona služe za zaštitu električnih postrojenja od prenaponskih valova, a priključuju se između električnih vodova i zemlje. Oni ograničavaju visinu udarnih prenapona, ali i amplitudu i trajanje tzv. popratne struje (koju generator šalje kroz od-

vodnik nakon prestanka odvodne struje) da bi se izbjeglo neželjeno automatsko isklapanje prekidača ili pregaranje osigurača.

Releji su automatski aparati koji pod utjecajem neke mjerene fizikalne veličine (napona, struje, tlaka, temperature) električnim putem djeluju na druge uređaje. Tako npr. otvaranjem ili zatvaranjem svojih kontakata prekidaču napajanje elektromagneta u sklopniku, uzbuđuju svitak okidača u sklopki ili prekidaču, itd.

Okidači su upravljački organi sklopnih aparata koji pod utjecajem kontrolirane električne veličine mehaničkim putem oslobađaju njihove zaporne elemente i time izazivaju otvaranje ili zatvaranje aparata.

Pribor obuhvaća potporne i provodne izolatore, kableske uvodnice, otpornike, prigušnice, kondenzatore, mjerne i signalne uređaje, stezaljke, pneumatske ventile, elektromagnete itd., koji se ugrađuju u aparate i njihove sklopove.

Sklopni blokovi (aparature) su kompleksni uređaji sastavljeni od raznovrsnih sklopnih aparata i pribora zajedno s odgovarajućim kućištima, postoljima i unutarnjim spojevima (npr. komandni pultovi, razvodni ormari i sl.).

Podjela sklopnih aparata prema njihovoj funkciji prikazana je na sl. 1. Podjela na kontaktne, beskontaktne, lučne i bezlučne aparate ovisi o tome da li im je djelovanje vezano uz mehaničko kretanje kontakata i da li pri sklapanju nastaje električni luk. Bezlučnim smatraju se i aparati sa zanemarljivo malom energijom luka. Hibridni su aparati kombinacije kontaktnih i beskontaktnih. Dalja je podjela izvršena prema načinu kojim se upravlja prolazom struje ili paljenjem i gašenjem luka.

kombinacija dvaju brzih kontakata, sinhroniziranih s promjenom polariteta napona, od kojih je jedan premošten poluvodičkom diodom. Radi prekidanja struje, premošteni se kontakt prvi otvara u intervalu vođenja diode, a odmah zatim i drugi u intervalu blokiranja. U transduktorskim aparatima (grupa 32) kontakti su spojeni u seriju s glavnim namotom transduktora, koji u normalnom pogonu, zbog velikog zasićenja magnetske jezgre, ima zanemarljivo malu induktanciju. Kad se isključi istosmjerna uzbuda upravljačkog namota neposredno prije isklapanja, induktancija se znatno poveća, a struja u glavnom krugu smanji se na željeni iznos. Slično rade i aparati koji se zasnivaju na supravodljivosti (grupa 33). Dugački supravodič u seriji s kontaktima gubi svoju supravodljivost (v. *Elektrotehnika*) čim njegovo vlastito magnetsko polje, ili strano polje kontrolirano upravljačkim organima, prekorači kritični iznos. Time taj vodič postaje otporom koji isklonnu struju ograničava na željeni iznos, a na njemu nastali pad napona može se iskoristiti kao impuls za okidanje.

Podjela sklopnih aparata prema nazivnom naponu svrstava aparate u niskonaponske i visokonaponske. Za grubu informaciju može se kao gornja granica napona niskonaponskih aparata izmjenične struje smatrati 1 kV a istosmjerne struje 1,2 kV. Potreba za primjenom sve viših napona u prenosnim sistemima dovela je do dalje podjele visokonaponskih aparata, te se danas često spominju aparati za srednje (od 3 do 35 kV), visoke (preko 35 do 400 kV) i vrlo visoke napone (preko 400 kV).

Ostale podjele sklopnih aparata. Moguća je i klasifikacija prema vrsti struje (aparati za istosmjernu i izmjeničnu struju), prema mjestu upotrebe (aparati za kućne instalacije, za razvodne mreže, za industriju, za rudnike, za brodarstvo, za električnu vuču), prema vrsti mehaničke zaštite (otvoreni, zatvoreni, od eksplozije zaštićeni aparati), prema tome da li djelovanje aparata ovisi o režimu strujnog kruga ili volji posluže (automatski i neautomatski). Sklopke i prekidači mogu se podijeliti prema načinu gašenja luka na aparate s plinovitim medijem (zračne, pneumatske, sa sumpornim heksafluoridom), s tekućim medijem (uljne, malouljne, hidromatske), s čvrstim medijem (plinotvorne), s metalnom deionizacijom rešetkom, s magnetskim gašenjem u uskim rasporima, vakuumske i dr. Niskonaponske sklopke dijele se prema mehaničkoj izvedbi na polužne, valjkaste, paketne, grebenaste. Releji se razlikuju prema vrsti mjernih mehanizama (elektromagnetski, indukcioni, bimetalni) i pogonskoj veličini na koju reagiraju (nadstrujni, podnaponski, diferencijalni, distantni, tlačni).

Usvažavanje lučnih komora i njihovo serijsko povezivanje (sistem višestrukog prekida) omogućili su gradnju prekidača za napon 765 kV uz prekidnu struju 50 kA, što odgovara tropolnoj snazi kratkog spoja od ~ 65 000 MVA. Širenje automatizacije i sve stroži uvjeti u pogledu sigurnosti i ekonomičnosti energetskih postrojenja postavljaju istodobno sve teže zahtjeve kvalitete sklopnih aparata: traže se sve veća pouzdanost i trajnost, a što manje dimenzije i cijena. Stoga se u posljednje vrijeme intenzivno ispituju novi fizikalni principi, traže optimalna konstruktivna rješenja i primjenjuju suvremene tehnologije.

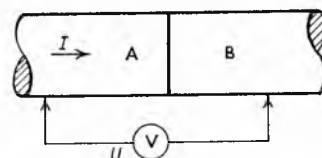
FIZIKALNE OSNOVE SKLOPNIH APARATA

Za bolje razumijevanje funkcije sklopnih aparata od posebnog su značenja teorija električnih kontakata, prijelazne pojave u procesima sklapanja i principi gašenja električnog luka.

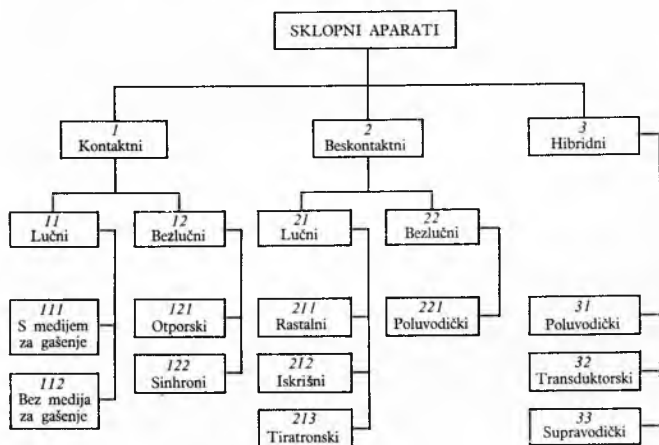
Električni kontakti

U apstraktnom smislu termin »kontakt« označava stanje koje nastaje dodirnom dvaju vodiča. Materijalni smisao tog termina odnosi se na kontaktne dijelove koji, krećući se jedni u odnosu prema drugima, otvaraju ili zatvaraju strujne krugove.

Kontaktni otpor. Poznata je činjenica da se dodirno mjesto kojim struja prolazi iz jednog vodiča u drugi redovito jače zagrijava od susjednih dijelova. Za ilustraciju ove pojave mogu poslužiti cilindrični kontakti A i B prema sl. 2, kojih se čeone plohe dodiruju pod određenim tlakom. Mjerenje



Sl. 2. Povećanje otpora na kontaktnom mjestu. A i B cilindrični kontakti, V voltmetar



Sl. 1. Podjela sklopnih aparata prema njihovoj funkciji

Danas se u sklopnoj tehnici jake struje gotovo isključivo primjenjuju lučni aparati. Grupe aparata označene na sl. 1 brojevima 111 i 112 obuhvaćaju prvenstveno sklopke i prekidače u kojima se luk gasi posebnim medijem (plinom, tekućinom, plinotvornom čvrstom tvari) ili na nekom drugom principu. Grupe 211 i 212 odgovaraju rastalnim osiguračima i odvodnicima prenapona, gdje luk nastaje pregaranjem tankih vodiča i probijem iskrišta. Ostale su grupe još u fazi istraživanja i razvoja, ili su danas još toliko skuplje od uobičajenih rješenja da im je primjena iz ekonomskih razloga ograničena samo na specijalne slučajeve.

Kontakti otporskih prekidača (grupa 121) premošteni su u početku otvaranja malim otporom koji se naglo povećava, tako da se prije definitivnog prekida struja smanjuje na neznatan iznos. Sinhroni prekidači (grupa 122) otvaraju kontakte u prvoj prirodnoj nultočki izmjenične struje nakon isklonog impulsa. Glavni krug tiratronske aparata (grupa 213) sačinjavaju dva tiratrona u protuspoju. Prekidanje se vrši tako da se njihovim rešetkama, koje su u normalnom pogonu pozitivne prema katodama, dovede negativni napon i time blokira prolaz struje. Pri tome se u onoj cijevi koja tog trenutka vodi struju nastavlja njezin tok do prve nultočke (v. *Elektronika*). Posve je analogna funkcija beskontaktnih aparata s poluvodičkim elementima (grupa 221), koji umjesto tiratrona sadrže upravljive silicijumske ventile (tiristore). Primjer hibridnih poluvodičkih aparata (grupa 31) serijska je

pada napona U uslijed prolaza struje I pokazuje da je električni otpor $R = U/I$ ovakve kombinacije veći od otpora homogenog vodiča jednakih dimenzija, ma koliki bio tlak na dodirnom mjestu. Razlika između otpora kombinacije kontakata i otpora homogenog vodiča naziva se kontaktnim otporom R_K , koji je uzrokom dodatnog ugrijavanja dodirnog mjesta povećanom Jouleovom toplinom. Pomnija istraživanja vode do zaključka da se kontaktni otpor može prikazati kao suma slojnog i provlačnog otpora: $R_K = R_s + R_p$.

Slojni otpor R_s posljedica je slabo vodljivih stranih slojeva na dodirnim plohama, koji potječu od nečistoća, sredstava za podmazivanje ili kemijskih spojeva (oksidâ, sulfidâ) nastalih utjecajem okolne atmosfere. I svježe očišćene metalne površine u zraku prekrivene su jednomolekularnim slojevima kisika ili vodika (debljine $\sim 0,25$ nm). Njihova je veza s kontaktnom plohom jača od veze među metalnim atomima, pa se ti slojevi mogu odstraniti samo žarenjem u vakuumu.

Provlačni otpor R_p tumači se time što ni precizno obrađene kontaktne površine ne mogu biti potpuno glatke, pa se one stoga dodiruju samo u pojedinim izbočinama. Provlačenje strujnica kroz ovakva uska mjesta i njihova mjestimična koncentracija na manji volumen očituju se kao povećanje otpora.

Mehanizam prolaza struje kroz strane slojeve ovisi o njihovoj debljini. Kontakti s jednomolekularnim slojevima (mikroslojevima) nazivaju se kvazimetalnim jer se njihov slojni otpor u tehnici jake struje može praktički zanemariti. Ova se pojava objašnjava tzv. tunelskim efektom na principima valne mehanike, prema kojem se elektroni vodiča s velikom vjerojatnošću probijaju između molekula mikroslojeva (v. *Električna pražnjenja u plinovima*, TE 3, str. 675, i članak *Elektronika, sastavni dijelovi*). Vjerojatnost nesmetanog prolaza elektrona kroz deblje slojeve (makroslojeve) opada veoma brzo s porastom njihove debljine, pa već treći sloj molekula povećava slojni otpor ~ 100 puta. Zato je za ispravan rad sklopnih aparata potrebno da im kontakti budu u kvazimetalnom dodiru. To se najčešće postiže mehaničkim razaranjem makroslojeva (trenjem i/ili pritiskom, ovisno o konstrukciji aparata). Kontakti s točkastim dodirom imaju u tom pogledu prednost pred plošnim kontaktima, jer uz jednaku silu na njima vlada veći tlak. U nekim slučajevima mogu i elektrostatičke privlačne sile među kontaktima biti dovoljne da plastičnim deformacijama dovedu do pucanja makroslojeva. Ako se zbog loše konstruktivne izvedbe ne uspostavi kvazimetalni dodir mehaničkim putem, doći će do električnog razaranja stranih slojeva na principu neke vrste termičkog proboja (makroslojni proboj, engl. *fritting*). Zbog visokog lokalnog zagrijavanja nastaje u razorenom dijelu sloja most od rastaljenog kontaktnog metala, koji se postepeno proširuje.

Izračunavanje provlačnog i slojnog otpora. Način analitičkog određivanja provlačnog otpora može se objasniti primjerom u sl. 3 a, koja prikazuje dva cilindrična kontakta promjera $2b$, specifičnog otpora ϱ . Kad bi se vodiči dodirivali cijelom čeonom plohom, prolazile bi strujnice jednolikom gustoćom okomito na dodirnu plohu. Ako se kontakti odvoje simetrično usađenom kuglicom promjera $2a$ zanemarljivo malog otpora, skrenut će strujnice radijalno prema kuglici. Time nastaje provlačno područje, koje je u slici shematski ograničeno sfernom plohom promjera $2b$ (crtkana linija). Za grubu aproksimaciju može se provlačnim otporom R_p smatrati povećanje otpora unutar ove plohe. Ako se otpor svake polukugle provlačnog područja u slučaju homogenog aksijalnog strujanja označi sa R_1 (sl. 3 b lijevo), a u slučaju radijalnog strujanja sa R_2 (sl. 3 c lijevo), tad je

$$R_p = 2(R_2 - R_1). \quad (1)$$

Otpor radijalnom strujanju kroz infinitezimalnu ljusku polukugle polumjera x i debljine dx (sl. 3 c desno) iznosi

$$dR_2 = \varrho \frac{dx}{2x^2\pi}.$$

U slučaju aksijalnog strujanja treba računati s otporom infinitezimalnog cilindričnog plašta polumjera x , debljine dx i visine $\sqrt{b^2 - x^2}$ (sl. 3 b desno) prema jednadžbi

$$dR_1 = \varrho \frac{\sqrt{b^2 - x^2}}{2\pi x dx}.$$

Otpori dR_2 su u seriji, a otpori dR_1 paralelni. Prema tome je

$$R_2 = \int_a^b dR_2, \quad \frac{1}{R_1} = \int_0^b \frac{1}{dR_1},$$

pa provlačni otpor na osnovu izraza (1) iznosi:

$$R_p = \frac{\varrho}{\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{2}{b} \right).$$

Kako je $b \gg a$, proizlazi

$$R_p \approx \frac{\varrho}{\pi a}.$$

Ako se kuglica polumjera a nadomjesti ravnom kružnom plohom jednakog polumjera, dobiva se nešto veći provlačni otpor

$$R_p = \frac{\varrho}{2a}. \quad (2)$$

Polumjer a stvarne dodirne plohe, nastale plastičnom deformacijom, ovisi o sili tlaka F i tvrdoći kontakta H prema jednadžbi

$$H = \frac{F}{a^2 \pi}. \quad (3)$$

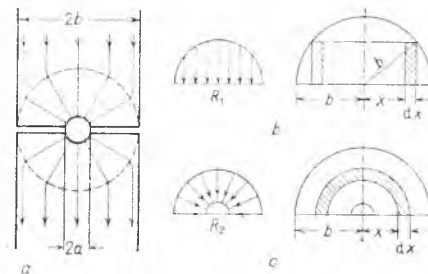
Tvrdoća kontakta H odgovara samo približno Brinellovoj tvrdoći materijala. Uvrštenjem jedn. (3) u relaciju (2) dobiva se za provlačni otpor izraz

$$R_p = \frac{\varrho}{2} \sqrt{\frac{\pi H}{F}}. \quad (4)$$

Slojni otpor kvazimetalnih kontakata može se odrediti relacijom

$$R_s = \frac{\sigma}{\pi a^2} = \frac{\sigma H}{F}, \quad (5)$$

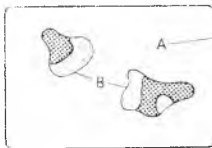
gdje je σ tzv. specifični slojni otpor (specifična dodirna površina po jedinici slojne vodljivosti). Njegova je vrijednost za sve metale reda veličine $10^{-12} \Omega \text{ m}^2$.



Sl. 3. Uz proračun provlačnog otpora: a stvaranje provlačnog područja, b homogeni aksijalni tok, c radijalni tok struje

Relacije (4) i (5) pokazuju da je provlačna komponenta kontaktnog otpora obrnuto razmjerna veličini $\sqrt{F}$, a slojna komponenta obrnuto razmjerna veličini F . Zato u aparatima slabe struje zbog malih tlakova prevladava slojni otpor, a u aparatima jake struje provlačni.

Formule (4) i (5) osnivaju se na mnoštvu pretpostavki i aproksimacija. U praksi se kontakti dodiruju na više mjesta, kojih broj i dimenzije ovise i o finoci obrade. Stvarne su dodirne plohe samo djelomično u kvazimetalnom dodiru, a zbog nejednakog tlaka dolazi na pojedinim mjestima i do elastičnih deformacija. Ove se činjenice uzimaju u obzir različnim empirijskim formulama. Glavni je rezultat navedenih razmatranja da kontaktni otpor uz zadana svojstva materijala (H , ϱ) uglavnom ovisi o sili tlaka F , a ne o ukupnoj (prividnoj) kontaktnoj površini. Nehomogenost kontaktne plohe prikazuje sl. 4, u kojoj pravokutna



Sl. 4. Prividna (A) i stvarna (B) dodirna ploha kontakta

kontura A odgovara granici prividne, a nepravilna linija B granici stvarne (mehanički opterećene) dodirne površine. Točkano označeni dijelovi predočuju područje kvazimetalnog dodira, a rasterom označena mjesta makroslojeva. Budući da kontaktni otpor R_K raste s temperaturom, utječu oblik i dimenzije kontakata indirektno na njegovu veličinu, jer određuju rashladnu površinu i toplinski kapacitet.

Starenje kontakata je promjena kontaktnog otpora u toku vremena, uzrokovana porastom debljine makroslojeva. Brzina starenja ovisi o kontaktnom materijalu i uvjetima okoline (temperaturi, vlazi, kemijskom sastavu okolnog medija). Mjerenja na bakrenim kontaktima koji su nekoliko mjeseci bili izloženi utjecaju sobne atmosfere pokazala su povećanje otpora od stotine do hiljadu puta. Uz to njihov slojni otpor raste eksponencijalno s temperaturom, koju zbog toga treba ograničiti na $\sim 100^\circ\text{C}$. Srebro je u tom pogledu znatno povoljnije, jer oksidni slojevi na njegovoj površini ne prekoračuju određenu debljinu, a pri višim temperaturama postaju nestabilni, te se opet reduciraju na čisti metal.

U procesu uklapanja dolazi do sudara među kontaktima, te oni mogu i nekoliko puta odskočiti prije nego se smire u zatvorenom položaju. Kako se pri tome svaki put javlja kratkotrajni luk koji povećava trošenje materijala, treba ovu pojavu svesti na najmanju mjeru. To se postiže prikladnom konstruktivnom izvedbom (pogodnim oblikom dodirnih ploha, primjerenom silom opruga, ispravnom masom i brzinom pokretnih dijelova) i pravilnim izborom kontaktnog materijala (njegovom gustoćom, modulom klizanja, elastičnim svojstvima).

Svojstva kontaktnih materijala koja se najčešće traže jesu već spomenuti mali kontaktni otpor, zatim loša zavarljivost i neznatno nagaranje od električnog luka. Mali otpor omogućuje trajno vođenje normalnih pogonskih struja bez prekomjernog zagrijavanja. Teško zavarivanje traži se od kontakata koji moraju trenutno voditi ili povremeno uklapati abnormalno velike struje (kratki spoj). Slabo nagaranje posebno je važno za lučne kontakte na koje se prebacuje korijen luka u procesu prekidanja.

Nijedan materijal ne može u punoj mjeri udovoljiti svim navedenim zahtjevima. Tako, primjerice, da bi kontakti otpor bio mali, metalna površina treba da je razmjerno meka i veoma čista, a da bi otpornost kontakta prema zavarivanju bila velika, materijal treba, naprotiv, da je vrlo tvrd i da mu površina bude pokrivena stabilnim stranim slojevima. Budući da kontakti nekog aparata nisu izloženi svim naprezanjima u najvišem stupnju, treba pri izboru materijala ocijeniti koja su svojstva u pojedinom slučaju najvažnija. Za izradu kontakata dolaze u obzir tri glavne skupine materijala: čisti metali, legure i sinterovane kombinacije.

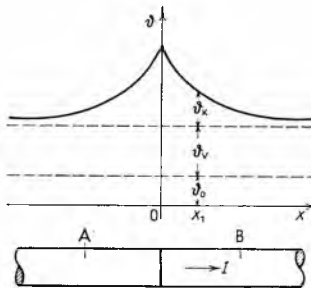
Od čistih metala, bakar zbog veoma izraženih pojava starenja nije prikladan za trajno zatvorene kontakte, ali se primjenjuje za klizne kontakte u aparatima bez intenzivnog luka. Za trajno vođenje struje mnogo je pogodnije srebro, bilo u masivnoj izvedbi bilo kao galvanska prevlaka bakrenih površina. Njegovo svojstvo rekuperacije (ponovnog taloženja isparenog metala na kontaktne plohe u zraku) omogućuje da se poveća električna trajnost aparata. Legirani metali imaju bolje mehaničke osobine i veću kemijsku otpornost, ali električna vodljivost i talište redovito su im niži od srednje vrijednosti koja odgovara miješanju komponenta. Među visokovodljive legure ubrajaju se Ag-Cu (tvrd srebro), Ag-Ni (srebro-nikal) i Ag-Cd (srebro-kadmij). Tipični je predstavnik kemijski otpornih legura Ag-Pd (srebro-paladij). Električna vodljivost sinterovanih kombinacija ovisi o načinu izrade i strukturi materijala. Jednoskeletna struktura nastaje tako da se u masu osnovne komponente umiješaju odvojena zrna druge komponente. U dvoskeletnoj strukturi vezana su zrna obiju komponenta u cjelovit skelet, oba se skeleta isprepliću, a električki su paralelno spojeni. To se postiže time što se porozni sinterovani skelet jedne komponente (volframa ili molibdena) natopi talinom druge komponente s nižim talištem (srebra ili bakra). Komponente od teško taljivih metala (Ni, W, Mo), metalnih oksida (CdO , SnO_2), karbida (WC) i grafitu (C) povećavaju otpornost prema zavarivanju, nagaranju i mehaničkom trošenju, a srebro i bakar povećavaju električnu vodljivost i žilavost.

Termičko naprezanje kontakata. Utjecaj kontaktnog otpora R_K na termička naprezanja aparata prikazuje sl. 5. Krivulja $\theta(x)$ daje prostornu razdiobu stacionarne temperature θ duž beskonačno dugih cilindričnih vodiča A i B kroz koje protječe konstantna struja I , a dodiruju se na mjestu $x = 0$ čeonim ploham. Ona se može izraziti jednadžbom

$$\theta = \theta_0 + \frac{I^2 \rho}{p S \alpha} + \frac{I^2 R_K}{2 \lambda S a} \cdot e^{-ax}.$$

Prvi član na desnoj strani jednadžbe predstavlja temperaturu okoline θ_0 , drugi zagrijanje θ_v uslijed gubitaka zbog otpora vodiča,

a treći porast temperature θ_k na mjestu x uslijed gubitaka zbog kontaktnog otpora R_K . Pri tome je ρ specifični otpor vodiča, p rashladna površina po jedinici duljine, S presjek vodiča, α koeficijent prelaza topline na okolinu, λ koeficijent toplinske vodljivosti i $a = \sqrt{\alpha p / \lambda S}$.



Sl. 5. Termičko naprezanje kontaktnog sistema. θ_0 Temperatura okoline, θ_v zagrijavanje vodiča zbog njihova otpora, θ_k zagrijavanje zbog kontaktnog otpora; A i B cilindrični vodiči koji se dodiruju

Za termičku otpornost aparata u uvjetima kratkog spoja mjerodavna je, između ostalog, i najveća udarna struja I_u koju zatvoreni kontakti mogu propustiti a da se ne zavare. Potrebna se kontaktna sila tlaka može odrediti relacijom $F_K \geq k_u I_u^2$.

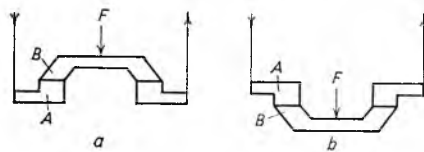
Koeficijent k_u ima za bakrene kontakte vrijednost $0,06 \text{ kp/kA}^2$.

Termičko naprezanje cilindričnog kontakta čija je čeaona ploha kratkotrajno izložena djelovanju električnog luka može se predočiti krivuljom razdiobe temperature, sličnom onoj u sl. 5. Uz samu čeonu plohu ($x = 0$) vlada veoma strmi pad temperature

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = - \frac{\theta_L}{\sqrt{\frac{\lambda \pi t_A}{c_v}}}$$

s obzirom na visoku temperaturu čeaone plohe θ_L i kratko trajanje luka t_A . Veličina c_v je specifična toplota kontakta po jedinici volumena. To znači da već na malom razmaku od čeaone plohe vlada relativno niska temperatura, što olakšava konstruktivnu izvedbu.

Utjecaj elektrodinamičkih sila na kontakte. U konstrukciji aparata treba osobitu pažnju posvetiti elektrodinamičkim silama koje u slučaju većih strujnih udara i kratkog spoja mogu opasno smanjiti kontakti tlak ili čak trenutno otvoriti kontakte. To se može spriječiti pravilnim rasporedom elemenata, kao, primjerice, izvedbom koja je prikazana na sl. 6 a, gdje zbog tendencije širenja



Sl. 6. Utjecaj elektrodinamičkih sila na kontakti pritisak. a Povoljna izvedba, b nepovoljna izvedba; A nepomični kontakt, B pomični kontakt, F smjer djelovanja elektrodinamičke sile

strujne petlje elektrodinamička sila F pojačava tlak pomičnog kontakta B na nepomični kontakt A. Nepovoljnu izvedbu, u kojoj se pod utjecajem velikih struja kontakti nastoje otvoriti, prikazuje sl. 6 b.

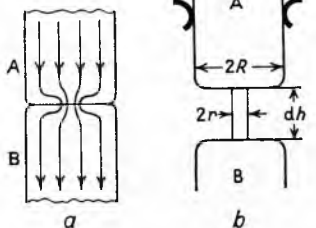
Odbojne sile među zatvorenim kontaktima nastaju već zbog neizbježne koncentracije struje na mjestima stvarnog dodira. Kao što se vidi u sl. 7 a, uz same se čeaone plohe dijelova A i B javljaju paralelne strujnice suprotnog smjera, koje se međusobno odbijaju. Sl. 7 b prikazuje kontakti sistem koji je sastavljen od jednog pomičnog dijela A i dva nepomična dijela B i C. Virtualnim pomakom dijela A za iznos dh povećava se induktivitet strujnoga kruga za iznos dL , jer dio masivnog vodiča

polumjera R ustupa mjesto tankoj strujnoj stazi polumjera r , koji odgovara veličini stvarne dodirne plohe. Ovakva dva elementa jednake duljine i različitog promjera proizvode uz jednaku struju različite magnetske tokove. Promjena induktiviteta iznosi

$$dL = \frac{\mu_0 dh}{2\pi} \ln \frac{R}{r},$$

gdje je $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m permeabilnost nemagnetskog materijala. Stoga se uz zadanu struju i dobiva na kontaktu odbojna sila

$$F_K = \frac{i^2}{2} \cdot \frac{dL}{dh} = \frac{\mu_0 i^2}{4\pi} \ln \frac{R}{r}.$$



Sl. 7. Određivanje odbojnih sila među kontaktima

Procesi uklapanja i prekidanja struje

Prilikom skapanja strujnih krugova javlja se među kontaktima aparata električni luk. *Uklapni luk* pali se u trenutku kad se kontakti približe na probojni razmak, a iščezava u trenutku njihova spajanja. *Isklapni luk* nastaje prekidom metalnog dodira i traje do trenutka gašenja, koji ovisi o karakteristikama aparata i strujnoga kruga.

U pogledu gašenja luka postoji načelna razlika između krugova istosmjerne i krugova izmjenične struje. Radi gašenja luka istosmjerne struje treba stalno povećavati njegov otpor, da bi se struja u krugu smanjila ispod minimalnog iznosa potrebnog za njegovo stabilno održavanje. Luk izmjenične struje sam se od sebe trenutno gasi u svakoj nultočki sinusne struje, ali nakon toga ostaje među kontaktima relativno vruć i visoko ioniziran medij, tzv. *rezidualni stupac*. Za definitivno gašenje luka treba rezidualnom stupcu naglo povećati otpor i dielektričnu čvrstoću, da bi se spriječilo ponovno paljenje luka.

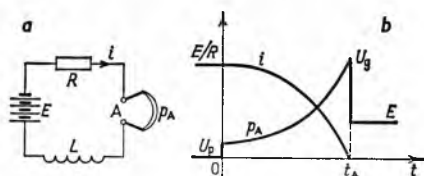
Gašenje istosmjernog luka. Za induktivni krug istosmjerne struje prema sl. 8 a vrijedi jednakdžba

$$E = Ri + L \frac{di}{dt} + p_A,$$

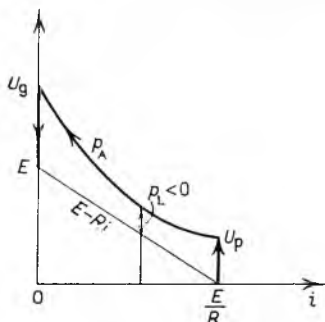
ili

$$L \frac{di}{dt} = (E - Ri) - p_A = p_L, \quad (6)$$

gdje su p_A i p_L padovi napona u luku i na induktivitetu L . Da bi



Sl. 8. Prekidanje istosmjerne struje. a Strujni krug s prekidačem A, b vremenska promjena struje i napona među kontaktima prekidača; i struja, p_A napon izvora, E napon luka, U_p napon paljenja, U_g napon gašenja, t_A trajanje luka



Sl. 9. Međusobni položaj karakteristike mreže $(E - Ri)$ i karakteristike luka $p_A(i)$ u slučaju nestabilnosti luka

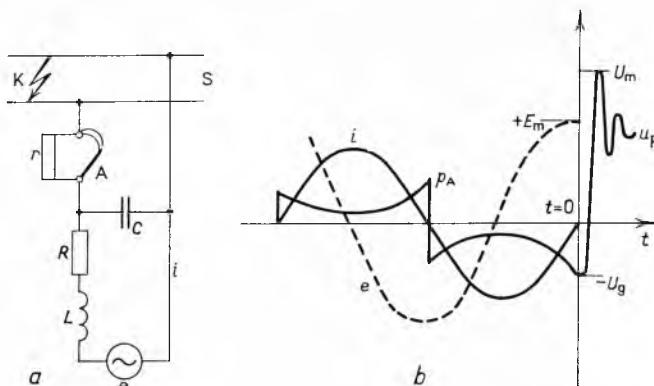
se luk ugasio, mora se struja stalno smanjivati ($di/dt < 0$), što se prema relaciji (6) svodi na uvjet $p_L < 0$, odnosno

$$p_A > E - Ri,$$

poznat kao kriterij nestabilnosti luka. Iz dijagrama u sl. 9 proizlazi da napon luka $p_A(i)$ treba pravilnom izvedbom aparata podignuti iznad karakteristike mreže $U = E - Ri$, što se npr. postiže razvlačenjem

luka na potrebnu duljinu (v. *Električna pražnjenja u plinovima*, TE 3, str. 686). Tok procesa pri isklapanju pokazuju u dijagramu $p_A(i)$ strelice, a vremensku promjenu struje i napona među kontaktima prekidača A dijagram u sl. 8 b. Vrijednosti U_p i U_g odgovaraju naponu paljenja i gašenja luka.

Gašenje izmjeničnog luka. Pojave pri gašenju izmjeničnog luka mogu se objasniti na temelju sheme prikazane u sl. 10a, koja odgovara prekidanju kratkog spoja na stezaljkama aparata.



Sl. 10. Prekidanje izmjenične struje. a Shema strujnoga kruga, b vremenska promjena struje i napona; e elektromotorna sila generatora tjemene vrijednosti E_m , p_A napon luka, u_p prelazni povratni napon amplitude U_m , i struja; A prekidač s paralelno spojenim otpornikom r , S sabirnice, K mjesto kratkog spoja

Generator izmjeničnog napona priključen je na sabirnice s pomoću prekidača A, kojemu su kontakti premošteni paralelnim otporom r . Veličine L , R , C predočuju induktivitet, otpor i kapacitet generatorskog namota i kruga između generatora i mjesta kratkog spoja K. S obzirom na induktivni karakter kruga zaostaje struja i za $\sim 1/4$ periode iza elektromotorne sile e (sl. 10 b). Luk koji je nastao otvaranjem aparata gasi se u jednom od prirodnih prolaza struje kroz nulu (trenutak $t = 0$). Pri tome napon p_A na kontaktima prekidača A s nekoliko titraja naglo prelazi od negativne vrijednosti napona gašenja luka $-U_g$ na pozitivnu tjemenu vrijednost generatorskog napona $+E_m$. Međutim, njegova prva amplituda U_m može teoretski doseći vrijednost $2E_m + U_g$. Napon koji se javlja na kontaktima aparata nakon gašenja luka zove se *povratni napon*, njegov početni dio u_p (u kojem se još zapaža utjecaj prolazne komponente) *prijelazni povratni napon*, a njegov dalji tok *povratni napon pogonske frekvencije*.

Prema sl. 10 može se u kratkom intervalu neposredno nakon gašenja izmjenični napon izvora $e = E_m \cos \omega t$ nadomjestiti konstantnim naponom E_m , a zadani strujni krug ekvivalentnom shemom prikazanom u sl. 11. Primjenom Kirchhoffovih zakona

Sl. 11. Ekvivalentna shema kruga u sl. 10

$$\left. \begin{aligned} E_m &= Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i_0 dt, \\ i &= i_r + i_0, \\ u_p &= r i_r = \frac{1}{C} \int i_0 dt, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

uz početni uvjet $t = 0 \Rightarrow u_p = -U_g$ i uz pretpostavku periodičke promjene napona, tj.

$$\frac{1}{4} \left(\frac{R}{L} - \frac{1}{rC} \right)^2 < \frac{1}{LC},$$

dobiva se rješenje

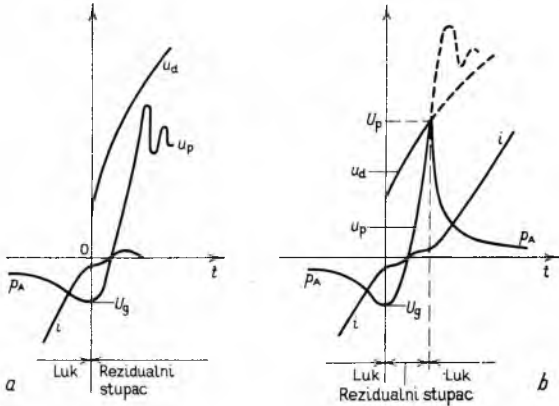
$$u_p = E_m - (E_m + U_g) \left(\frac{\kappa}{\omega_0} \sin \omega_0 t + \cos \omega_0 t \right) e^{-\kappa t}. \quad (8)$$

Koeficijent prigušenja κ i kružna frekvencija povratnog napona

ω_0 ovise o parametrima kruga (R, L, C) i aparata (r):

$$\left. \begin{aligned} \kappa &= \frac{1}{2} \left(\frac{R}{L} + \frac{1}{rC} \right), \\ \omega_0 &= \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{1}{4} \left(\frac{R}{L} - \frac{1}{rC} \right)^2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Za uspješno prekidanje izmjenične struje (sl. 12 a) treba, prema J. Slepianu, tako brzo povećavati dielektričnu čvrstoću rezidualnog stupca da njegov probojni napon u_d bude stalno iznad povratnog napona u_p . U suprotnom slučaju (sl. 12 b) dolazi do ponovnog paljenja luka.



Sl. 12. Pojave u intervalu gašenja luka. a Luk definitivno ugašen jer je probojni napon u_d stalno viši od povratnog napona u_p , b krivulja u_p siječe liniju u_d te pri naponu U_p dolazi do ponovnog paljenja luka

U stvarnosti su pojave mnogo složenije, jer otpor rezidualnog stupca ne može u momentu $t = 0$ trenutno porasti na beskonačnu vrijednost, kao što je pretpostavljeno u jednadžbama (7). Zato umjesto dielektričnog proboja može nastupiti i termički proboj, što ovisi o energetskim prilikama u stupcu. Za termički je proboj mjerodavan otpor R_A rezidualnog stupca, koji ograničava snagu u_p^2/R_A , tj. ugrijavanje stupca pod utjecajem povratnog napona.

Otpor R_A djeluje i na tok povratnog napona u_p , analogno porednom otporu r u sl. 10 i relaciji (9), a napon u_p na promjenu otpora R_A ugrijavanjem stupca. U procesima prekidanja dolazi, prema tome, do međusobnog djelovanja (interakcije) prekidača i mreže.

Energetske teorije luka. Za rješavanje prijelaznih pojava u procesima prekidanja treba uz konstantne elemente kruga R, L, C poznavati i varijabilni ukupni otpor luka $R_A = p_A/i$, odn. njegovu dinamičku karakteristiku $p_A = f[i(t)]$. Za razliku od statičke naponsko-strujne karakteristike luka (v. članak *Električna pražnjenja u plinovima*, TE 3, str. 686), koja se snima uz konstantne vrijednosti struje i za koju postoji niz analitičkih izraza (H. Ayrton, W. B. Nottingham, Elenbaas-Heller, Engel-Steenbeck), dinamička se karakteristika mjeri uz vremenski promjenljivu struju, te uzima u obzir efekte toplinske tromosti lučne plazme.

Energetsku ili dinamičku teoriju luka razvili su A. M. Cassie i O. Mayr uzevši u obzir da njegova električna vodljivost $1/R_A$ po jedinici duljine raste s količinom topline Q koja je u jedinici duljine luka akumulirana:

$$\frac{1}{R_A} = F(Q). \quad (10)$$

Promjenu akumulirane topline određuje razlika između strujom proizvedene i hlađenjem odvedene topline prema jednadžbi H. Th. Simona

$$dQ = (P_A - P_h) dt = (i^2 R_A - P_h) dt, \quad (11)$$

u kojoj P_A i P_h označuju snagu luka i snagu hlađenja po jedinici duljine. Iz relacija (10) i (11) dobiva se jednadžba

$$-\frac{1}{R_A} \cdot \frac{dR_A}{dt} = \frac{dF}{dQ} (i^2 R_A - P_h), \quad (12)$$

koja određuje općenite veze između električnih i toplinskih parametara dinamičkog luka. Kad bi se za $F(Q)$ i snagu hlađenja P_h pokušali uvrstiti točni izrazi, postao bi račun veoma složen. Zato se u praksi zadovoljavamo određenim aproksimacijama koje dopuštaju eliminaciju spomenutih veličina.

Cassie pretpostavlja jednaku i konstantnu temperaturu u svim točkama lučnog stupca. Zbog toga su konstantni specifični otpor $\varrho = R_A S$ i sadržaj topline u jedinici volumena Q/S , gdje je S presjek luka, tj. volumen po jedinici duljine. On pretpostavlja i volumensko hlađenje uz konstantan odvod topline po jedinici volumena P_h/S . Uz ove se aproksimacije može, na osnovi relacije (12), veza između otpora i struje luka odrediti diferencijalnom jednadžbom

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{R_A} \right) + \frac{2}{\tau} \cdot \frac{1}{R_A} = \frac{2}{\tau E_s} i^2. \quad (13)$$

Veličina $\tau = Q/P_h = \text{konst.}$ je vremenska konstanta kojom luk gubi električnu vodljivost kad mu se prekine dovod energije, a $E_s = \sqrt{\varrho P_h/S} = \text{konst.}$ gradijent je potencijala statičkog luka, tj. električno polje stupca u uvjetima toplinske ravnoteže (kad je $E_s \cdot i = P_h$).

Mayr polazi od pretpostavke površinski hlađenog luka iz kojeg se odvodi konstantna snaga $P_h = P_0$, a vezu između sadržaja topline i vodljivosti aproksimira relacijom

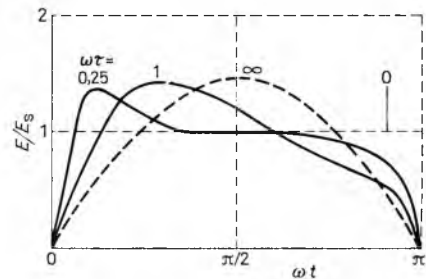
$$\frac{1}{R_A} = K e^{Q/Q_0},$$

gdje su K i Q_0 konstante. Q_0 je količina energije koju treba dovesti jedinici duljine luka da mu se vodljivost poveća za faktor $e = 2,718...$ Ako se spomenute aproksimacije uvedu u jednadžbu (12), dobiva se relacija

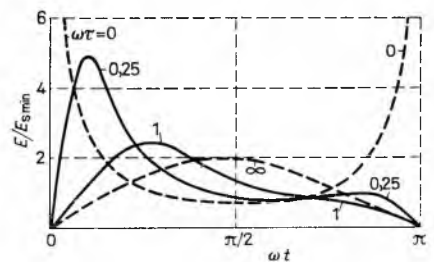
$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{R_A} \right) + \frac{1}{\tau} \cdot \frac{1}{R_A} = \frac{1}{\tau P_0} i^2, \quad (14)$$

u kojoj je $\tau = Q_0/P_0 = \text{konst.}$ vremenska konstanta luka.

S matematičkog stanovišta obje opisane teorije podjednako odgovaraju praktičkim zahtjevima. U fizikalnom pogledu Cassiejeva teorija vjernije opisuje luk jake struje, čiji je gradijent praktički neovisan o struji, a Mayrova je prikladnija za područje manjih struja s izrazito hiperboličnom karakteristikom luka.



Sl. 13. Gradijent luka sinusne struje po Cassieu



Sl. 14. Gradijent luka sinusne struje po Mayru

Prekidom struje u trenutku $t = 0$ dolazi do eksponencijalnog porasta otpora u rezidualnom stupcu:

$$R_A = R_0 e^{t/\tau}, \quad (15)$$

što proizlazi iz obje relacija (13) i (14) ako se stavi $i = 0$. Po

takvom bi se zakonu mijenjao otpor kad se nakon gašenja ne bi pojavila rezidualna struja uslijed povratnog napona. Jednadžba (15) pokazuje da je za efikasno prekidanje poželjna što manja vremenska konstanta medija za gašenje.

Na temelju jednadžbi (13) i (14) mogu se za različite krivulje struje $i = f(t)$ izračunati krivulje otpora luka $R_a(t)$ i gradijenta $E(t) = R_a i$. Uz pretpostavku da u luku teče sinusna struja jakosti $i = I_m \sin \omega t$, dobiva se prema relaciji (13)

$$E \approx \frac{E_s \sqrt{2} \sin \omega t}{\sqrt{1 - \frac{\sin(2\omega t + \varphi)}{1 + (\omega\tau)^2}}},$$

a iz jednadžbe (14) slijedi

$$E \approx \frac{2 E_{s \max} \sin \omega t}{1 - \frac{\sin(2\omega t + \varphi)}{1 + (\omega\tau)^2}}.$$

Pri tome je $\varphi = \arccot \cot \omega\tau$, $E_{s \max} = P_0/I_m$. Dijagrami u sl. 13 i 14 daju grafički prikaz navedenih rezultata.

Vremenska konstanta τ luka je, ovisno o konstrukciji aparata i vrsti medija za gašenje, reda veličine $10^{-6} \dots 10^{-4}$ s.

Energetska se teorija može jednako uspješno primijeniti i na rezidualni stupac duljine l , za koji se Mayrova relacija (14) može napisati u modificiranom obliku

$$\frac{dR_A}{dt} - \frac{R_A}{\tau} = - \frac{u_p^2}{\tau P_{t0}}. \quad (16)$$

Novo uvedene oznake imaju ova značenja: $R_A = l R_a$ je ukupni otpor stupca, $u_p = l E$ je povratni napon i $P_{t0} = l P_0$ je ukupna snaga hlađenja.

Uz neki zadani oblik povratnog napona $u_p(t)$ dobiva se s pomoću jednadžbe (16) zakon promjene otpora $R_A(t)$, odnosno rezidualna struja $i(t) = u_p/R_A$. Početni se dio povratnog napona često može aproksimirati linearnim porastom

$$u_p = s \cdot t,$$

što uvršteno u izraz (16) vodi do rezultata

$$R_A = e^{t/\tau} \left(R_{A0} - \frac{2 s^2 \tau^2}{P_{t0}} \right) + \frac{2 s^2 \tau^2}{P_{t0}} \left(1 + \frac{t}{\tau} + \frac{t^2}{2 \tau^2} \right).$$

Da bi se otpor stupca stalno povećavao, mora prvi izraz u zagradi ostati pozitivan, što znači

$$s \leq \frac{\sqrt{P_{t0} R_{A0}}}{\sqrt{2} \tau}. \quad (17)$$

Ovom uvjetu mora udovoljavati najveća strmina povratnog napona, da ne dođe do ponovnog termičkog paljenja luka. Pretpostavi li se još i pravilan sinusni oblik zadnjeg poluvala struje u luku, $i = I \sqrt{2} \sin \omega t$, određen je time i početni otpor rezidualnog stupca

$$R_{A0} = \frac{u_p(0)}{i(0)} = \frac{\left(\frac{du_p}{dt} \right)_0}{\left(\frac{di}{dt} \right)_0} = \frac{s}{I \omega \sqrt{2}}. \quad (18)$$

Spajanjem jednadžbi (17) i (18) dobiva se najveća efektivna vrijednost struje

$$I \leq \frac{P_{t0}}{2 \sqrt{2} s \tau^2 \omega}$$

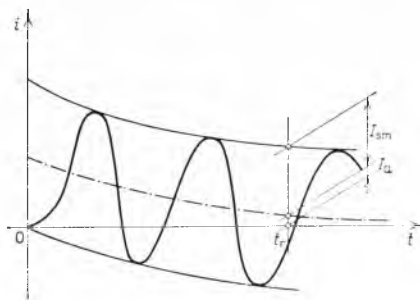
koju aparat može prekinuti uz navedene uvjete.

Definiranje osnovnih karakteristika aparata. Za tehničku je praksu vrlo važna mogućnost objektivnog uspoređivanja karakteristika aparata i uvjeta ispitivanja. Kako su povratni napon i prekidna struja dva glavna faktora koji otežavaju prekidanje, to se i ispitni krugovi definiraju tzv. prirodnim strujama kratkog spoja i prirodnim povratnim naponima, koji nisu deformirani utjecajem aparata. Oni bi se pojavili djelovanjem »idealnog« prekidara, čiji je otpor, odnosno napon luka do momenta definitivnog prekida struje jednak nuli, a zatim trenutno postaje beskonačan.

Prirodni povratni napon može se za krug prema sl. 10 odrediti jednadžbama (7) do (9) ako se stavi za napon gašenja $U_g = 0$, za poredni otpor aparata $r = \infty$ i za struju koja teče kroz taj otpor $i_r = 0$.

U pogonu se javljaju također slučajevi kad prijelazni povratni napon može poprimiti visoku tjemenu vrijednost ili veliku strminu. Tipični su primjeri: prekidanje malih kapacitivnih struja neopterećenih dalekovoda ili kabela, prekidanje malih induktivnih struja neopterećenih transformatora, sklapanje kondenzatorskih baterija, prekidanje kratkog spoja na maloj udaljenosti (»kilometrički kvar«), razdvajanje dvaju sistema van sinhronizma (opozicija faza), itd. Uzroci zbog kojih se u spomenutim slučajevima javljaju prenaponi veoma su različiti (uzastopno nabijanje kapaciteta, naglo rezanje struje u blizini prirodne nultocke, refleksija putnih valova, zakretanje vektora napona).

Prekidna struja je faktor mjerodavan za stupanj ionizacije prostora među kontaktima, kojemu treba što brže vratiti dielektrična svojstva. Prekidna se struja I_s mjeri efektivnom vrijednošću simetrične komponente struje $I_s = I_{sm}/\sqrt{2}$ u trenutku paljenja luka t_r , kako je to prikazano u sl. 15. Najveća vrijednost prekidne struje, za koju je aparat građen, zove se *prekidna moć*, te se smatra jednom od glavnih karakteristika prekidača i sklopki. Prekidna je



Sl. 15. Određivanje prekidne struje iz oscilograma. I_{sm} simetrična komponenta struje, I_a aperioidična komponenta struje, t_r trenutak paljenja luka (prekida dodira među kontaktima)

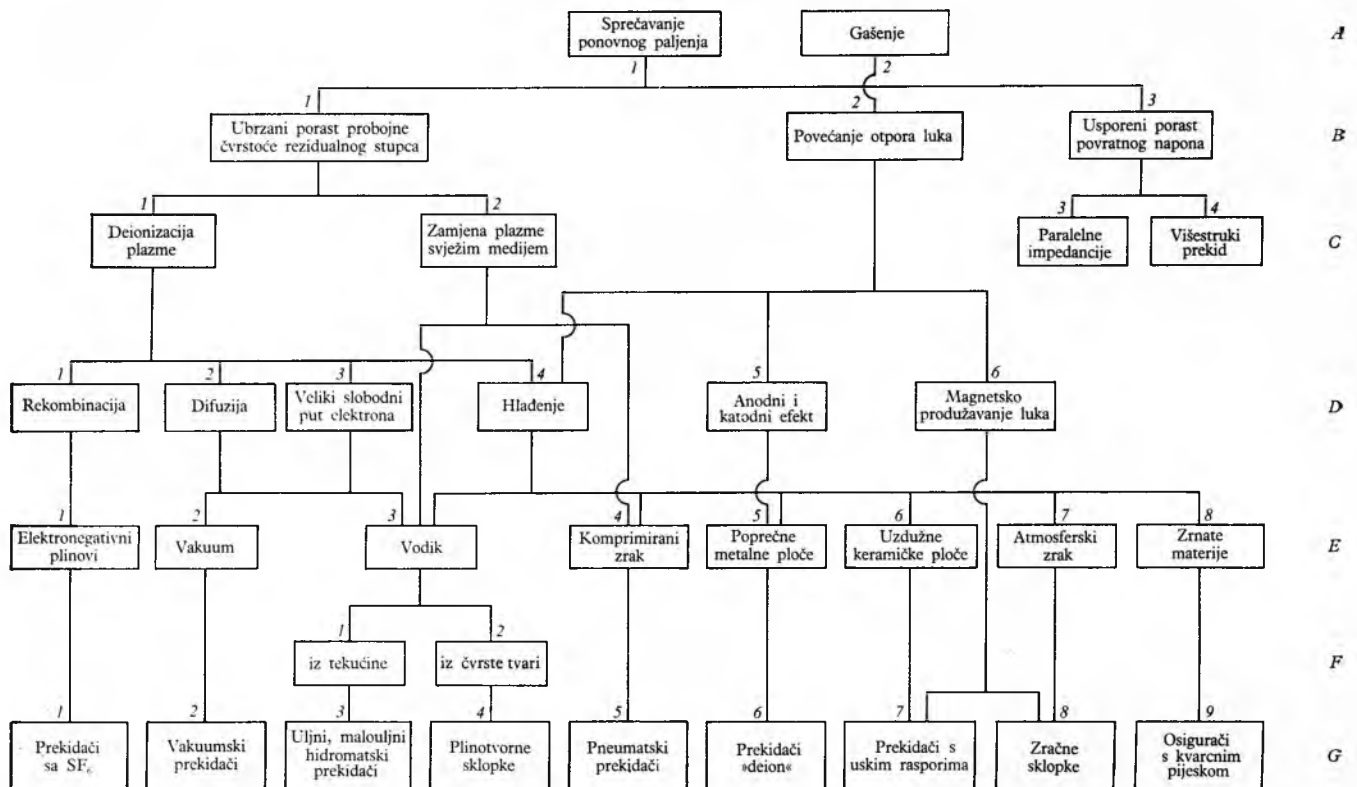
moć jednoznačno određena samo ako se istodobno navede uz koje se ispitne uvjete, uz kakav maksimalni povratni napon i uz koliki udio aperioidične komponente struje I_a/I_s može garantirati njen iznos. Za krugove istosmjerne struje bitna je i vremenska konstanta kruga L/R .

Budući da i povratni napon i prekidna struja otežavaju gašenje luka, može se i njihov produkt smatrati mjerilom naprezanja aparata u procesu prekidanja. Na taj je način stvoren pojam *prekidne snage* $P_s = k U_p I_s$, gdje U_p označava efektivnu vrijednost linijskog povratnog napona pogonske frekvencije, a $k = 1$ za jednofazni, $k = \sqrt{3}$ za trofazni sistem. Najveća dopuštena vrijednost P_s zove se također *prekidna moć*, pa se ovako definirana veličina (u MVA) donedavna mnogo upotrebljavala u tehnici visokonaponskih aparata. U novije se vrijeme za čitavo naponsko područje usvaja jedinstvena definicija prekidne moći na bazi prekidne struje (u A ili kA).

Dinamička i termička naprezanja aparata prilikom uklapanja ovise u prvom redu o *uklopnjoj struji* koja se pojavljuje neposredno nakon uklopa. Drugi faktor o kojemu ovise ta naprezanja jest napon, jer o njemu ovisi hoće li se među kontaktima i na kojem razmaku upaliti električni luk. Zato se *uklopna moć* sklopnog aparata definira kao najveća dopuštena uklopna struja pod određenim naponom.

Sistemi gašenja luka

Električni je luk po mnogim svojstvima i tehnički i ekonomski veoma povoljan isklonni element. On sprečava diskontinuirani prekid struje, koji bi izazvao nedopustivo visoke prenapone, a ujedno omogućava prekidanje izmjenične struje u prirodnoj nultocki bez posebnih uređaja za sinhronizaciju. Glavni je problem pri konstrukciji sklopnog aparata da se trajanje električnog luka ograniči na najmanju mjeru, kako bi se smanjilo njegovo razorno djelovanje i skratio proces isklapanja.



Sl. 16. Principi gašenja luka

Sl. 16 daje shematski pregled najvažnijih načina gašenja luka i uspostavljanja probojne čvrstoće u lučnim komorama aparata. U shemi se vidi kako primjena različitih fizikalnih principa dovodi do glavnih tehničkih rješenja. U pojedinoj konstrukciji, dakako, redovito se isprepliću više različitih procesa, ali se neki od njih mogu smatrati bitnima za dotičnu izvedbu. Shema je sastavljena tako da se redovi A...D odnose na fizikalne procese, E i F na medij za gašenje luka, a G na tehničku realizaciju, odn. tip aparata. Procesni označeni u sl. 16 predstavljaju dva osnovna sistema prekidanja u lučnim aparatima: sprečavanje ponovnog paljenja (A1), tipično za aparate izmjenične struje, i gašenje (A2), karakteristično za aparate istosmjerne struje. Ponovno se paljenje sprečava ubrzanim porastom probojne čvrstoće (B1) ili usporenim porastom povratnog napona (B3), a za prisilno gašenje treba povećavati otpor luka (B2). Porast probojne čvrstoće ubrzava se ili tako da se rezidualna plazma deionizira (C1) ili tako da se ona potiskuje iz lučne komore i nadomješta svježim medijem (C2). Strmina i visina povratnog napona mogu se ograničiti bilo prigradnjom paralelnih otpornika ili kondenzatora (C3) bilo primjenom višestrukog prekida (C4), tj. serijskim vezanjem dviju ili više lučnih komora tako da na svaku otpada samo dio povratnog napona. Neke pojedinosti o fizikalnim procesima (D1...D6) sadržane su u opisu pojedinih sistema aparata.

Tehničke izvedbe (G) lučnih aparata, navedene u sl. 16, mogu se analogno slici 1 (grupe 111 i 112) podijeliti u dvije skupine prema tome da li za gašenje luka troše poseban medij (plin, tekućinu, plinotvornu čvrstu tvar) ili ne. U nekim se aparatima s posebnim medijem (uljni, malouljni, hidromatski, plinotvorni) luk gasi smjesom plina i pare koja se djelovanjem topline luka razvija iz tekućine ili čvrste tvari. Zato njihov intenzitet gašenja ovisi o jakosti struje koja se prekida. Drugim se aparatima iste skupine (pneumatskim, sa SF₆) plin dovodi iz posebnog izvora, te je njihov intenzitet gašenja u načelu neovisan o prekidnoj struji. Prema tome se aparati s posebnim medijem mogu podijeliti na aparate za zavisnom i aparate s nezavisnom karakteristikom gašenja. Neki autori dijele lučne sklopne aparate na aparate s kratkim lukom (sistem »deion«, u sl. 16 označen sa G6, i mnogi niskonaponski sklopni aparati izmjenične struje) i sklopne aparate s dugačkim lukom.

SKLOPNI APARATI VISOKOG NAPONA

Visokonaponskim sklopnim aparatima nazivaju se prema preporukama Međunarodne elektrotehničke komisije IEC (International Electrotechnical Commission) sklopni aparati za energetske sisteme izmjeničnog napona iznad 1000 V i istosmjernog napona iznad 1200 V, a prema propisima Saveza njemačkih elektrotehničara VDE (Verband deutscher Elektrotechniker) aparati za izmjenične napone iznad 1000 V i istosmjerne napone iznad 3000 V.

Visokonaponski prekidači

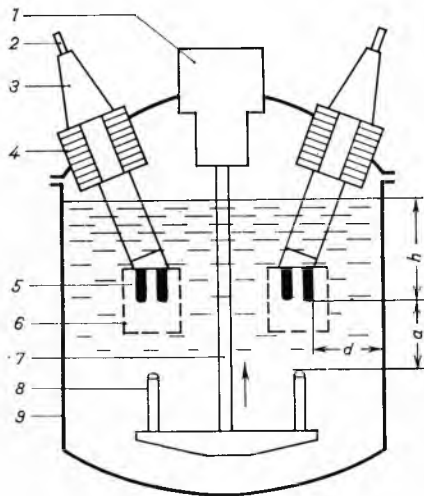
Danas se u mrežama i postrojenjima primjenjuje velik broj tipova prekidača koji se osnivaju na principima gašenja luka prema sl. 16 (posljednji red). Neki od najvažnijih opisani su u nastavku.

Uljni prekidači sadrže čvrsto građen čelični kotao s velikom količinom ulja, koje služi i za gašenje luka i za izolaciju prema uzemljenoj masi. Veće jedinice imaju svaki pol prekidača smješten u posebnom rezervoaru; u manjim trolinim aparatima smještene su sve tri faze u zajednički kotao, pa ovdje ulje služi i kao međufazna izolacija. U starijim se izvedbama luk slobodno razvijao u velikoj masi ulja, pa se tlak plinova izravno prenosio na stijene kotla; u suvremenim konstrukcijama kontakti su zatvoreni u posebne lučne komore. Shematski presjek uljnog prekidača prikazuje sl. 17.

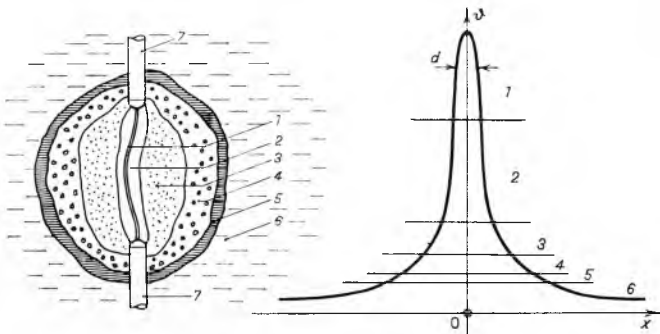
Kotao prekidača 9 napunjen je do određene visine uljem. Zračni jastuk iznad njegove površine ublažava porast tlaka za vrijeme gorenja luka. Provodni izolatori 3 na poklopcu kotla nose priključne stezaljke 2, nepomične kontakte 5 s lučnim komorama 6 i eventualno strujne transformatore 4 za napajanje zaštitnih uređaja. Na poklopcu je montiran pogonski mehanizam 1, koji pomoću izolacionih motki 7 pokreće pomične kontakte 8.

Toplina električnog luka koji se prilikom isklapanja javlja među kontaktima rastvori i ispari određenu količinu ulja. Na taj se način oko luka stvori plinski mjehur; njegov sastav i prostorna razdioba temperature $\theta(x)$ u njemu shematski su prikazani u sl. 18. U jezgri luka 1 vlada najviša temperatura; ona tamo doseže 10 000...15 000 K, već prema sastavu i tlaku plina. Jezgra luka, kojom prolazi gotovo cjelokupna struja, zauzima oštro ograničeni prostor promjera d . Ona je opkoljena uskim plaštem plina 2, u kojem se temperatura vrlo brzo spušta na 500...800 K. Zona 3 sastoji se uglavnom od pregrijane, a zona 4 od zasićene uljne pare. Mjehur je ograničen tankim slojem tekućine 5 temperature vrelišta, a

preostali dio ulja 6 nalazi se praktički na temperaturi okoline. Luk, prema tome, gori u plinovitom mediju koji se pretežno sastoji od vodika. Za odlična svojstva gašenja tog medija treba u prvom redu



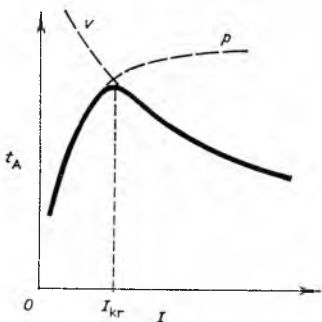
Sl. 17. Shematski presjek uljnog prekidača sa $n = 2$ prekidna mjesta po fazi. 1 Pogonski mehanizam, 2 priključna stezaljka, 3 provodni izolator, 4 strujni transformator, 5 nepomični kontakt, 6 lučna komora, 7 izolaciona motka, 8 pomični kontakt, 9 kotao prekidača, h visina ulja iznad kontakata, a hod kontakata, d najmanji razmak kontakata od stijene kotla



Sl. 18. Sastav i temperatura plinskog mjehura. 1 Jezgra luka, 2 plašt plina, 3 pregrijana uljna para, 4 zasićena uljna para, 5 sloj tekućine na temperaturi vrelišta, 6 ulje, 7 kontakti

zahvaliti njegovoj visokoj toplinskoj vodljivosti i velikoj brzini difuzije čestica u njemu. Ovisno o konstrukciji aparata, toplina se iz luka odvodi bilo s njegove površine (*površinsko ili vanjsko hlađenje*) bilo iz njegove unutrašnjosti (*volumensko ili unutrašnje hlađenje*). Prvi je način tipičan za luk koji gori u mirnom mediju ili u sredstvu koje laminarno struji uz njegovu površinu, a drugi za luk s poprečnim ili vrtložnim strujanjem medija kroz čitav prostor što ga luk zauzima. Deionizacija rezidualnog stupca (v.

str. 119) površinskim hlađenjem u vodik naziva se vodikovim efektom. Količina plina i pare koja se u procesu prekidanja oslobađa iz tekuće ili čvrste materije proporcionalna je energiji luka, a određuje se relacijom B. Bauera: $V_0 = c_0 W_A$, u kojoj je V_0 volumen plina reduciran na tlak 1 at i temperaturu 293 K, W_A energija luka, c_0 tzv. Baurov koeficijent, koji za ulje ima vrijednost $60 \text{ cm}^3/\text{kWs}$ a za destiliranu vodu $5 \cdot 10 \text{ cm}^3/\text{kWs}$. Odavde proizlazi da tlak i strujanje plina ovise o jakosti prekidne struje, tj. da tekućinski prekidači imaju po pravilu *zavisnu*



Sl. 19. Trajanje luka t_A kao funkcija izmjenične prekidne struje I u aparatima sa zavisnom karakteristikom gašenja. p Površinsko hlađenje, v volumensko hlađenje, I_{kr} kritična struja

karakteristiku gašenja. U području manjih struja redovito prevladava površinsko hlađenje, a uz veće struje volumensko. Sl. 19 prikazuje ovisnost trajanja luka t_A o jakosti izmjenične prekidne struje I , pri čemu krivulja p odgovara površinskom, a krivulja v volumenskom hlađenju. Iz dijagrama se vidi da će aparat najteže prekinuti neku kritičnu struju I_{kr} uz koju je trajanje luka najveće.

Analiza elementarnih procesa u rezidualnom stupcu luka. F. Kesselring i F. Koppelman proveli su računsku analizu elementarnih procesa u površinski hlađenom rezidualnom stupcu i pokazali da je iščezavanje nabijenih čestica za stupac početnog promjera od nekoliko milimetara prvenstveno uzrokovano ambipolarnom difuzijom. To znači da negativni elektroni difundiraju iz vrućeg stupca povlačeći za sobom elektrostatičkim silama pozitivne ione, a neutralni plin difundira u stupac. Ako je N srednja prostorna gustoća elektrona u stupcu (broj elektrona u jedinici volumena), N_0 njena početna vrijednost u momentu gašenja luka, d početni promjer rezidualnog stupca, t vrijeme, a b_1 pokretljivost plinskih iona (tj. brzina po jedinici jakosti električnog polja), određena je vremenska promjena $N(t)$ jednadžbom

$$\ln N \approx \ln N_0 - 10 \cdot \frac{4}{\pi} b_1 U_e \frac{t}{d^2}. \quad (19)$$

Veličina U_e je elektronvolti ekvivalent temperature, tj. razlika potencijala koju bi elektron morao preletjeti da bi se iz stanja mirovanja ubrzao do najvjerovatnije brzine čestica u vrućem stupcu temperature T . Uz ovu brzinu iznosi njegova kinetička energija

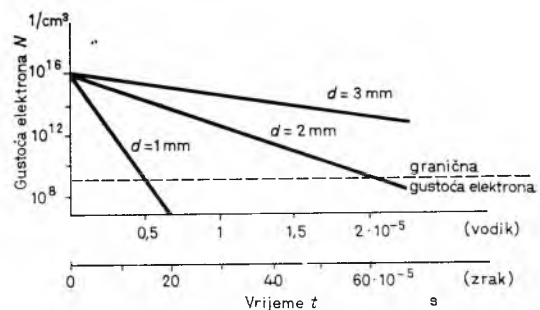
$$U_e e = k T,$$

gdje je e električni naboj elektrona, a k Boltzmannova konstanta. Ako se u tu jednadžbu uvrste brojčane vrijednosti $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ i $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$, dobije se brojčana jednadžba

$$U_e = 8,63 \cdot 10^{-5} T, \quad (20)$$

iz koje se može izračunati napon U_e u voltima iz temperature T u kelvinima.

Funkciju $N(t)$ koja je izražena jednadžbom (19) prikazuju kosi pravci u sl. 20. Dijagram sl. 20 odgovara nekoj odabranoj početnoj vrijednosti N_0 (u slici $N_0 = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) i odabranoj temperaturi T (odn. njezinoj funkciji U_e). Zbog znatno veće pokretljivosti vodikovih iona smanjuje se koncentracija naboja mnogo brže u vodik nego u zraku. U slici se vidi da će se brže deionizirati stupac manjeg početnog promjera d , koji odgovara manjoj prekidnoj struji. Horizontalni crtkani pravac odgovara donjoj granici gustoće naboja od 10^8 elektrona po cm^3 , ispod koje više nema vjerojatnosti za ponovno paljenje luka.



Sl. 20. Deionizacija rezidualnog stupca difuzijom. N srednja prostorna gustoća elektrona, d početni promjer rezidualnog stupca, t vrijeme

Analogan utjecaj početnog promjera d i medija za gašenje vidi se u dijagramu sl. 21, koji pokazuje vremensku promjenu temperature T površinski hlađenom rezidualnog stupca u vodik i zraku. Ispod 3000 K iščezava termička ionizacija, koja je glavni izvor elektrona, a hlađenjem se ujedno povećava probojna čvrstoća plina.

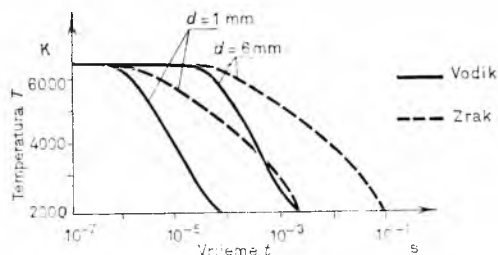
Pretpostavljajući da za plin u mjehuru vrijede zakoni idealnih plinova, dobiva se da mjehur u kotlu zauzima volumen

$$V = V_0 \cdot \frac{p_0}{p} \cdot \frac{T}{T_0},$$

gdje je p stvarni tlak i T stvarna temperatura plina, a p_0 i T_0 tlak i temperatura standardnog stanja (1 at i 293 K). Zbog toga se podiže razina ulja, te se prvotni volumen zračnog jastuka V_z smanjuje na iznos $V_z - V$, a tlak mu se povisi od početne vrijednosti p_0 na tlak mjehura p (zanemareno je djelovanje hidrostatskog tlaka ulja). Uz konstantnu temperaturu zraka iznad ulja slijedi po Boyle-Mariotteovu zakonu:

$$p_0 V_z = p (V_z - V). \quad (21)$$

S pomoću relacije (21) određuje se volumen zračnog jastuka (u praksi 5...15% sadržine kotla) potreban da tlak u kotlu ne bi prekoračio dopušteni iznos p .



Sl. 21. Vremenska promjena temperature T rezidualnog stupca pri površinskom hlađenju. d Početni promjer rezidualnog stupca

Dimenzije uljnih prekidača ovise uglavnom o pogonskom naponu i prekidnoj moći. Za grubu aproksimaciju može poslužiti empirička formula P. Charpentiera:

$$P_1 = 240 v a \sqrt{h} \cdot \sqrt[3]{\frac{n d}{400 + U_n}},$$

gdje je P_1 prekidna moć po fazi u VA, v brzina isklapanja u m/s, a hod kontakata u cm, h visina ulja iznad kontakata u cm, d najmanji razmak kontakata od stijene kotla u cm, n broj prekidnih mjesta po fazi, i U_n nazivni napon prekidača u V.

Mjere a , h , d označene su na sl. 17 za prekidač sa $n = 2$ prekidna mjesta po fazi. Formula se odnosi na aparate bez lučnih komora.

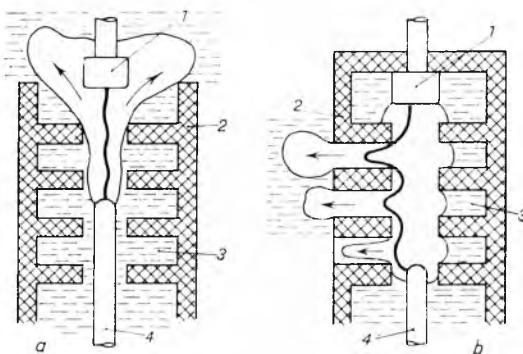
J. D. Hilliard i Parson već su 1908 predložili da se u klasične uljne prekidače ugrade izolacione lučne komore. Zbog visokog tlaka u komori (60...80 at) smanjuje se promjer luka i povećava probojna čvrstoća među kontaktima nakon gašenja. Nagla ekspanzija plinskog mjehura nakon izlaska kontaktnog svornika iz komore dovodi do tzv. ekspanzijskog efekta, koji povećava prekidnu moć. Uslijed ekspanzije dolazi, naime, u nultočki struje do naglog pada tlaka u mjehuru, pa se vrela sloj tekućine na njegovoj površini (zona 5 u sl. 18) naglo ispari noseći sa sobom kapljice tekućine prema središtu. To ima za posljedicu intenzivno volumensko hlađenje rezidualnog stupca.

Uz relativno velike dimenzije i veliku težinu (~20 tona ulja po polu za napon 220 kV), najveći je nedostatak uljnih prekidača da eventualna eksplozija prekidača može imati veoma teške posljedice: mehaničko razaranje zgrade, požar koji se naglo širi uslijed zapaljenog mlaza ili potoka ulja itd. Neupaljive izolacione tekućine na bazi kloriranih difenila (cikličkih ugljikovodika) poznate pod zaštićenim nazivima Clophen, Inerteen, Pyranol, Askarel, koje se primjenjuju u gradnji transformatora i kondenzatora, ne mogu nadomjestiti ulje u prekidačima. Djelovanjem luka oslobađaju se iz tih tekućina plinovi koji su otrovni i uz to razaraju organske izolacije, a na vlažnim porculanskim izolatorima stvaraju vodljive slojeve.

Malouljni prekidači. S obzirom na njegova odlična svojstva, u novijem razvoju tekućinskih aparata zadržalo se ulje kao sredstvo za gašenje, ali mu se količina nastoji svesti na najmanju mjeru. To je dovelo do malouljnih prekidača, u kojima su lučna komora i kontaktni sistem svakog pola smješteni u posebnoj izolacionoj cijevi. Ova se cijev za aparate unutarnje montaže izrađuje od motanih slojnih materijala (papira, tekstilnog i staklenog tkiva) s umjetnosmolnim vezivom (fenolnim, poliesterskim i epoksidnim smolama), a za vanjsku montažu upotrebljavaju se rebraste cijevi od porculana.

Postoje dva osnovna tipa tzv. krutih lučnih komora: komore s uzdužnim i komore s poprečnim strujanjem plina.

Presjek komore s uzdužnim (aksijalnim) strujanjem plina prikazuje shematski sl. 22 a, a presjek komore s poprečnim (transverzalnim) strujanjem plina sl. 22 b. Džepovi između horizon-

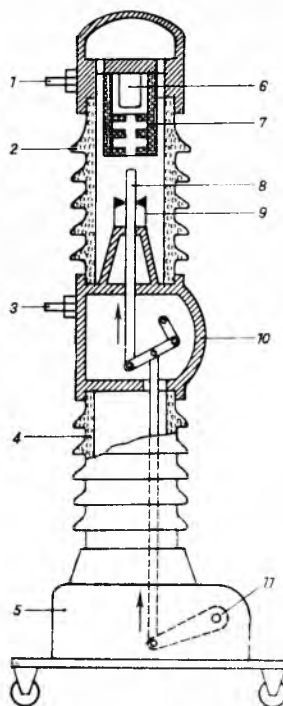


Sl. 22. Lučne komore malouljnih prekidača s uzdužnim strujanjem plina (a) i s poprečnim strujanjem plina (b). 1 Gornji nepomični kontakt, 2 lučna komora, 3 ulje, 4 kontaktni svornik

talnih pregrada zadržavaju ulje u neposrednoj blizini luka, što pogoduje hlađenju. U komorama s uzdužnim strujanjem prolaze plinovi kroz relativno uski centralni provrt u pregradama, stoga je tlak prilično visok i uz manje struje, pa se ove na taj način lako prekidaju. Komore s poprečnim strujanjem imaju nekoliko po-

prečnih kanala, te je zbog većeg ukupnog presjeka za izlazak plinova tlak u komori niži. Ovaj je tip pogodniji za prekidanje većih struja. Prikladnim izborom broja i presjeka kanala i izvedbom komora s kombiniranim uzdužno-poprečnim strujanjem može se postići podjednako dobro prekidanje u čitavom području za koje je aparat građen.

Shematski presjek kroz jedan pol malouljnog prekidača za vanjsku montažu vidi se u sl. 23.



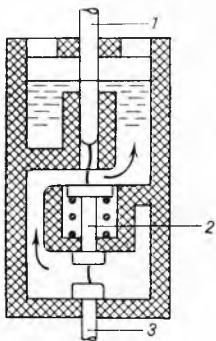
Sl. 23. Shematski prikaz malouljnog prekidača. 1 Gornja priključnica, 2 gornji izolator, 3 donja priključnica, 4 donji izolator, 5 postolje s pogonskim mehanizmom, 6 gornji nepomični kontakt, 7 lučna komora, 8 kontaktni svornik, 9 donji nepomični kontakt, 10 karter, 11 pogonska osovina

Lučna komora 7 i kontaktni sistem smješteni su u gornjem izolatoru 2. Struja glavnog kruga prolazi od gornje priključnice 1 kroz gornji nepomični kontakt 6 u pomični kontaktni svornik 8, pa preko donjeg nepomičnog kontakta 9 i metalnoga kartera 10 na donju priključnicu 3. Prenosno polužje u karteru, kojim se pokreće kontaktni svornik 8, mehanički je vezano s pogonskom osovinom 11 pomoću vertikalne izolacione motke u donjem izolatoru 4. Glavnu osovinu 11 okreće opružni pogonski mehanizam, smješten u postolju 5. Pol je prekidača do gornjeg ruba lučne komore 7 napunjen uljem, a iznad njega se nalazi zračni jastuk.

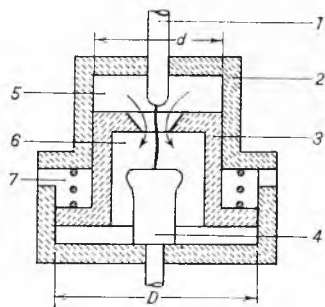
U malouljnim prekidačima ulje služi za gašenje luka i kao dielektrik među otvorenim kontaktima iste faze, a za izolaciju prema masi i među polovima služe čvrsti izolatori i zrak.

Široka primjena malouljnih prekidača dovela je do velikog broja tehničkih izvedbi lučne komore. Sl. 24 shematski prikazuje lučnu komoru s primarnim lukom. U uklopnom položaju potisnut je kontaktni svornik 1 prema dolje. On potiskuje međukontakt 2 na nepomični donji kontakt 3. Izvlačenjem svornika 1 u procesu isklapanja otvaraju se najprije kontakti 2—3 u donjem dijelu komore jer međukontakt pod pritiskom svoje opruge slijedi kretanje svornika 1 prema gore. Stoga među kontaktima nastaje primarni luk, a njegov plin-

ski mjehur tjera ulje u gornji dio komore. Kad međukontakt stigne u gornji granični položaj, odvoji se od njega kontakti svornik, te se među njima stvori sekundarni luk, koji se gasi djelovanjem poprečnog mlaza ulja.



Sl. 24. Lučna komora s primarnim lukom. 1 Kontakti svornik, 2 međukontakt, 3 čvrsti donji kontakt

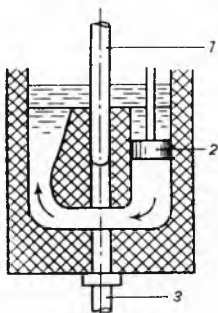


Sl. 25. Komora s diferencijalnim klipom. 1 Kontakti svornik, 2 kućište lučne komore, 3 diferencijalni klip, 4 čvrsti kontakt, 5 gornji uljni prostor, 6 donji uljni prostor, 7 prostor za tlačnu oprugu

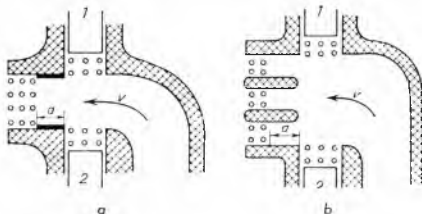
Lučna komora s diferencijalnim klipom, prikazana u sl. 25, radi na principu aksijalnog strujanja. U kućištu komore 2 nalazi se diferencijalni klip 3 s većom donjom i manjom gornjom plohom. Pri izlasku kontaktnog svornika 1 iz nepomičnog kontakta 4 pojavi se luk, koji u prostoru iznad i ispod klipa stvara jednaki tlak p . Time nastaje rezultantna sila $F = p(D^2 - d^2)\pi/4$, koja podiže klip protjera ulje iz gornjeg prostora 5 kroz centralni provrt klipa u donji prostor 6 neposredno uz luk. Tlačna opruga u prostoru 7 vraća nakon gašenja luka diferencijalni klip u donji položaj.

Impulsni prekidači (sl. 26) idu za razliku od dosad opisanih malouljnih aparata sa zavisnom karakteristikom gašenja u aparate s poprečnim uljnim mlazom koji je nezavisan od jakosti struje.

U njihovoj lučnoj komori mehanički pokretani stap 2 tjera mlaz ulja okomito na luk koji se javlja među kontaktima 1 i 3. Rad im se osniva na teoriji pomaka ili poprečnog mlaza, koju je 1931 postavio D. C. Prince. On je mjerenjima na eksperimentalnoj komori ustanovio da dopuštena strmina povratnog napona koju aparat podnosi bez ponovnog paljenja raste proporcionalno s brzinom uljnog mlaza. Taj se rezultat može objasniti na temelju sl. 27 a. Srednji dio vertikalnog rezidualnog stupca potisnut je djelovanjem horizontalnog mlaza uljevo, dok su njegovi krajevi zaostali u vertikalnom kanalu uz kontakte 1 i 2. Prostor među dijelovima stupca ispunjen je svježim medijem velike probojne čvrstoće E_d . Uz brzinu mlaza v određen je pomak srednjeg dijela stupca a u vremenu t izrazom $a = vt$. Da bi se luk ponovo upalio, moralo bi među dijelovima stupca doći do proboja duž dvije (debelim crtama označene) horizontalne staze ukupne



Sl. 26. Impulsna komora s mehaničkim potiskivanjem ulja. 1 Kontakti svornik, 2 stap, 3 donji čvrsti kontakt



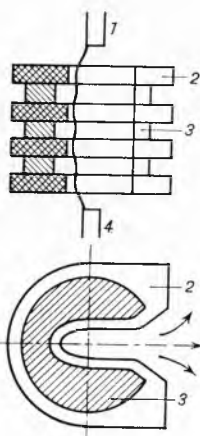
Sl. 27. Gašenje luka prema teoriji pomaka. 1 i 2 kontakti prekidača

duljine $2a$. Prema tome dosiže probojni napon lučne komore u trenutku t vrijednost

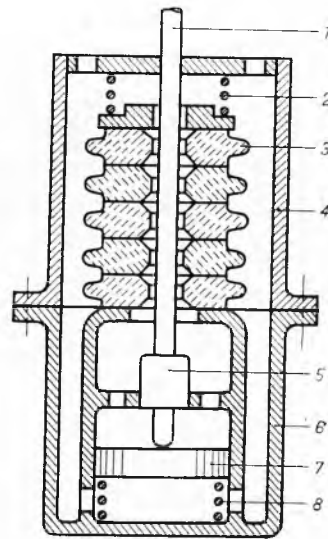
$$u_d = E_d \cdot 2a = 2E_d vt.$$

Ako povratni napon u_p raste s vremenom linearno po zakonu $u_p = st$, tj. ako je s konstantna brzina njegova rasta, treba za sprečavanje ponovnog paljenja ispuniti uvjet $u_d > u_p$, tj. postići brzinu uljnog mlaza $v > s/2E_d$. Za više napone dijeli se izlazni horizontalni kanal pomoću izolacionih rebara na n paralelnih otvora (sl. 27 b) jer se time povećava ukupna duljina probojnih staza na iznos $2na$.

Komore s magnetskim potiskivanjem luka razvila je za uljne prekidače američka firma Westinghouse. One se upotrebljavaju i u tehnici malouljnih prekidača. Ovaj sistem, nazvan također deion-rešetkom, prikazuje sl. 28. Komora se sastoji od niza izolacionih pločica 2 s radijalnim rasporedom, među koje su umetnuti potkovasti željezni limovi 3. Ovi se magnetiziraju pod utjecajem struje luka koji gori među kontaktima 1 i 4. Njihovo magnetsko polje uvlači luk dublje u raspored komore, a razvijeni plinovi i ulje struje iz rasporeda poprečno na luk te ga time hlade i gase.



Sl. 28. Uljna deion-komora s magnetskim uvlačenjem luka. 1 i 4 Kontakti, 2 izolacione ploče, 3 željezni limovi



Sl. 29. Princip ekspanzione komore s ubrizgavanjem tekućine. 1 Kontakti svornik, 2 tlačna opruga, 3 izolacioni prstenasti segmenti, 4 izolaciona cijev, 5 nepomični kontakt, 6 metalni karter, 7 stap za ubrizgavanje ulja, 8 tlačna opruga

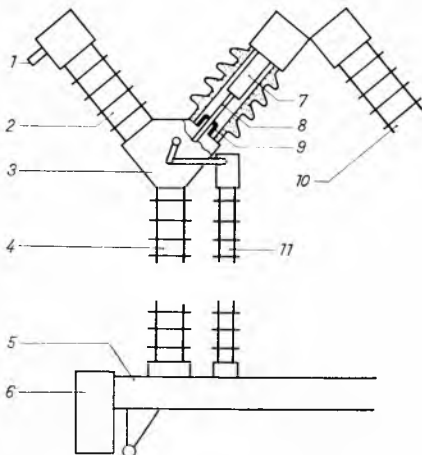
Ekspanzioni malouljni prekidači firme Siemens imaju elastične lučne komore prema sl. 29.

Izolaciona cijev 4 sadrži nekoliko izolacionih prstena 3, stlačenih oprugom 2. Kad pomični kontakti svornik 1 napusti »tulipanski« kontakt 5 (nazvan tako jer je po obliku sličan cvijetu tulipana), stvori se u ulju plinski mjehur. Ako tlak plina nadvlada silu opruge 2, razmaknu se prstenasti segmenti, te među njima prostruje plin i tekućina u vanjski prostor komore. Na taj se način umjetno pojačava ekspanzionni efekt naglim proširenjem plinskog mjehura. Izvlačenjem svornika 1 podiže se i stap za ubrizgavanje tekućine 7, pritisnut oprugom 8. Time se pojačava deionizacija u kritičnom području malih struja i na taj način ispravlja inače zavisna karakteristika gašenja.

Sistemi višestrukog prekidanja primjenjuju se sve više za napone iznad 123 kV. Jednu od karakterističnih izvedbi prekidača ove vrste s komorama u obliku slova V prikazuje shematski sl. 30.

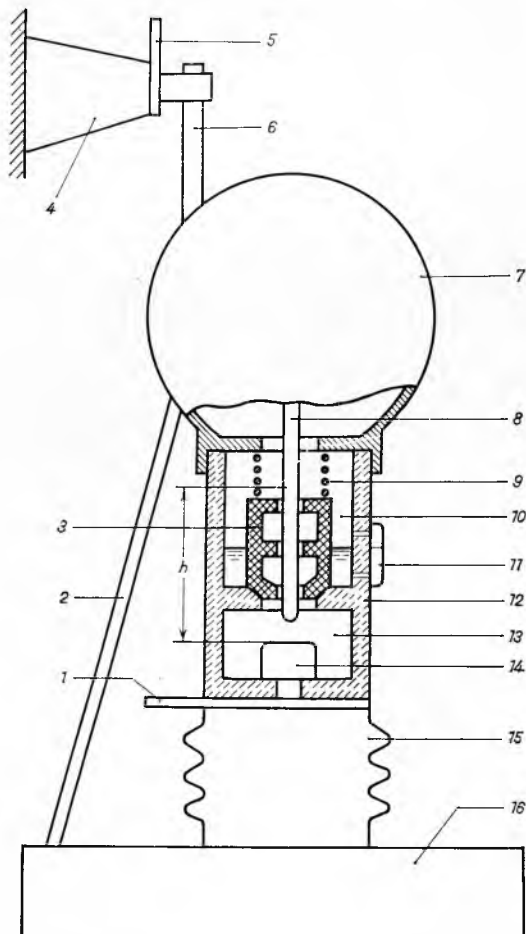
Po dva prekidna elementa u porculanskim cijevima 2 montirana su u obliku slova V na metalni karter 3, smješten na vrhu potpornog izolatora 4. Oba su elementa vezana u seriju, a u svakom se nalaze lučna komora 7 sa nepomičnim lučnim kontaktima, pomični kontakti svornik 8 i klizni kontakti 9. Prekidni elementi i karter napunjeni su uljem. Pogonski mehanizam 6 napinje uklopne i isklapne opruge, te polužjem u postolju 5 zakreće porculansku osovinu 11. Njena se rotacija preko poluga u karteru pretvara u linearno kretanje kontaktnih svornika 8 u oba elementa. Izlazak svornika 8 iz lučnih kontakata oslobađa klipove za aksijalno ubrizgavanje ulja, analogno onima u sl. 29. Pojedini je prekidni element građen za fazni napon od $40/\sqrt{3}$ kV, te prekidač sa 5 potpornih izolatora po fazi (10 elemenata u seriji) odgovara nazivnom linijskom naponu od 420 kV. U slici je elementom 10 naznačen početak druge grupe u V-spoju. Struja prolazi od priključnice 1 preko lijevog elementa 2 i kartera 3 u desni element (9—8—7) i dalje u sljedeću grupu 10 do izlazne priključnice na posljednjem elementu.

Hidromatski prekidači. Nastojanje da se ulje zamijeni neupaljivom tekućinom dovelo je do konstrukcije hidromatskih prekidača s ekspanzionim komorama, koje je firma Siemens razvila za napone do 72 kV. U njima kao sredstvo za gašenje služi destilirana voda s dodatkom glikola, tzv. »ekspanzin« ili »hidrin«, koji snižuje ledište tekućine i povećava Bauerov koeficijent (v. str. 123). Za



Sl. 30. Malouljni prekidač s višestrukim prekidom. 1 Priključnica, 2 porculanska cijev s prekidnim elementom, 3 prenosno polužje, 4 potporni izolator, 5 postolje s polužjem, 6 pogonski mehanizam, 7 lučna komora, 8 kontakti svornik, 9 klizni kontakt, 10 početak druge grupe u V-spoju, 11 porculanska osovina

razliku od ulja, hidrin se ne može upotrijebiti kao izolator, jer ne osigurava potrebnu probojnu čvrstoću između kontakata, pa hidromatski prekidači moraju u seriji s lučnom komorom imati poseban rastavni nož u zraku, koji se brzo otvara nakon gašenja luka. Princip aparata za napone do 12 kV prikazuje sl. 31.

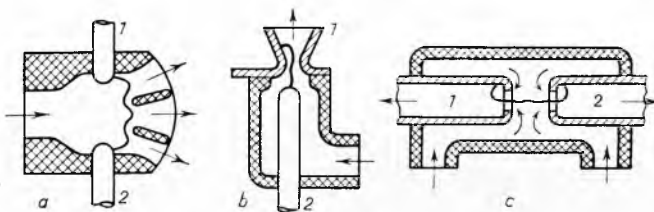


Sl. 31. Hidromatski prekidač za 12 kV. 1 Donja priključnica, 2 izolaciona motka, 3 izolacioni klip, 4 izolator, 5 gornja priključnica, 6 rastavni nož, 7 metalna glava, 8 kontakti svornik, 9 opruga, 10 gornji dio komore, 11 pokazivač hidrina, 12 izolaciona cijev s lučnom komorom, 13 donji dio komore, 14 nepomični kontakt, 15 porculanski izolator, 16 zajedničko postolje s pogonskim mehanizmom, h puni razmak kontakata

Zajedničko postolje 16 s ugrađenim pogonskim mehanizmom nosi tri pola prekidača, koji se sastoje od porculanskih izolatora 15, izolacionih cijevi 12 s lučnim komorama i metalnih glava 7 s rastavnim nožem 6. Pogonski mehanizam vezan je izolacionom motkom 2 na polužje u glavi 7 koje određenim redom prenosi kretanje na kontakti svornik 8 i nož 6. Glavni se krug prekidača sastoji od gornje priključnice 5 sa čvrstim kontaktom na izolatoru 4, rastavnog noža 6 koji je pomoću vertikalnih vodilica i kontaktnih koluta u glavi 7 vezan s pomičnim kontaktom 8, »tulipanskoga« kontakta 14 i donje priključnice 1. Djelovanjem luka među kontaktima 8 i 14 raste tlak u donjem dijelu komore 13, dok ne nadvlada silu opruge 9. U tom se trenutku podigne izolacioni klip 3, te se plinski mjehur naglo proširi u gornji dio komore 10, što dovodi do već opisanog ekspanzionog efekta. Pretežni se dio isparene tekućine kondenzira u glavi 7 i vraća u komoru, čime se smanjuje njeno trošenje. Količina tekućine nadzire se pokazivačem hidrina 11. Pri isklupu se najprije otvore kontakti komore na puni razmak h , a zatim rastavni nož. Uklop se vrši obrnutim redom.

Budući da se hidrin ne karbonizira djelovanjem luka, on je pogodniji od ulja za veliku učestalost sklapanja.

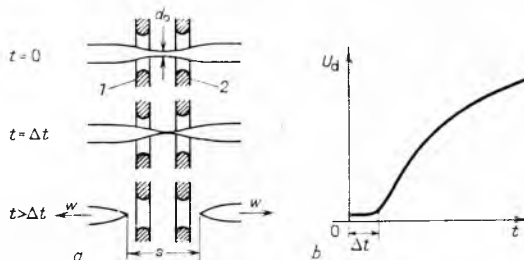
Pneumatski prekidači su aparati s nezavisnom karakteristikom gašenja, kojima se za gašenje dovodi komprimirani zrak iz posebnog rezervoara. Postoje tri osnovna principa takvih lučnih komora: komore s poprečnim, uzdužnim i radijalnim mlazom zraka. Sl. 32 a odnosi se na sistem s poprečnim mlazom zraka. Zrak ulazi u smjeru strelice, te prolazeći poprečno kroz luk izlazi iz komore među izolacionim pregradama. Ubrzani porast električne čvrstoće među kontaktima 1 i 2 objašnjava se prije opisanom teorijom pomaka. Sl. 32 b prikazuje komoru s uzdužnim mlazom,



Sl. 32. Lučne komore pneumatskih prekidača. a Komora s poprečnim mlazom, b komora s uzdužnim mlazom, c komora s radijalnim mlazom; 1 i 2 kontakti. Strelice pokazuju smjer mlaza zraka

u kojoj je nepomični kontakt 1 izveden u obliku sapnice. Primjena obaju sistema većinom je ograničena na niže napone (do 15 kV). Za više napone i velike prekidne struje veoma je raširena primjena lučnih komora s radijalnim strujanjem prema sl. 32 c. Mlaz koji struji koncentrično prema luku razdvaja se u dva suprotna uzdužna mlaza i izlazi iz komore kroz šuplje kontakte 1 i 2. Zračna struja prebacuje korijene luka na unutarnju stranu kontakata, pa im se čeone dodirne plohe neznatno oštećuju. Proces gašenja u takvom sistemu može se objasniti nešto modificiranom teorijom pomaka, kako je izvedeno u nastavku.

Sl. 33 a prikazuje susjedne krajeve šupljih kontakata i rezidualni stupac luka u tri uzastopna trenutka. U trenutku gašenja $t = 0$ stupac je zbog najveće radijalne komponente strujanja u centralnom dijelu sužen na manji promjer d_0 . Nakon kraćeg intervala Δt



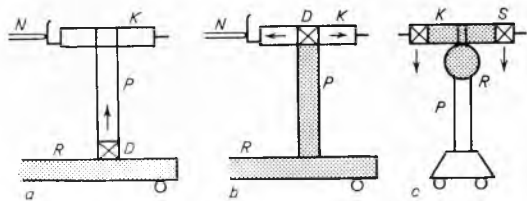
Sl. 33. Uspostavljanje električne čvrstoće u pneumatskoj komori. a Shematski prikaz šupljih kontakata i rezidualnog stupca, b ovisnost probojnog napona među kontaktima U_d o vremenu t ; 1 i 2 šupljih kontakti, d_0 smanjeni promjer stupca u trenutku gašenja, s razmak dijelova rezidualnog stupca, w brzina strujanja zraka

promjer se smanji na nulu, a stupac se cijepa u dva dijela, koji se nošeni strujom zraka počinju odvajati jedan od drugoga dvostrukom brzinom strujanja $2w$. Razmak među njima raste po zakonu $s = 2w(t - \Delta t)$; ovisno o razmaku raste i probojni napon U_d koji se uspostavlja među kontaktima. Vremensku promjenu $U_d(t)$ pokazuje dijagram u sl. 33 b. Trajanje intervala Δt određeno je poluempirijskom relacijom

$$\Delta t = 0,17 \frac{\delta}{2w_r} \left(\frac{\omega I_m \delta}{2w_r} \right)^{1,7}$$

u kojoj je Δt u s, $\delta \approx 2 \cdot 10^{-6}$ m/A^{0,63}, w_r radijalna komponenta brzine zraka u ms⁻¹, ω kružna frekvencija struje u s⁻¹, I_m amplituda prekidne struje u A. Veličina w_r iznosi 5...10% aksijalne brzine w.

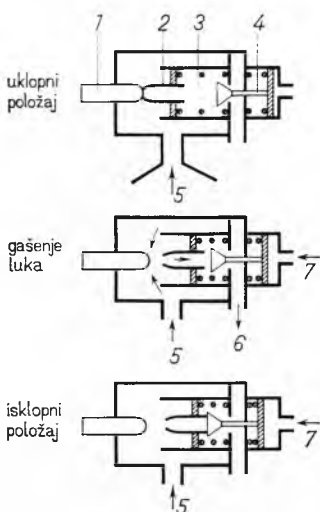
Da bi se ubrzala eliminacija kvara u mreži, nastojala se akumulirati količina zraka dovesti što bliže kontaktima. U sl. 34 naznačene su tri etape takva razvoja. U starijim konstrukcijama nalazi se glavni dovodni ventil D na samom rezervoaru R u podnožju polova prekidača, te nakon otvaranja ventila treba relativno mnogo vremena da se potporni izolatori P napune zrakom i da se tlak u komori K povisi na potrebnii iznos (sl. 34 a). Zato je u novijim izvedbama glavni ventil podignut na visinu same komore, koja se u oba spomenuta slučaja nalazi pod visokim tlakom samo za vrijeme gašenja, a inače je pod atmosferskim tlakom (sl. 34 b). Budući da zrak od 1 at ne može osigurati dovoljnu probojnu čvrstoću uz relativno male kontaktne razmake, ovakvi prekidači imaju posebne rastavne nožve N koji se otvaraju nakon gašenja



Sl. 34. Napajanje lučne komore komprimiranim zrakom: a kroz ventil na podnožju, b kroz ventil na komori, c bez ventila (komora pod stalnim pritiskom); D dovodni ventil, K lučna komora, N rastavni nož, P potporni izolator, S ispušni ventil

luka. Aparati s komorama pod stalnim tlakom nemaju ni dovodnih ventila ni rastavnih noževa (sl. 34 c). Strujanjem zraka za gašenje upravlja se pomoću ispušnih ventila S na krajevima komora.

Princip rada lučne komore pod stalnim tlakom razabire se iz sl. 35.

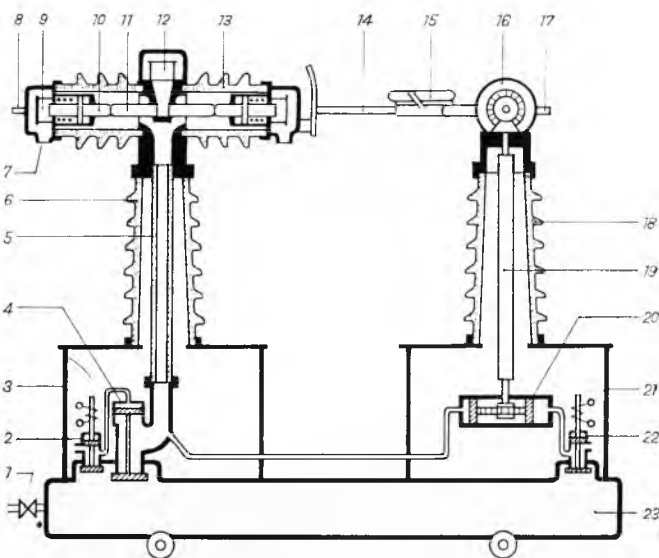


Sl. 35. Lučna komora pod stalnim tlakom. 1 Nepomični kontakt, 2 šuplji pomični kontakt, 3 cilindar nepomičnog kontakta, 4 ispušni ventil, 5 ulaz svježeg zraka iz kotla, 6 ispuh, 7 impuls za prekidanje

se izjednači tlak s obje strane klipa na kontaktu 2, potisne ga opruga u lijevi (uklopni) položaj.

Sl. 36 prikazuje shematski presjek jednog pola prekidača s lučnim komorama koje se nalaze pod tlakom samo za vrijeme gašenja.

Postoji se sastoji od rezervoara zraka 23 i dva kućišta 3 i 21 s ugrađenim upravljačkim i pogonskim uređajima. Na lijevom je izolatoru 6 lučna komora 13, a na desnom je izolatoru 18 zupčani prenos 16 rastavnog noža. Između priključnica 8 i 17 leži glavni krug prekidača, koji se sastoji od rastavnog noža 14 i dvije lučne komore s pomičnim glavnim kontaktom 10 i nepomičnim glavnim kontaktom 11. Kratkotrajnim se otvaranjem glavnih kontakata prekida struja u krugu, a naknadnim zakretanjem rastavnog noža u vertikalni položaj osigurava se trajni dielektrični razmak. Uklop se vrši brzim zatvaranjem rastavnog noža.

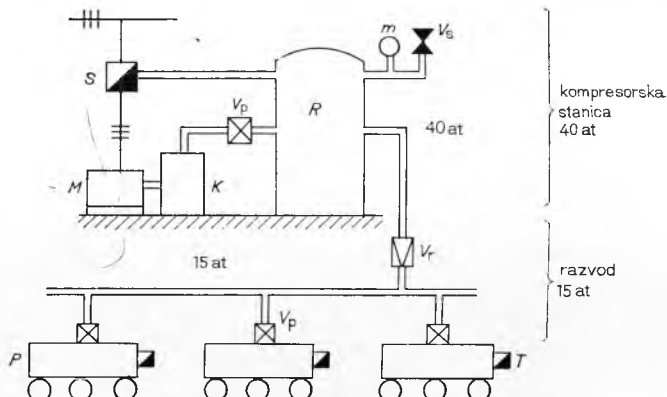


Sl. 36. Shematski presjek pneumatskog prekidača. 1 Povratni ventil, 2 isklupni elektroventil, 3 kućište, 4 glavni ventil, 5 porculanska cijev, 6 izolator, 7 ispušni otvor, 8 priključnica, 9 bočni deionizator ispušnih plinova, 10 pomični šuplji kontakt, 11 nepomični šuplji kontakt, 12 srednji deionizator, 13 lučna komora, 14 rastavni nož, 15 ledolomna naprava, 16 zupčani prenos rastavnog noža 17 priključnica, 18 izolator, 19 porculansko vreteno, 20 pogonski cilindar, 21 kućište, 22 uklopni elektroventil, 23 rezervoar zraka

Aparat se povratnim ventilom 1 priključuje na razvod komprimiranog zraka (npr. 15 at) koji služi i za pokretanje kontakata i za gašenje luka. Električni upravljački impuls dovodi se magnetskom svitku isklupnog elektroventila 2 ili uklopnog elektroventila 22. Otvaranjem elektroventila za isklapanje dovodi se tlak iz kotla u gornju stranu glavnog ventila 4, koji propusti veliku količinu zraka kroz cijev 5 u lučnu komoru. Pošto je nadvladao kontaktne opruge, zrak prolazi kroz odvojene šuplje kontakte 10 i 11 i metalne mreže za deionizaciju ispušnih plinova 9 i 12, te izlazi u atmosferu kroz ispušne otvore na krajevima komora 7 i u središnjem dijelu. Iz koljena glavnog ventila odlazi tankom cijevi manja količina zraka u lijevu stranu pogonskog cilindra 20. Njegov se stap pokrene udesno, te putem zupčanice i zupčanika zakrene porculansko vreteno 19. Stožnici u glavi 16 prenose kretanje na rastavni nož 14, koji se otvara nekoliko poluperioda pošto se ugasio luk. Posebnom ledolomnom napravom 15 može se rastavni nož saviti oko zgloba i tako izvući iz eventualno zaleđenih kontakata.

Za uklapanje dovodi se impuls svitku uklopnog elektroventila 22, koji propusti zrak u desnu stranu pogonskog cilindra 20. Pomak stapa ulijevo prenosi se već opisanom načinom na rastavni nož, te se on velikom brzinom zatvori.

Snabdijevanje prekidača komprimiranim zrakom pokazuje načelna shema u sl. 37. Kompresor K tlači zrak u centralni rezervoar R visokog tlaka (npr. 40 at). Nakon redukcije na pogonski tlak (npr. 15 at) zrak se razvodi do niza prekidača P. Tlačna sklopka S automatski uspostavlja ili prekida spoj između elektromotora M i mreže za takav način da tlak u kotlu R ostane stalno među odabranim granicama (npr. 38...40 at). Tlačni releji T mjere tlak u kotlovima pojedinih prekidača, a kontakti su im vezani sa svicima upravljačkih elektroventila 2 i 22 u sl. 36. Ako tlak uslijedi kvara padne ispod dopuštene granice (npr. 12 at), relej će, ovisno o načinu spoja, ili automatski otvoriti prekidač ili blokirati ga u zatvorenom položaju. Funkcija ostalih dijelova uređaja vidi se iz podataka u slici. Poželjno je da omjer redukcije tlaka bude što

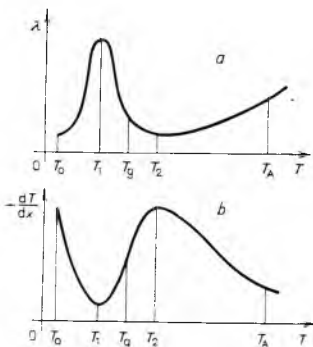


Sl. 37. Shema instalacije komprimiranog zraka. M elektromotor, K kompresor, R centralni rezervoar, P prekidači, S tlačna sklopka, m manometar, Vp povratni ventil, Vr redukcioni ventil, Vs sigurnosni ventil, T tlačni relej

veći, no svakako veći od 2 : 1, jer se time smanjuje vlažnost zraka u razvodnom sistemu.

Prekidači sa sumpornim heksafluoridom. Sve šira primjena ovih prekidača, razvijenih oko 1950, osniva se na dobrim svojstvima sumpornog heksafluorida (SF_6) kao sredstva za gašenje luka i kao dielektrika.

Sumporni heksafluorid kao sredstvo za gašenje luka. Plin SF_6 ubraja se u grupu plinova koji imaju velik afinitet prema negativnim nabojima te «upijaju» slobodne elektrone iz plazme, vežući ih za svoje neutralne molekule i disocijacijom nastale atome. Takvim *zahvatom elektrona* nastaju teško pokretljivi negativni ioni, koji se u prostoru među kontaktima praktički vladaju kao dielektrik. Pojavom zahvata u znatnoj se mjeri smanjuje vremenska konstanta, jer zbog naglog pretvaranja vanjskih slojeva lučne plazme u praktički nevodljivi plašt od tromih iona preostaje u njegovoj osi rezidualni stupac ekstremno malog početnog promjera, a time i male akumulirane energije. Smanjivanju presjeka stupca u SF_6 pridonosi i činjenica da njegova toplinska vodljivost ovisi o temperaturi na način koji u načelu pokazuje sl. 38 a. Iz dijagrama se vidi

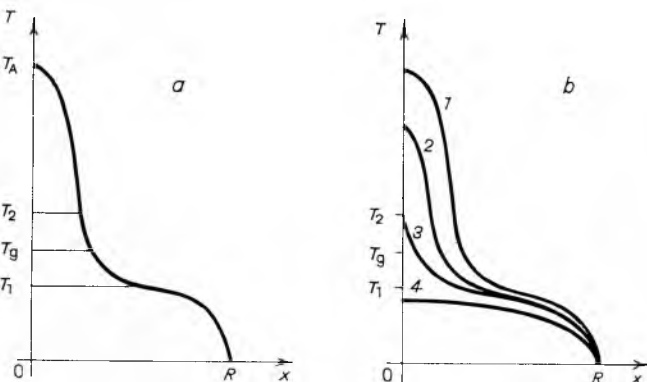


Sl. 38. Ovisnost toplinske vodljivosti λ i gradijenta temperature dT/dx lučnog stupca u SF_6 o temperaturi. T_A temperatura u osi stupca, T_0 temperatura na stijenki lučne komore, T_g temperatura gašenja, T_1 temperatura koja odgovara $\lambda_{\max}$, T_2 temperatura koja odgovara $\lambda_{\min}$

polumjera R) prolazi kroz medij različite toplinske vodljivosti λ .

Toplinska snaga P koja iz lučnog stupca duljine l izlazi kroz cilindrični sloj polumjera x , debljine dx i površine $S = 2\pi x l$ proizvodi u tom sloju radijalni pad temperature dT s negativnim gradijentom dT/dx prema jednadžbi

$$\frac{dT}{dx} = -\frac{P}{\lambda S} = -\frac{P}{\lambda \cdot 2\pi x l}.$$



Sl. 39. Temperaturni profil luka u SF_6 unutar hladne cijevi polumjera R . T_A temperatura u osi stupca, T_g temperatura gašenja luka, T_1 temperatura koja odgovara $\lambda_{\max}$, T_2 temperatura koja odgovara $\lambda_{\min}$; 1...4 različiti temperaturni profili u toku hlađenja

Uz aproksimaciju da je toplina razvijena u stupcu unutar plašta polumjera x razmjerna polumjeru i duljini lučnog stupca, dakle $P/xl = \text{konst.}$, a prema tome toplinska snaga kroz jedinicu po-

vršine $P/S = \text{konst.}$, slijedi

$$\frac{dT}{dx} \approx -\frac{\text{konst.}}{\lambda}.$$

Na temelju tog izraza dobiva se iz krivulje $\lambda(T)$ dijagram u sl. 38 b. Njemu odgovara temperaturni profil $T(x)$ rezidualnog stupca u trenutku gašenja prema krivulji sl. 39 a. Na slici 39 b prikazuju krivulje 1...4 uzastopne promjene profila $T(x)$ u toku hlađenja.

Istraživanja pomoću spektrografa masa pokazuju da u posljednjem poluvalu struje luka, tek nekoliko mikrosekundi prije njenog prolaza kroz nulu, počinje naglo rasti udio struje negativnih iona (F_2^- , SF_6^- , F^-) uzrokovan pojačanim efektom zahvata elektrona. Time se objašnjava ekstremno mala vremenska konstanta luka u nultočki struje, koja se prema nekim podacima spušta do 10^{-11} s za mirni plin i do 10^{-8} s za SF_6 koji struji brzinom zvuka.

Sumporni heksafluorid kao dielektrik. SF_6 ima odlična dielektrična svojstva. Njegova je probojna čvrstoća uz atmosferski tlak $\sim 30\%$ manja, a uz apsolutni tlak 2,3 at $\sim 15\%$ veća od probojne čvrstoće ulja. Usporedbu dielektričnih svojstava dušika i SF_6 daje tablica 1.

Tablica 1
PROBOJNI NAPON ZA N_2 i SF_6 u kV

$p \cdot d$ kp/cm ² · mm	10	20	30	40	50
N_2	25	55	80	100	118
SF_6	77	146	203	250	294

Probojni napon mjeran strujom 60 Hz i kuglastim iskrštenjem 5 cm uz različite umnoške tlaka plina p i razmaka elektroda d

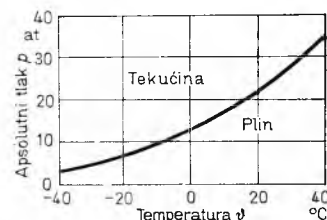
Zbog opisanih deionizacionih i dielektričkih svojstava mogu se u SF_6 , uz inače jednake uvjete, prekidati ~ 100 puta veće struje nego u zraku. To omogućava gradnju aparata relativno malih dimenzija za vrlo velike snage kratkog spoja, ali pri konstrukciji treba uzeti u obzir i neke specifične karakteristike plina.

Druga fizička i kemijska svojstva sumpornog heksafluorida. SF_6 je bezbojan i neotrovan plin bez mirisa, neupaljiv i inertan: ne reagira s vodom niti napada bilo koji materijal na temperaturi do 500 °C. Pod djelovanjem električnog luka u vrlo se maloj mjeri raspada u niže fluore, koji su otrovni i agresivni prema nekim izolacijama i metalima. Njihovo se korozivno djelovanje pojačava visokom temperaturom i prisustvom vlage. Produkti disocijacije lako se odstranjuju pomoću filtera s aktivnim aluminijum-oksidiom (Al_2O_3).

Uz jednaku temperaturu plin SF_6 prelazi iz plinovitog u tekuće stanje pod znatno nižim tlakom nego zrak. Zato u aparate vanjske montaže koji rade s povišenim tlakom treba ugraditi električne grijače. Krivulju ravnotežnog napona para sumpornog heksafluorida prikazuje sl. 40. Pod atmosferskim tlakom i na temperaturi 20 °C SF_6 ima ~ 5 puta veću gustoću nego zrak. To omogućuje da se prekidač puni plinom kroz otvor u donjem dijelu, pri čemu iz gornjeg otvora izlazi zrak.

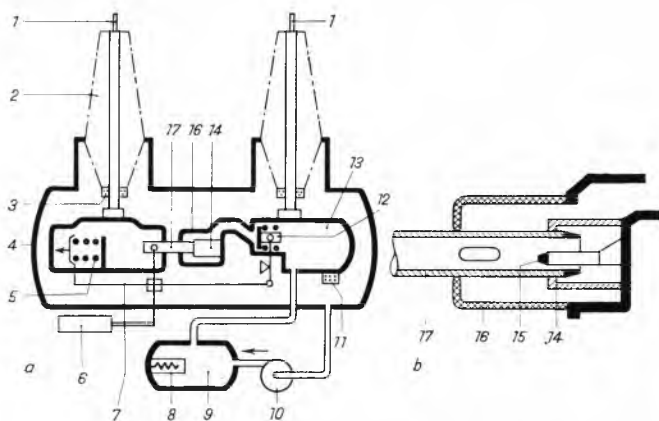
Funkcija *dvostranog* prekidača sa sumpornim heksafluoridom može se objasniti na osnovi shematske slike 41 a.

Aparat sačinjava hermetički zatvoren sistem. Bitni dijelovi aparata smješteni su u čeličnom kotlu 4, koji je napunjen plinom niskog pritiska (2 at). Iz njega se plin pomoću kompresora 10 tlači u pomoćni kotao 9 pod pretlakom od 14 at i s njime spojeni glavni kotao 13. Da se spriječi kondenzacija plina, u visokotlačnom se dijelu nalazi automatski upravljeni grijač 8. Glavni strujni krug prolazi od lijeve priključnice 1 kroz šuplji provodni izolator 2 ispunjen plinom, pomični kontakt 17 i nepomični kontakt 14 na stijenku glavnog kotla 13 i desnu priključnicu. Za uklanjanje služi pogonski cilindar 6, koji je preko slobodne spojeke vezan s pogonskim polužjem 7, te njime pomiče udesno kontakt 17 i napinje iskopnu oprugu 5. Oslobođanjem te opruge vrši se iskop na taj način što se pomakom polužja 7 ulijevo otvori ventil 12 i rastave kontakti 17 i 14. Pri tome prostruji SF_6 iz visokotlačnog kotla 13 u teflonsku lučnu komoru 16, te se kroz šuplji kontakt 17 vraća u niskotlačni rezervoar 4. Električni luk gori među sinterovanim krajevima pomičnog kontakta 17 i lučnoga kon-



Sl. 40. Krivulja ravnoteže plin-tekućina za SF_6

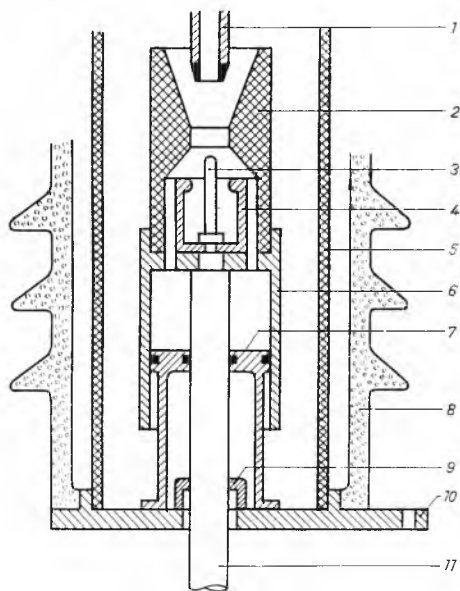
takta 15 (v. detalj na sl. 41 b), da bi dodirne plohe za trajno vođenje struje ostale neoštećene. Da bi se iz kotla odstranili produkti disocijacije plina i spriječio njihov ulazak u provodne izolatore, ugrađeni su filtri 11 i 3 s aktivnim aluminijum-oksikom.



Sl. 41. Dvotlačni prekidač sa sumpornim heksafluoridom. a) Shematski prikaz, b) detalj lučne komore; 1 priključnica, 2 provodni izolator, 3 filter Al_2O_3 , 4 kotao (pretlak 2 at), 5 isključna opruga, 6 pogonski cilindar, 7 pogonsko polužje, 8 grijalo, 9 pomoćni kotao (pretlak 14 at), 10 kompresor za SF_6 , 11 filter Al_2O_3 , 12 ventil, 13 glavni kotao (pretlak 14 at), 14 nepomični glavni kontakt, 15 nepomični lučni kontakt, 16 lučna komora od teflona, 17 pomični kontakt

U nastojanju da se smanji cijena prekidača, na koju znatno utječu kompresori i grijači s pripadnom automatikom, razvijeni su za umjerene snage kratkog spoja *jednotlačni* aparati niskog tlaka.

Sl. 42 pokazuje lučnu komoru takva aparata, u kojoj je hermetički zatvoren SF_6 pod pretlakom od 4 at na 20°C . S promjenom temperature njegov se pretlak mijenja od 3 at na -30°C do 4,5 at na 50°C ; u tom području ne može doći do kondenzacije. Aparat djeluje na autopneumatskom principu, te u momentu prekidanja proizvodi prisilno strujanje plina na račun energije isključnih opruga.

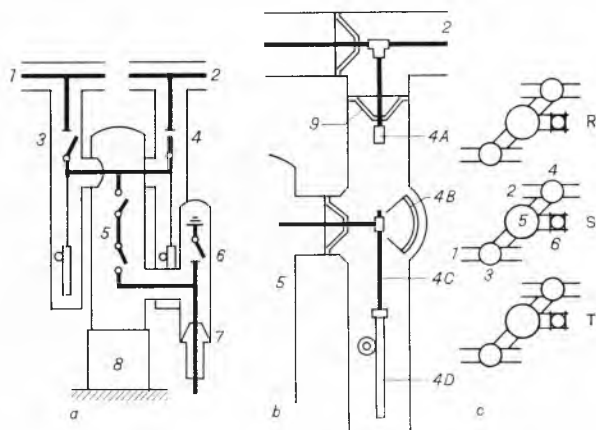


Sl. 42. Autopneumatska komora prekidača s plinom SF_6 . 1 Gornji nepomični kontakt, 2 sapnica od teflona, 3 pomični lučni kontakt, 4 pomični glavni kontakt, 5 izolaciona cijev, 6 pomični cilindar, 7 nepomični stap, 8 porculanski izolator, 9 donji nepomični kontakt, 10 donja priključnica, 11 pomični kontakti svornik

Nepomični dio komore sačinjavaju porculanski izolator 8 s izolacionom cijevi 5, donja priključnica 10 sa čvrstim kontaktom 9, stap 7 i gornji kontakt 1. Povlačenjem kontaktnog svornika 11 prema dolje kreću se zajedno s njim kompresorni cilindar 6, kontakti 3 i 4 i teflonska sapnica 2. Na taj se način komprimira SF_6 u cilindru 6 i struji uz luk u sapnici 2.

U novije se vrijeme SF_6 sve više primjenjuje u *oklopnim postrojenjima*, gdje služi, osim za gašenje luka, i kao dielektrik za izolaciju dijelova pod naponom (sabirnice, rastavljači itd.) prema metalnom oklopu. Time se drastično smanjuju dimenzije postro-

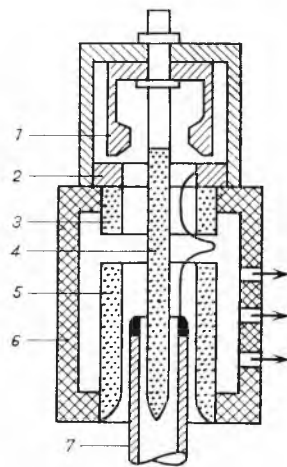
jenja, što omogućuje dovodenje vrlo visokih napona u središta potrošnje. Tlocrtna je površina postrojenja u usporedbi s tradicionalnim otvorenim izvedbama u omjeru $\sim 12 : 1$ manja za napon 242 kV, u omjeru $\sim 23 : 1$ za napon 420 kV. Oklopno se postrojenje može smjestiti bilo na slobodnom prostoru bilo u zgradi, jer pruža punu zaštitu od dodira i sigurnost protiv požara, a nije osjetljivo prema atmosferskim utjecajima. Shematski prikaz jednog polja s odvojenim fazama i dva sistema sabirnice prikazuje sl. 43 a. Sabirnice 1, 2, sabirnički rastavljači 3, 4 i rastavljač uzemljenja 6 smješteni su u osi cilindričnih aluminijumskih cijevi, u kojima su učvršćeni pomoću koničnih epoksidnih provodnih izolatora 9. Svi su rastavljači s aksijalnim gibanjem noževa. Kontakti sabirničkih rastavljača 4C pokreću se pomoću zupčanica 4D, a u otvorenom se položaju može njihov rastavni razmak pregraditi zakretnim izolacionim ekranom 4B (sl. 43 b). Dvotlačni prekidač



Sl. 43. Oklopno postrojenje izolirano plinom SF_6 . a) Shematski prikaz jednog polja, b) detalj sabirničkog rastavljača, c) tlocrt triju faza jednog polja; 1 i 2 sabirnice, 3 i 4 sabirnički rastavljači, 4A čvrsti kontakt rastavljača, 4B zakretni ekran, 4C pomični kontakt, 4D zupčanica, 5 prekidač, 6 rastavljač uzemljenja, 7 kabelaška glava, 8 postolje prekidača, 9 konični provodni izolator

5 (sl. 43 a) sa dvije komore u seriji nalazi se također u srednjem vertikalnom metalnom cilindru. Pretlak plina SF_6 u čitavom kućištu iznosi 2,5 at. U postolju prekidača 8 nalaze se kompresor i visokotlačni kotao od 14 at pretlaka s ugrađenim grijačem. Kompresor siše SF_6 iz kućišta prekidača, a visokotlačni je rezervoar spojen s njegovim lučnim komorama. Sl. 43 c prikazuje tlocrt triju faza jednog polja tog postrojenja.

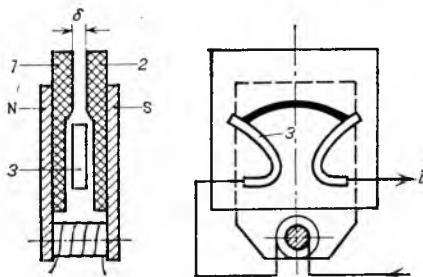
Plinotvorni prekidači. U ovim aparatima za srednje napon e i male snage kratkog spoja razvija se medij za gašenje djelovanjem luka na prikladne čvrste tvari (aminoplaste, pleksiglas), koje naglo otpuštaju plinove ne stvarajući vodljivih kliznih staza. Dijelovi napravljeni od tih tvari ne smiju se deformirati uslijed promjena temperature i vlage. Presjek lučne komore prikazan je shematski u sl. 44. U prikazanoj izvedbi luk gori u uskom prostoru između plinotvornog svornika 4 i cijevi 3 i 5 od plinotvornog materijala. Velike se struje redovito prekidaju čim pomični kontakt 7 oslobodi prstenasti otvor između gornje i donje cijevi; kad je struja mala, plin se slabo razvija iz plinotvornog materijala, pa se luk produžuje u donju cijev.



Sl. 44. Plinotvorna lučna komora. 1 Nepomični kontakt, 2 lučni prsteni, 3 plinotvorna cijev, 4 plinotvorni svornik, 5 plinotvorna cijev, 6 ispušna cijev, 7 pomični kontakt

Prekidači s uskim rasporima i prekidači »deion«. Prekidači s uskim rasporima jesu aparati za srednje napon e, bez tekućine i bez komprimiranog plina, s magnetskim potiskivanjem luka

među hladne keramičke ploče. Već samo produljivanje luka i kretanje kroz mirni zrak ima za posljedicu pojačano hlađenje i deionizaciju. Proces gašenja je mnogo intenzivniji ako se pri tome luk dodiruje s izolacionim pločama. Osnovnu ideju aparata prikazuje sl. 45, u kojoj su 1 i 2 keramičke ploče, a N i S polovi magneta kroz čiji svitak prolazi struja glavnoga kruga. Luk se pod djelovanjem magnetskog polja penje na kontaktne rogove 3 i ulazi u uski raspor širine δ , koja nije veća od promjera luka.

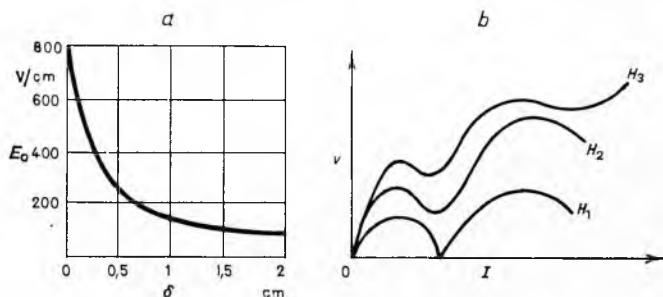


Sl. 45. Princip aparata s uskim rasporima. N i S polovi elektromagneta, δ raspor, 1 i 2 keramičke ploče, 3 kontaktni rogovi

Gradijent luka E_A u V/cm može se odrediti brojčanom jednačinom

$$E_A = E_0 + 0,015 \sqrt{\frac{v^2 I}{\delta}},$$

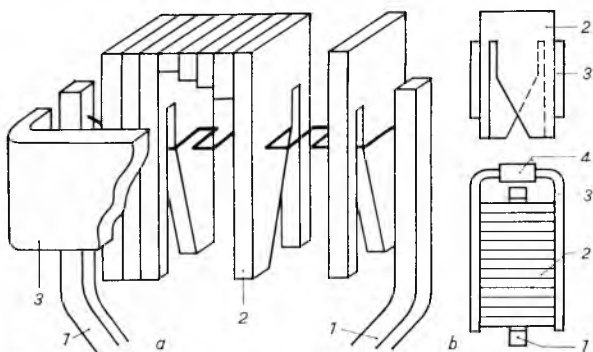
gdje je E_0 gradijent, u V/cm, luka koji bi mirno gorio u rasporu, v brzina kretanja luka u m/s, I struja luka u A, δ širina raspora u cm. Veličina E_0 je također funkcija raspora, prikazana dijagramom sl. 46 a. Dijagram na sl. 46 b pokazuje veoma složenu ovisnost brzine o struji i jakosti magnetskog polja H . Nepravilan se oblik



Sl. 46. Gradijent i brzina luka u uskom rasporu. a Gradijent E_0 kao funkcija širine raspora δ , b brzina kretanja v kao funkcija struje I uz različite jakosti polja H

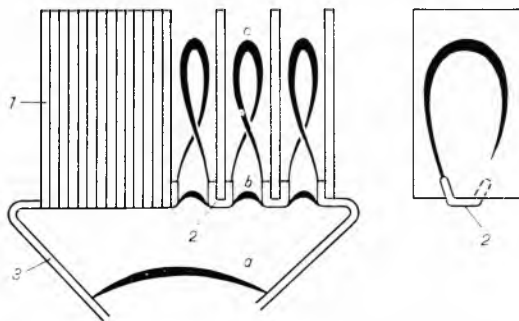
krivulja pripisuje činjenici da sa strujom raste promjer luka i stremet između luka i ploča. Da bi se luk uopće kretao, mora jakost polja premašiti neku minimalnu vrijednost, koja ovisi o struji, materijalu ploča i njihovom razmaku.

Prekidač s uskim rasporima oblika cikcak-linije prikazuje slika 47. Raspori susjednih ploča jedni su prema drugima tako pomaknuti da luk poprima oblik cikcak-linije velike duljine. Ploče su



Sl. 47. Prekidač s uskim rasporima oblika cikcak-linije. a Shematski prikaz, b pogled sa strane; 1 kontaktni rogovi, 2 keramičke ploče, 3 elektromagnet, 4 svitak magneta

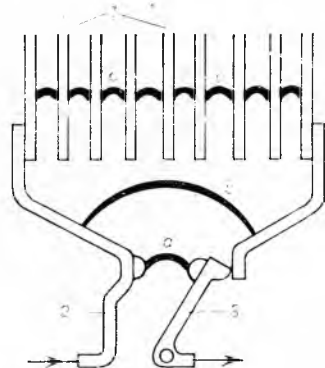
napravljene od vatrostalnog materijala na bazi cirkonija, velikog toplinskog kapaciteta i otporni prema naglim promjenama temperature. Na istom se principu osniva *aparat tipa »Solenarc«* prema sl. 48. Luk a se najprije penje po kontaktnim rogovima 3 do podnožnih limova 2 u obliku slova V. Na njima se dijeli u velik broj kraćih lukova b , koji ulaze u rasporu među pločama 1, te se pod utjecajem vlastitog magnetskog polja proširuju u petlje c , koje međusobno povezane oblikuju vrlo dugačku spiralu (solenoid).



Sl. 48. Aparat sa spiralnim lukom (»Solenarc«). 1 Izolacione ploče, 2 limovi oblika V, 3 kontaktni rogovi; a, b i c uzastopni položaji luka

Zahvaljujući velikom otporu luka u trenutku gašenja mogu se pomoću aparata s rasporima prekidači i male induktivne i kapacitivne struje uz vrlo male prenapone. Grade se za napone do 24 kV i snage kratkog spoja do 1000 MVA.

Prekidači s »deion« rešetkom (v. str. 122) osnivaju se na Slepianovom katodnom efektu, tj. pojavi da, neposredno nakon gašenja luka, uz relativno hladnu površinu katode nastaje tanak sloj deioniziranog medija probojne čvrstoće 250...300 V. Luk (sl. 49) tjera se u deionizaciju rešetku (»deion-grid«), koja se sastoji od niza među sobom izoliranih paralelnih metalnih ploča 1 s razmacima $\sim 1,5$ mm. Zauzimajući redom položaje a , b i c dugi se luk razbija u niz kratkih lukova. Broj se limova odabire tako da na jedan par ploča otpada 110...130 V; stoga ne može doći do ponovnog paljenja. Za funkciju aparata bitno je da ploče ostanu hladne, što se postiže prisilnim brzim kretanjem luka pomoću magnetskog polja. Takvi se prekidači grade do 17,5 kV i 500 MVA. (Treba spomenuti da analogna konstrukcija niskonaponskih aparata za istosmjernu struju radi na posve drugom principu.



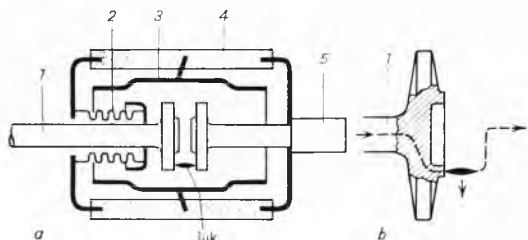
Sl. 49. Princip aparata s deion-rešetkom. a, b i c uzastopni položaji luka; 1 izolirane metalne ploče, 2 nepomični kontakt, 3 pomični kontakt

Njihovo se gašenje osniva na činjenici da ukupni napon parcijalnih lukova znatno premašuje napon jednog dugačkog luka zbog velikog broja anodnih i katodnih padova.)

Vakuumski prekidači. Iako se prve ideje o prekidanju struje u vakuumu javljaju već krajem prošlog stoljeća, do mogućnosti šire tehničke primjene dolazi tek nakon 1950. Osim tehnoloških poteškoća, osnovni su problem bili visoki prenaponi zbog naglog rezanja malih struja. U usporedbi s klasičnim izvedbama imaju vakuumski aparati niz prednosti: trajnost im je velika (preko 20 godina), njihovo održavanje svedeno je na minimum, kontakti su im uvijek metalno čisti, struja se prekida u prvoj nultočki bez povratnog paljenja, mogu se postaviti u eksplozijom ugroženoj okolini, hod kontakata je vrlo malen, dimenzije i težine tih aparata su male, a rad im je bežuman.

Načelnu izvedbu vakuumske lučne komore prikazuje sl. 50 a. Kontakti su sistem 1, 5 hermetički zatvoren u staklenom ili keramičkom cilindru 4, evakuiranom na 10^{-7} do 10^{-9} mmHg. Pomični kontakt 1, koji se pokreće izvana mehaničkom silom,

vezan je uz komoru pomoću elastičnog metalnog mijeha 2. Cilindrični zaslon 3 štiti unutarnju površinu izolacionog tijela od kondenzacije metalnih para. Kontakti su oblikovani tako (sl. 50 b) da struja čini petlju (crtkana linija) koja svojim magnetskim poljem tjera luk u smjeru strelice F na prošireni vijenac i time štiti dodirne plohe od trošenja. Kad se kontakti pod strujom razmaknu, ispari se dio metala na veoma uskom mjestu posljednjeg dodira, tako da »vakuumski« luk stvarno gori u metalnoj pari. On se iz katodne mrlje difuzno širi prema anodi stvarajući konus od $\sim 60^\circ$. Oblik konusa je posljedica suprotnog djelovanja vlastitog magnetskog polja, koje u blizini katode steže strujnice luka (*pinch effect*), i tlaka metalnih para, koje ga nastoje proširiti. Definitivno gašenje luka u prvoj nultočki objašnjava se upravo njegovim difuznim oblikom, zbog kojeg anoda ostaje hladna, te u momentu promjene polariteta ne može emitirati elektrone. Do rezanja malih struja dolazi uslijed toga što se s opadanjem struje tlak pare smanjuje brže nego magnetski tlak, te se luk steže na sve manji presjek.



Sl. 50. Vakuumska lučna komora. a Presjek, b detalj kontakta; 1 pomični kontakt, 2 metalni mijeh, 3 metalni zaslon, 4 izolaciono tijelo, 5 nepomični kontakt; okomita strelica označuje smjer magnetskog djelovanja polja na luk

Za vakuumski je luk karakteristično da se iznad određene jakosti struje (~ 100 A) cijepa u više paralelnih lukova, kojima se katodne mrlje kaotično kreću. Njihov je promjer svega nekoliko mikrometara, a gustoća struje u njima je goleme ($10^8 \dots 10^9$ A/cm²). S porastom struje katoda se sve jače grije, te se isparavanje metala i emisija elektronâ nastavljaju i nakon gašenja luka. To smanjuje brzinu kojom se uspostavlja probojna čvrstoća. (Ova je inače izvanredno velika zbog jake difuzije plazme u vakuum: do 25 kV/ μ s.) Time se dakako ograničava i prekidna moć aparata. Prekomjerno ugrijavanje katode može se spriječiti umjetno stvorenim magnetskim poljem koje uz vlastito kretanje lukova proizvodi još dodatnu brzu rotaciju (princip *rot-arc*). Kontaktni materijal mora biti posebno kvalitetan, s izvanredno malim sadržajem nečistoća koje se rasplinjuju, s određenom tenzijom para, određenim toplinskim svojstvima itd., jer sve to utječe na održavanje vakuumu, rezanje struje, trajnost kontakata i ostale karakteristike.

Danas se vakuumski prekidači grade pretežno za srednje napone do 15 kV i 10 kA prekidne moći, ali je u Velikoj Britaniji 1968 već proizveden aparat za 132 kV, 3500 MVA, s nekoliko lučnih komora u seriji.

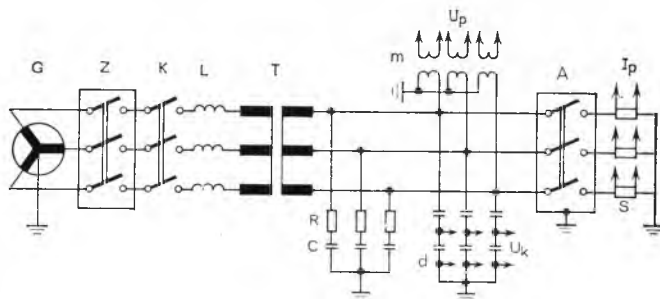
Ispitivanje prekidne moći prekidača

Ispitivanjem prekidne moći prekidača provjeravaju se u toku istraživanja i razvoja teoretske pretpostavke i utvrđuju granične sposobnosti nove konstrukcije, a u fazi proizvodnje njime se dokazuje da aparat ima zajamčene karakteristike. Ispitna stanica može biti bilo mrežnog ili laboratorijskog tipa, prema tome da li potrebnu energiju dobiva iz prenosne mreže ili iz vlastitih izvora (npr. specijalnih generatora udarne snage, poznatih pod imenom kratkospojnih generatora). Premda se u laboratorijskim stanicama s manje ili više koncentriranim impedancijama ne mogu u potpunosti imitirati stvarne prilike energetske sistema, ispitivanja u njima imaju mnoge prednosti pred ispitivanjima u mreži. U mrežama postoji relativno mali broj čvorišta velike snage pogodnih za ispitivanje; njihov se pogon ne smije ometati čestim kratkim spojevima i visokim prenaponima, a ispitni se parametri ne mogu po volji mijenjati. Velika mrežna stanica »Fontenay« francuske elektroprivrede omogućuje direktna jednopolna ispitivanja aparata za 245 kV, trofazne prekidne moći do 5,5 GVA. U novom

francuskom centru »Les Renardières« predviđa se za 1973 paralelni rad mreže sa dva kratkospojna generatora, te će se pri jednopolnom ispitivanju postići ekvivalentna trofazna ispitna snaga od 12 GVA pod naponom 420 kV. Ekonomski opravdana granica ispitne snage za generatorske stanice kreće se sada oko 5 GVA na stezaljkama generatora, odnosno 3,5 GVA na ispitivanom aparatu. Spomenute snage nisu dovoljne da bi se veći tipovi suvremenih prekidača ispitivali trolpolno u stvarnim pogonskim uvjetima. To pogotovo vrijedi za aparate u razvoju, ako se uzme u obzir da se za 5...10 godina mogu u velikim sistemima očekivati prekidne struje do 100 kA, odnosno trofazne prekidne snage od 40 GVA pri 245 kV do 130 GVA pri 765 kV. Zato se danas sve više primjenjuju i usavršavaju ispitne metode koje aparate velike prekidne moći podvrgavaju dovoljnim naprezanjima i uz manje ispitne snage.

Po definicijama Međunarodne elektrotehničke komisije (IEC) mogu se ispitivanja prekidne moći podijeliti u *direktna* i *sintetska*. Pri direktnom se ispitivanju dobivaju i prekidna struja i povratni napon iz jednog zajedničkog izvora (iz mreže ili generatora udarne snage). Sintetski ispitni krug sadrži dva odvojena izvora: strujni (npr. generator udarne snage) i naponski (npr. kondenzatorsku bateriju). Direktna se ispitivanja izvode u načelu trolpolno, a kad to nije moguće, jednopolno ili po elementima; sintetska se ispitivanja vrše jednopolno ili po elementima. Trolpolna se ispitivanja vrše na kompletnom aparatu, jednopolna na odvojenom polu aparata, a ispitivanja po elementima na jednom ili više serijski vezanih prekidnih elemenata jednog pola. Budući da su jedino pri direktnom trolpolnom ispitivanju radni uvjeti aparata jednaki onima u pogonu, često se nazivaju sve ostale metode *indirektnim ispitivanjima*.

Direktno ispitivanje prekidača. Sl. 51 prikazuje shemu *direktnog trolpolnog ispitivanja* s pomoću generatora udarne snage.

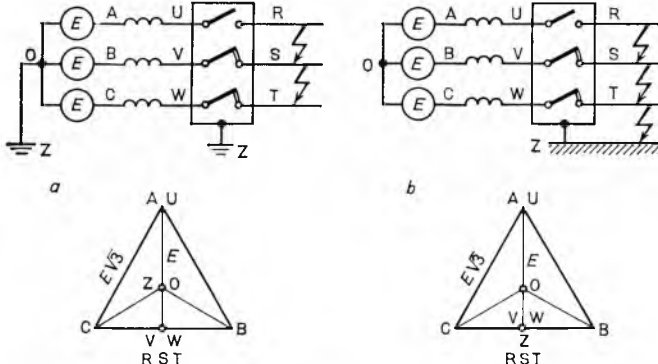


Sl. 51. Shema direktnog trolpolnog ispitivanja prekidne moći. G generator udarne snage, T transformator udarne snage, Z zaštitni prekidač, K kratkospojnik, A ispitivani prekidač; L, R, C elementi za podešavanje kruga; m mjerni naponski transformator, d djelilo napona, S šant za mjerenje struje; U_p , I_p priključci na petlajasti oscilograf; U_k priključci na katodni oscilograf

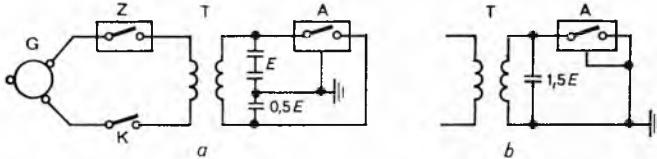
Uz prethodno zatvorene kontakte zaštitnog prekidača Z i ispitivanog prekidača A uspostavlja se kratki spoj uklapanjem specijalnog aparata K, tzv. kratkospojnika. Zatim se prekida struja otvaranjem ispitivanog prekidača A, a na kraju se otvara zaštitni prekidač Z. Katodni oscilograf, priključen na odvod U_k , snima visokofrekventne titraje prijelaznog povratnog napona, a petlajasti oscilografi, vezani na odvode U_p i I_p , bilježe povratni napon pogonske frekvencije i struju kratkog spoja. Impedancijama R, L, C podešavaju se željeni parametri struje i povratnog napona. Generator G specijalne je konstrukcije s abnormalno malom početnom i prolaznom reaktancijom, velikom čvrstoćom statorskog namota prema elektrodinamičkim silama i jakom udarnom uzbuđom u trenutku kratkog spoja. Namoti generatora i transformatora mogu se serijskim i paralelnim prespajanjem svitaka u zvijezdi i trokutu podešavati za široko područje napona i struja.

Jednopolnim ispitivanjem treba ispitivati pol aparata podvrgnuti takvim naprezanjima kakva se pojavljuju u najviše napregnutoj fazi trolpolnog prekidača. Ta najviše napregnuta faza redovito je ona faza u kojoj se luk najranije gasi. Sl. 52 a pokazuje naponske prilike za slučaj da je zvjezdaste kruto uzemljeno a trofazni kratki spoj izoliran od zemlje. Iz sheme i vektorskog dijagrama slijedi da pol koji prvi prekida ima za 50% povišeni po-

vratni napon, tj. $\overline{UR} = 1,5 E$, a izolacija njegovih priključnica U i R napregnuta je naponom $\overline{UZ} = E$, $\overline{RZ} = 0,5 E$ prema zemlji. Takve se prilike mogu imitirati jednopolnim ispitivanjem u ispitnom krugu prema sl. 53 a. Ako je, naprotiv, zvjezdište izolirano a trofazni kratki spoj vezan sa zemljom, kako to prikazuje slika 52 b, javljaju se na polu prvog prekida naponska naprezanja $\overline{UR} = \overline{UZ} = 1,5 E$, $\overline{RZ} = 0$. Ovakvim uvjetima odgovara jednopolni ispitni krug prema slici 53 b.

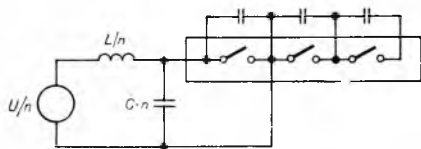


Sl. 52. Naponske prilike u polu koji prvi prekida. a) Zvjezdište uzemljeno, kratki spoj neuzemljen; b) zvjezdište izolirano, kratki spoj uzemljen



Sl. 53. Jednopolno ispitivanje prekidne moći za mreže s uzemljenim zvjezdištem (a) i za mreže s izoliranim zvjezdištem (b). G generator, K kratkospojnik, Z zaštitni prekidač, T transformator, A ispitivani prekidač

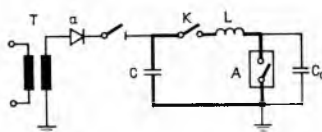
Ispitivanje po elementima primjenjuje se za prekidače vrlo visokog napona i velike prekidne moći s višestrukim prekidanjem i točno definiranim nepromjenljivom razdiobom povratnog napona na pojedine elemente, koja se postiže prigradnjom paralelnih otpora ili kondenzatora. Sl. 54 prikazuje ispitivanje jednog elementa aparata s trostrukim prekidom, tj. sa $n = 3$ elementa



Sl. 54. Ispitivanje po elementima. Prekidač ima 3 prekidna elementa po fazi

po polu. Ako prekidač ima jednoliku razdiobu potencijala, potreban je umjesto punog napona U , propisanog za ispitivanje jednog pola, samo parcijalni ispitni napon U/n . Da bi se pri tome postigla puna prekidna struja i vlastita frekvencija, treba induktivitet prigušnice smanjiti na L/n , a kapacitet u krugu povećati na $C \cdot n$.

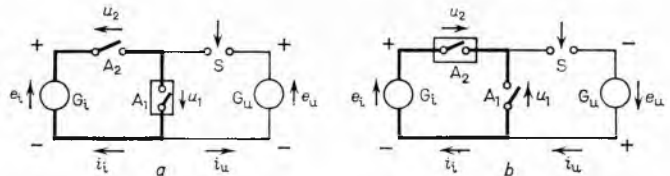
Po zamisli A. A. Goreva iz 1937 može se za direktna ispitivanja upotrijebiti *titrajni krug* prema sl. 55, u kojem je kratkospojni generator nadomješten velikom kondenzatorskom baterijom C , prethodno nabijenom na visoki napon pomoću transformatora T i ispravljača a . Zatvaranjem kratkospojnika K počinje periodičko izbijanje baterije u krugu $C-K-L-A$. Kapacitet C kondenzatora C i induktivitet L prigušnice L tako su odabrani, da struja kratkog spoja titra pogonskom frekvencijom 50 Hz.



Sl. 55. Ispitni titrajni krug po Gorevu. T Transformator, a ispravljač, K kratkospojnik, A ispitivani prekidač, C nabijena kondenzatorska baterija kao izvor udarne snage

Otvaranjem ispitivanog aparata A uključuje se u krug kondenzator C_0 , kojim se postiže željena frekvencija prijelaznog povratnog napona.

Sintetsko ispitivanje prekidača osniva se na činjenici da se prekidna struja i povratni napon prekidača ne javljaju istodobno, pa mu se stoga mogu dovoditi iz različitih izvora. Generator udarne snage može određenu prekidnu struju I proizvesti uz relativno niski povratni napon U_1 , što odgovara direktnoj prekidnoj snazi $P_{dtr} = I U_1$. Ako se generator upotrijebi samo kao izvor struje I a kondenzatorska baterija kao izvor n puta višeg povratnog napona $U_u = n U_1$, dobiva se time i n puta veća sintetska prekidna snaga $P_{sin} = I U_u = n P_{dtr}$. U načelnoj shemi sintetskog ispitivanja prema sl. 56 predložuju G_1 i G_u izvore struje i napona, A_1 i A_2 prekidače koji se istodobno otvaraju, a S elektronski upravljano iskrište za priključak povratnog napona u željenom trenutku. Pravokutnikom je označen *ispitivani* prekidač, a drugi je prekidač *pomoćni*. Probijem iskrišta neposredno prije prolaza struje kroz nulu dobiva se ispitivanje na principu injekcije struje, a probijem neposredno nakon nultoečke ispitivanje na principu injekcije napona. U oba se slučaja mogu izvori povezati s ispitivanim aparatom bilo paralelno (shema sl. 56 a), ili u seriju (shema sl. 56 b). Pri ispitivanju po shemi sl. 56 a priključen je izvor napona paralelno ispitivanom aparatu, a po shemi sl. 56 b paralelno pomoćnom aparatu. Koja će se od obiju metoda ostvariti i koji će aparat biti ispitni ovisi o odnosu polariteta naponskog i strujnog izvora u trenutku probijanja iskrišta. Uz jednake polaritete s obzirom na paralelnu granu kruga, tj. na aparat A_1 , dobiva se shema prema sl. 56 a, uz suprotne polaritete shema sl. 56 b. Strelice pokazuju pripadne smjerove struja i povratnih napona.



Sl. 56. Načelna shema sintetskog ispitivanja. Naponski izvor G_u priključen paralelno: a) ispitivanom prekidaču, b) pomoćnom prekidaču; S iskrište, G_1 izvor struje, G_u izvor napona. Ispitivani prekidač označen je pravokutnikom

U ispitnom krugu *po principu injekcije struje*, spojenom prema shemi sl. 56 a, određeni su povratni naponi i prekidne struje jednadžbama

$$u_1 = e_u, \quad u_2 = e_u - e_1; \quad i_1 = i_1 + i_u, \quad i_2 = i_1,$$

gdje su u_1, u_2 povratni naponi, a i_1, i_2 prekidne struje kroz prekidače A_1 i A_2 . Ovdje se, dakle, aparat A_1 smatra ispitivanim prekidačem, jer je izložen većim naprezanjima ($u_1 > u_2, i_1 > i_2$). Prelaskom na spoj prema shemi sl. 56 b postaje

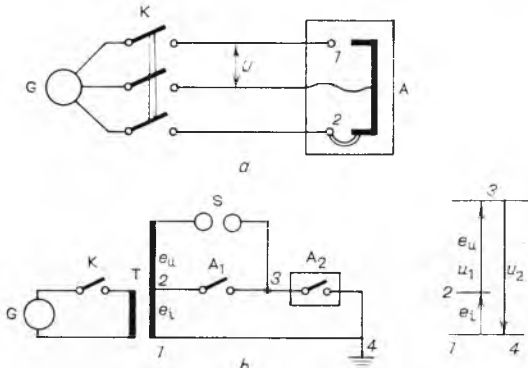
$$u_1 = e_u, \quad u_2 = e_u + e_1; \quad i_1 = i_1 - i_u, \quad i_2 = i_1,$$

što znači da se promijenio odnos naprezanja ($u_1 < u_2, i_1 < i_2$), te su i aparati zamijenili uloge.

Analogna razmatranja vrijede za ispitni krug *po principu injekcije napona*. Budući da se u tom slučaju izvor G_u priključuje tek nakon nultoečke struje, određena je prekidna struja za obje sheme sl. 56 a i b jednakžbom $i_1 = i_2 = i_1$, a jednakžbe povratnih napona ostaju nepromijenjene. Metoda injekcije struje naziva se često *dvofrekventnom* jer se struja u jednom od prekidača sastoji od osnovne komponente i_1 pogonske frekvencije 50 Hz i injektirane struje i_u koja redovito titra znatno višom frekvencijom. Ispitivanje injekcijom napona poznato je i pod nazivom *jednofrekventne metode*.

Od preteča modernih sintetskih krugova prikazana su u sl. 57 dva razvojna oblika. J. Biermanns predložio je 1925 za aparate sa dva prekidna mjesta po fazi ispitni krug prema sl. 57 a, kojim se ispituje jedan pol u trofaznom krugu. Dok traje luk, kontakti su opterećeni jednakom strujom kratkog spoja kao pri direktnom trolpolnom ispitivanju. Povratni napon na mjestu prvog prekida 1 iznosi u početku $1,5 U/\sqrt{3}$, a nakon gašenja drugog luka poraste na puni linijski napon U . Na mjestu drugog prekida 2 javlja se odmah napon U . Pri trolpolnom ispitivanju nastao bi na polu u kojem se luk najranije gasi napon $1,5 U/\sqrt{3}$, od kojeg na svako prekidno mjesto otpada $0,75 U/\sqrt{3} = 0,43 U$. Prema tome se opisanim načinom povratni napon povisuje u omjeru 1 : 0,43, tj. na 2,3-struko u usporedbi s trolpolnim ispitivanjem.

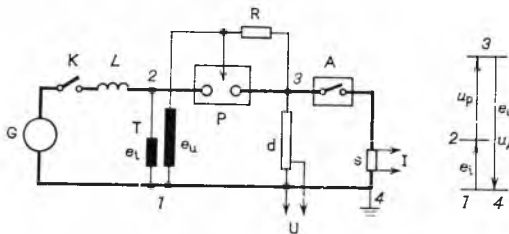
W. F. Skeats je 1936 u ispitni krug prema shemi sl. 57 b uveo transformator T, čiji sekundarni namot jednim dijelom služi kao izvor jake struje, a drugim kao izvor visokog napona. Dok u prekidačima A_1 i A_2 traje luk, transformator se nalazi u kratkom spoju, njegov se primarni i sekundarni magnetski tok međusobno poništavaju, pa je stoga $e_u = 0$. Nakon gašenja luka javlja se na serijskom spoju aparata A_1 i A_2 najprije povratni napon kruga jake struje e_1 , čija raspodjela na pojedine prekidače nije strogo definirana. Kad sekundarni napon dovoljno poraste, nastupa proboj na iskrištu S, čime se pomoćni prekidač A_1 prebacuje na visoki napon $u_1 = e_u$, a ispitivani prekidač A_2 prebacuje se na napon $u_2 = e_1 + e_u$. Ispitni krug ne sadrži potrebnih elemenata za postizanje određenog oblika povratnog napona, koji u toku ispitivanja još i varira zbog velikog rasipanja probojne čvrstoće iskrišta.



Sl. 57. Ispitni krugovi po Biermannsu (a) i Skeatsu (b). G Generator, K kratkospojnik, T transformator, S iskrište, A_1 pomoćni prekidač, A_2 ispitivani prekidač

U opisanom krugu prema sl. 57 b luk prekidača ne može trajati dulje od jedne poluperiode jer pomoćni prekidač A_1 , napretnut manjim povratnim naponom u_1 , blokira vezu s namotom jake struje. Ako ni povratni napon u_2 ne probije kontaktni razmak ispitivanog aparata, smatra se da je prekidač A_2 zadovoljio. U tom će se slučaju u katodnom oscilogramu napona u_2 vidjeti normalni titrajni proces. Ako pak dođe do proboja, oscilogram će pokazivati nagli pad krivulje povratnog napona uz trenutni prolaz neznatne struje iz visokonaponskoga kruga. Takav negativni rezultat ne dopušta nikakav zaključak o prekidnoj sposobnosti onih tipova aparata koji za gašenje luka normalno trebaju više od jedne poluperiode.

Zbog navedenih nedostataka doživjela je Skeatsova shema različite modifikacije. U varijanti firme Merlin & Gerin prema sl. 58 napaja se krug jake struje direktno iz generatora G, a naponski krug iz transformatora T; pomoćni je prekidač nadomješten specijalnim upravljanim iskrištem P, koje omogućuje da se ispitivanje produži na više polualova struje. Za vrijeme gorenja luka primarna je strana transformatora kratko premoštena te sekundarni namot ne daje napona. Gašenjem luka uzbudi se primarni namot, pa se u sekundarnom inducira napon e_u , koji se prenosi na ispitivani aparat A. Ako prekidač A ne izdrži naprezanja od povratnog napona $u_A = e_u$, poteći će sekundarna struja i padom napona u otporu R izazvati proboj između srednje i desne elektrode iskrišta. Proboj se prisilnim duvanjem odmah proširuje na lijevu elektrodu, te na taj način ponovo zatvara krug jake struje.

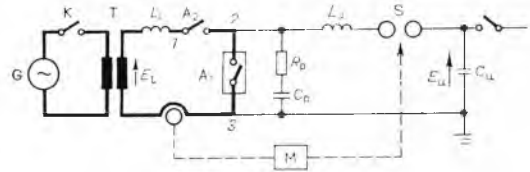


Sl. 58. Sintetski krug firme Merlin & Gerin. G Generator, K kratkospojnik, T transformator, P upravljanom iskrište, A ispitivani prekidač, s šant, d dijelilo napona, I i U priključci za oscilograf

Od novijih sistema na principu injektije struje dostigle su visok stupanj savršenstva metode F. Weil-G. Dobke firme AEG iz 1942 i V. V. Kaplan-V. M. Našatir iz 1951, a od sistema na principu injektije napona poznati su »komponentni spojevi I i II« firme Siemens iz 1957. Spomenuti krugovi sadrže sve potrebne elemente za precizno uključivanje naponskoga kruga u željenom trenutku i za postizanje unaprijed odabranog oblika struje i napona u intervalu gašenja.

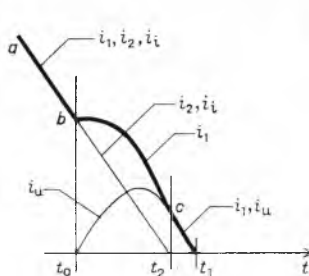
Sl. 59 prikazuje ispitni krug metode Weil-Dobke. U njemu kao izvor visokog napona služi nabijena kondenzatorska baterija C_u , koja je priključena paralelno ispitivanom aparatu A_1 . Krug jake struje napaja se iz generatora G s transformatorom T. Simbol E_1 označava amplitudu izmjenične elektromotorne sile transformatora, a E_u istosmjerni napon baterije kondenzatora. Povratni napon e_1 (dobiven iz transformatora) djeluje među točkama 1 i 3,

a povratni napon e_u (dobiven iz baterije kondenzatora) djeluje među točkama 2 i 3. Jakost struje podešava se promjenom induktiviteta prigušnice L_1 , a oblik povratnog napona podešava se promjenom impedancije elemenata L_u , R_p , C_p . Da ne bi došlo do stanke između momenta završetka struje i početka povratnog napona, uključuje se naponski krug neposredno prije gašenja luka.

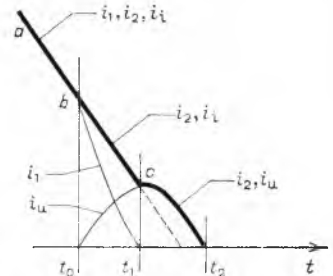


Sl. 59. Ispitni krug po metodi Weil-Dobke. G Generator, K kratkospojnik, T transformator, A_1 ispitivani prekidač, A_2 pomoćni prekidač, M upravljački uređaj iskrišta S, C_u nabijena kondenzatorska baterija kao izvor visokog napona

To se postiže probijem iskrišta S pomoću strujnoovisnog upravljačkog uređaja M. Trenutak proboja t_0 i frekvenciju injektirane struje i_u treba prilagoditi karakteristici luka ispitivanog prekidača, kako bi se spriječila znatnija deformacija njegove struje $i_1 = i_1 + i_u$. Zato treba proboj izvršiti prije nego što započne strmi porast napona luka prema naponu gašenja. Vremenski tok pojedinih struja vidi se u sl. 60. Da bi uvjeti gašenja pri sintetskom i direktnom ispitivanju bili što sličniji, mora se struja u oba slučaja jednakom



Sl. 60. Struje u krugu Weil-Dobke



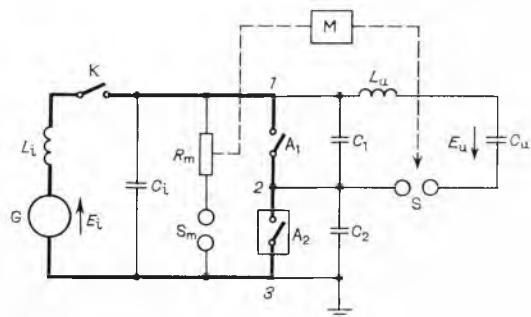
Sl. 61. Struje u krugu Kaplan-Našatir

brzinom približavati nuli. Od trenutka t_2 , kada se gasi luk u pomoćnom prekidaču A_2 , prolazi ispitivanim aparatom samo injektirana struja. Zato treba njenu amplitudu i frekvenciju uskladiti tako da bude

$$\left(\frac{di_u}{dt}\right)_0 = \left(\frac{di_1}{dt}\right)_0$$

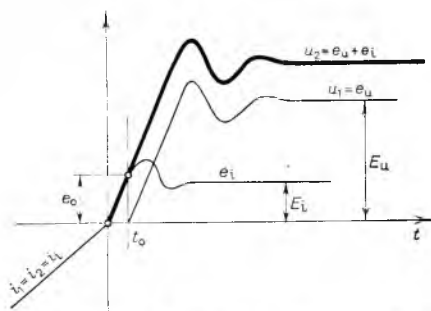
Ispitni krug Kaplan-Našatir razlikuje se od prethodnoga po tome što je njegov visokonaponski krug priključen paralelno pomoćnom prekidaču. Polaritet mu je odabran tako da A_1 postaje pomoćni, a A_2 ispitivani prekidač. Prema tome se u aparatu A_1 struja i_u naponskog izvora superponira struji generatora i_1 sa suprotnim predznakom. Razdiobu struja u pojedinim granama ispitivanoga kruga predočuje sl. 61.

Siemensovi »komponentni spojevi« razlikuju se jedan od drugog po tome što je u spoju I izvor napona priključen paralelno ispi-



Sl. 62. Siemensov »komponentni spoj II«. G Generator, K kratkospojnik, S_m mjerno iskrište, A_1 pomoćni prekidač, A_2 ispitivani prekidač, M upravljački uređaj iskrišta S za uključivanje visokonaponskoga kruga, C_u nabijena kondenzatorska baterija kao izvor visokog napona

tivanom, a u spoju II paralelno pomoćnom prekidaču. Njihova se osnovna ideja može razabrati iz pojednostavnjene sheme spoja II u sl. 62. Ovdje generatorski krug daje cjelokupnu struju i početni dio povratnog napona, a preostali se dio povratnog napona dobiva iz nabijene kondenzatorske baterije C_u . Probijem na iskrištu S pomoću djelovanja naponski ovisnog upravljačkog uređaja M uključuje se visokonaponski krug nakon gašenja luka. Trenutak proboja t_0 odabire se tako da neznatno prethodi trenutku pojave prve amplitude povratnog napona iz generatorskoga kruga. To se postiže prikladno podešenim mjernim iskrištem S_m , koje se pali pri određenom iznosu e_0 generatorskog povratnog napona, a time stvoreni pad napona na mjernom otporniku R_m izaziva djelovanje upravljačkog uređaja M.



Sl. 63. Naponi i struje u krugu prema sl. 62

Do proboja iskrišta djeluje među točkama 1 i 3 povratni napon e_1 iz kruga jake struje. On se na prekidače dijeli obratno razmjerno paralelnim kapacitetima:

$$u_1 = e_1 \cdot \frac{C_2}{C_1 + C_2}, \quad u_2 = e_1 \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2}.$$

Uz $C_1 \gg C_2$ postaje $u_1 = 0$, $u_2 = e_1$. To znači da povratni napon e_u iz visokonaponskog izvora, priključen među točkama 1 i 2, počinje u trenutku t_0 nabijati ispražnjeni kondenzator kapaciteta C_1 , pa mu je stoga početna vrijednost $e_u(t_0) = 0$. Vremensku promjenu pojedinih napona i struja pokazuje sl. 63.

Visokonaponske sklopke

Upotreba relativno skupih prekidača s pripadnim rastavljačima pokazala se u mnogim slučajevima ekonomski neopravdanom. To se prvenstveno odnosi na prekidače koji se primjenjuju u krajnjim stanicama i na prekidače za sklanjanje prstenastih mreža, visokonaponskih motora i manjih kondenzatorskih baterija. Jedan od pokušaja u traženju jeftinijih rješenja bila je serijska kombinacija rastavljača s osiguračima velike prekidne moći. Rastavljač je služio za uklop struje do iznosa normalnog tereta i za isključivanje u praznom hodu, a osigurači su prekidali struje preopterećenja i kratkog spoja. Za isklapanje jednog odvojka pod teretom trebalo je aktivirati grupni prekidač i nakon svakog preopterećenja obustavljati pogon radi zamjene osigurača. Pregaranje osigurača u jednoj fazi uzrokovalo je u nekim slučajevima visoke prenapone uslijed ferorezonancije. Zbog navedenih su se nedostataka oko 1930 počeli uvoditi mali rastavni prekidači za sklanjanje struja normalnog pogona i preopterećenja, ali i za prekidanje struja kratkog spoja u granicama njihove prekidne moći (do 25 MVA uz faktor snage 0,15). Zaštitu od jačih kratkih spojeva preuzimaju osigurači s ugrađenim udarnim svornikom. Pregori li osigurač u bilo kojoj fazi, dolazi do trolnog isklopa djelovanjem udarnog svornika na zaporni mehanizam rastavnog prekidača. Budući da su i ovakvi aparati za mnoge svrhe preskupi, pronađeno je dodatno rješenje u sklopkama i rastavnim sklopkama koje ne mogu prekidati struje kratkog spoja.

Vrste visokonaponskih sklopki. S obzirom na pogonske uvjete, danas se susreću tri glavne vrste sklopki: sklopke za opću primjenu, za neopterećene transformatore i za kondenzatorske baterije.

Sklopke za opću primjenu mogu, u skladu s preporukama IEC, prekidati pretežno omske terete ($\cos \varphi \geq 0,7$) do visine nazivne struje trajnog pogona, a mogu isklapati i struje neopterećenih

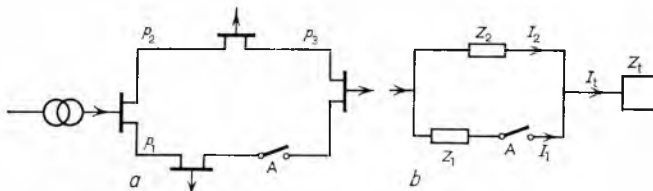
transformatora do određene nazivne vrijednosti. Ako im nazivna struja trajnog opterećenja nije manja od 200 A, moraju uz to imati i sposobnost da prekidaju određene struje prstenastih vodova, neopterećenih dalekovoda i neopterećenih kabela. Prekidanje prstenastog voda ilustrira slika 64 a. Nakon otvaranja sklopke A ostaju obje njene stezaljke na zajedničkom potencijalu izvora, umanjenom za padove napona u pripadnim granama mreže (p_1 , odnosno $p_2 + p_3$). Zato se među njima javlja povratni napon u_A jednak razlici padova napona $u_A = (p_2 + p_3) - p_1$, koja je mnogo manja od napona mreže. Faktor snage u procesu prekidanja može biti malen, unatoč pretežno omskom karakteru priključenih potrošača, uslijed značajnog utjecaja impedancije vodova u prstenu. To je naročito očigledno u pojednostavnjenoj shemi sl. 64 b, koja odgovara slučaju s jednim priključenim trošilom impedancije Z_1 . U zatvorenom položaju sklopke dijeli se struja tereta I_t na pojedine grane prstena ovisno o njihovim impedancijama, pa je struja I_1 u simboličkom obliku određena jednadžbom

$$I_1 = I_t \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}.$$

Uz pretpostavku da se struja I_t (zbog $Z_1, Z_2 \ll Z_t$) ne mijenja otvaranjem sklopke, dobiva se u otvorenom položaju $I_2 = I_1$. Ovom strujom proizvedeni pad napona ujedno je i povratni napon sklopke

$$U_p = I_2 Z_2 = I_1 Z_2 = I_1 (Z_1 + Z_2).$$

Posljednja relacija pokazuje da su u ovom jednostavnom slučaju povratni napon i njegov fazni pomak prema struji I_1 određeni samo impedancijama prstena i opterećenjem I_t , neovisno o faktoru snage potrošača. Zato se prema IEC sposobnost sklopke za prekidanje prstenaste mreže ispituje samo sa 25% nazivnog napona uz $\cos \varphi = 0,3$.

Sl. 64. Prekidanje struje u prstenastoj mreži. a) Utjecaj padova napona u pojedinim granama mreže na povratni napon sklopke, b) pojednostavljena shema s jednim trošilom Z_1 ; A sklopka, p padovi napona, Z impedancije

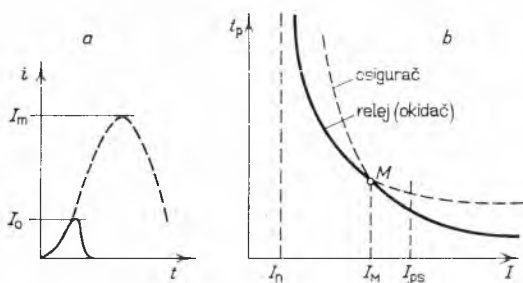
Sklopke za neopterećene transformatore definirane su prema IEC kao aparati koji mogu prekidati određenu malu induktivnu struju transformatora u praznom hodu. Ne moraju biti sposobne da prekidaju svoje normalne struje trajnog pogona, te se blokiraju protiv eventualnog otvaranja pod teretom.

Sklopke za kondenzatorske baterije mogu isklapati kapacitivne struje kondenzatorskih baterija do iznosa svoje nazivne struje trajnog pogona. Da bi se izbjegli opasni prenaponi, ne smije u toku prekidanja doći do ponovnih paljenja luka, što se između ostalog postiže povećanom brzinom kretanja kontakata. Primjena tih sklopki ograničava se na samostalne kondenzatorske baterije, što znači da u njihovoj blizini nije na mrežu priključena neka druga baterija koja bi se u trenutku zatvaranja sklopke mogla izbijati kroz njene kontakte i znatno povećati uklopnu struju.

Uz nabrojene se vrste sklopki grade i **sklopke za visokonaponske motore**. One normalno isklapaju nazivnu struju motora, a uklapaju i do 8 puta veću struju zaleta, koju u iznimnim slučajevima moraju i prekinuti. To se npr. događa ako motor u trenutku pokretanja ostane mehanički zakačen ili mu pri uklopu pregori osigurač u vodiču jedne faze, te nadstrujna zaštita izazove otvaranje sklopke.

Na temelju ovako ograničenih zahtjeva u pogledu karakteristika i područja primjene pojedinih tipova sklopki postignute su veoma ekonomične konstrukcije, nastale prigradnjom jednostavnih lučnih komora na rastavljače. Ponekad se od sklopki ipak zahtijeva i kratkospojna uklopna moć, određena maksimalnom amplitudom I_m struje kratkog spoja, jer uvijek postoji neka mala vjerojatnost da narinuti napon u trenutku uklopa ošteti izolaciju kruga.

Ako se aparat primijeni u kombinaciji s osiguračima, može se uklopna moć same sklopke odabrati prema znatno manjem iznosu tzv. odrezane struje I_0 , tj. najveće trenutne vrijednosti uklopne struje koju osigurač propušta do trenutka pregaranja (sl. 65 a).

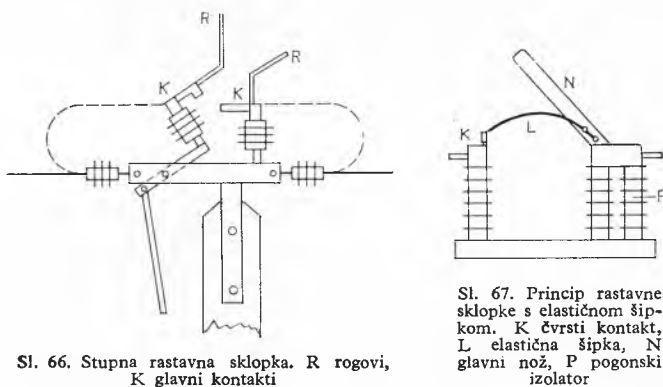


Sl. 65. Strujno-vremenski dijagrami kombinacije sklopka-osigurača. a) Odnos amplitude I_m prirodne struje kratkog spoja i najmanje potrebne uklopne moći sklopke, jednake odrezanoj struji I_0 ; b) zaštitna karakteristika kombinacije $t_p(I)$; t_p vrijeme prorade zaštite ili pregaranja osigurača, I prekidna struja, I_n nazivna struja kombinacije, I_{ps} prekidna moć same sklopke

Da bi se takvom kombinacijom postigla i zaštita od manjih preopterećenja, treba sklopke snabdjeti još i nadstrujnim (većinom termičkim) okidačima ili relejima. Njihovu karakteristiku treba prema sl. 65 b uskladiti s karakteristikom osigurača tako da struja I_M u presjecištu M obiju karakteristika bude manja od prekidne moći I_{ps} same sklopke. Dijagram pokazuje vremena prorade releja ili okidača i vremena t_p pregaranja osigurača uz različite efektivne vrijednosti struje I . Debelo izvučeni dio krivulja predstavlja zaštitnu karakteristiku cijele kombinacije, a vrijednost I_n njenu nazivnu struju trajnog pogona.

Gašenje luka u sklopkama. Za gašenje luka danas se u sklopkama pretežno primjenjuju četiri principa: princip naglog produženja luka u zraku, princip autopneumatskog gašenja zračnim mlazom, princip cijevne ili plosnate plinotvorne komore i princip magnetskog gašenja u uskim rasporima. Rjeđe se primjenjuje gašenje luka u ulju ili sumpornom heksafluoridu i gašenje luka u vakuumu.

U grupu sklopki s naglim produženjem luka u zraku ide npr. stupna rastavna sklopka, koja je shematski prikazana u sl. 66. Postavlja se na stupove nadzemnih vodova do 35 kV i služi za njihovo isklapanje u praznom hodu. Rogovi R gube međusobni

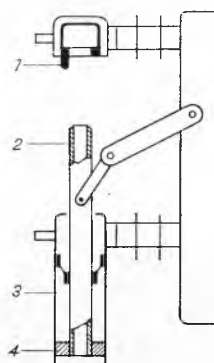


Sl. 67. Princip rastavne sklopke s elastičnom šipkom. K čvrsti kontakt, L elastična šipka, N glavni nož, P pogonski izolator

dodir tek nakon otvaranja glavnih kontakata K. Luk se na njima brzo produžuje uslijed magnetskog polja i uzgona ugrijanog zraka. U istu se skupinu ubraja sklopka s naglim isklapanom prema sl. 67. Zakretanjem izolatora P otvara se glavni nož N, a na njemu paralelno montirana elastična šipka L ostaje zapeta za nepomični kontakt K. Tek kad šipka postigne određenu zakrivljenost, njen se kraj oslobodi i ona naglo poleti za glavnim nožem, brzinom neovisnom o brzini kojom se on otvara. Pri tom šipka povlači za sobom električni luk. Aparat služi za isklapanje neopterećenih transformatora i kratkih vodova, a gradi se i za napone preko 100 kV.

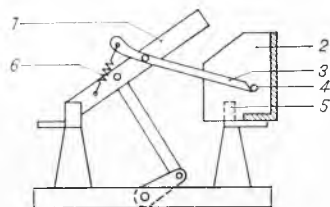
Princip *autopneumatske rastavne sklopke* prikazuje sl. 68. Pomični šupljik kontakt 2 nosi na donjem kraju stap 4, koji pri isklapanju (kretanju prema dolje) komprimira zrak u cilindru 3. Zračni mlaz struji kroz šupljik kontakt 2 prema luku koji gori između vrha pomičnog kontakta i produženog prsta 1 na gornjem nepomičnom kontaktu i gasi ga.

Jednu od izvedbi rastavne sklopke s plosnatom plinotvornom komorom predložuje sl. 69.



Sl. 68. Princip autopneumatske rastavne sklopke. 1 Produženi prst, 2 pomični šupljik kontakt, 3 cilindar, 4 stap

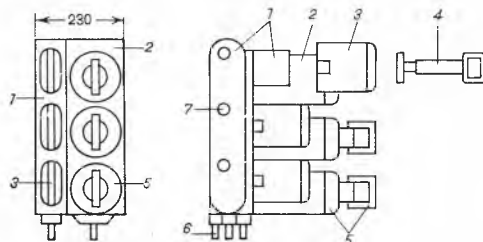
U komori 2, sastavljenoj od dvije paralelne plinotvorne ploče, smješten je lučni kontakt 4, galvanski vezan s glavnim kontaktom 5. Dok je sklopka zatvorena, nalazi se pomična lučna šipka 3 u komori ispod kontakata 4, a glavni nož 1 leži u kontaktu 5 izvan lučne komore. Kontakt 4 s gornje je



Sl. 69. Princip plinotvorne rastavne sklopke s plosnatom komorom. 1 Glavni nož, 2 plinotvorna komora, 3 pomična lučna šipka, 4 lučni kontakt, 5 glavni kontakt, 6 opruga

strane koso odrezan, tako da se pod pritiskom šipke pri uklopu izmakne i propusti je u donji položaj. Za vrijeme isklapa otvaraju se najprije glavni kontakti 1 i 5, a šipka ostaje pritisnuta uz donju plohu lučnog kontakta, te se zakreće oko zgloba u glavnom nožu. Posebna opruga 6 nastoji šipku vratiti u smjer glavnog noža. U trenutku kad kraj šipke napusti kontakt 4, razvije se u komori električni luk, koji se gasi pod utjecajem hladnih stijenki i razvijenih plinova. Takvim se sistemom mogu prekidati struje do 1000 A.

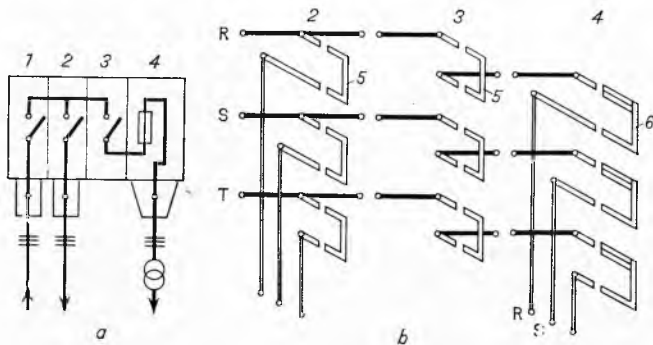
U sklopkama s plinotvornim cijevnim komorama tipa Magnefix za napon 12 kV primijenila je nizozemska firma Hazemeyer također princip gašenja luka plinovima razvitim iz čvrstih tijela.



Sl. 70. Sklopka s osiguračem tipa Magnefix. 1 Tijelo sklopke, 2 tijelo osigurača, 3 kapa sklopke, 4 ručica sklopke, 5 kapa osigurača s ručicom, 6 priključak kabela, 7 spojni otvor sabirnica

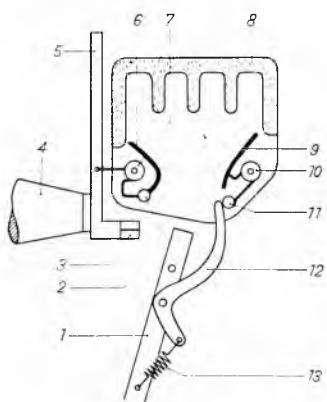
Te sklopke imaju sve vodljiv i dijelove zalivene u umjetnoj smoli. U istom su bloku zalivene horizontalne sabirnice za spajanje više sklopkih polja i vertikalne žile za priključak kabela. Time što su uz to polovi aparata smješteni u vertikalnoj ravnini jedan iznad drugog, postignute su minimalne dimenzije (širina ~ 90 mm). Analogno je izveden blok trolnog osigurača, te se bočnom prigradnjom dobiva kombinacija sklopke s osiguračem (širine ~ 230 mm). Njen se vanjski oblik vidi u sl. 70. Takva sklopka s plinotvornim cijevnim komorama ima prekidnu moć 400 A uz $\cos \varphi = 0,7$ i uklopnu moć od 30 kA.

Da bi aparat bio što jednostavniji i što jeftiniji, izveden je samo za uzastopno jednopolno ručno sklopanje pojedinih faza, što se vrši skidanjem ili stavljanjem sklopkih kapa 3 pomoću ručice 4 s uklopnim oprugama. Ručica (zajednička za više sklopki) zatakne se u žlijeb na čelu sklopne kape. Tijelo sklopke 1 sadrži nepomične dijelove glavnih kontakata i čvrste lučne kontakte u plinotvornim cijevima, a u kapama 3 nalaze se pomični kontakti mostovi s isklapnim oprugama. Pri skidanju kape otvaraju se najprije glavni kontakti i time napinju isklapne opruge lučnih kontaktnih mostova koje permanentni magnet fiksira u zatvorenom položaju. Kad su isklapne opruge do kraja napete, popusti sila magneta, te se lučni kontakti naglo otvore brzinom koja je određena silom isklapnih opruga. Pri uklopanju napinje se najprije uklopna opruga u ručici 4 i tek zatim uskače sklopna kapa u zatvoreni položaj točno definiranim brzinom. Standardni ulošci osigurača umeću se i vade pomoću izolacionih kapa 5 koje imaju prikladne ručice, a blokirane su u svom ležištu dok je sklopka zatvorena. Prostorni raspored strujnih krugova u razvodnoj bateriji sastavljenoj od elemenata sistema Magnefix prikazuje sl. 71.



Sl. 71. Raspored elemenata u sistemu Magniflex. a Shema postrojenja, b prostorni raspored sklopki, osigurača i vodova; 1 ulazno kabelsko polje, 2 izlazno kabelsko polje, 3 i 4 transformatorsko polje, 5 sklopke, 6 osigurači

Sklopke s gašenjem luka u uskim rasporedima rade po principu ranije objašnjenom na temelju sl. 46, ali su mnogo jednostavnije konstrukcije nego prekidači s uskim rasporedima. Osnovna ideja izvedbe s plosnatom lučnom komorom vidi se u sl. 72. U procesu isklapanja otvaraju se najprije glavni kontakti 1 i 3, dok lučni nož 12 ostaje još kratko vrijeme zadržan na lučnom kontaktu 2, a zatim

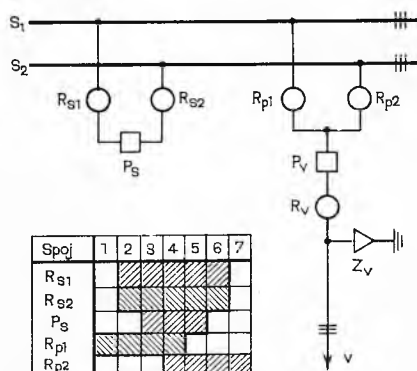


ga napeta opruga 13 velikom brzinom prebaci na granični kontakt 11. Pri tome se uzastopno uzbuđuju magnetski svici 7 i 10 te se luk penje po rogovima 6 i 9 u gornji dio komore. Na taj se način prisilno produljuje među vertikalnim rebri, deionizira u dodiru s hladnim pločama i gasi.

Sl. 72. Rastavna sklopka s plosnatom keramičkom komorom. 1 Glavni nož, 2 lučni kontakt, 3 glavni kontakt, 4 potporni izolator, 5 gornja priključnica, 6 lučni rog, 7 magnetski svitak, 8 keramička ploča, 9 lučni rog, 10 magnetski svitak, 11 granični kontakt, 12 lučni nož, 13 opruga

Rastavljači i aparati za uzemljenje

Po svojoj funkciji rastavljači spadaju među najjednostavnije aparate, ali se njihovoj pogonskoj sigurnosti, dimenzijama i cijeni pridaje velika važnost. To je razumljivo s obzirom na njihovu ulogu u zaštiti osoblja, širinu primjene i značaj inješta ugradnje (kao što su priključci na sabirnice ili čvorišta i odvoji nadzemnih vodova i kabela). Rastavljači većinom služe za vidljivo odvajanje pojedinih elemenata od izvora energije ili njihovo preklapanje od jednog izvora na drugi; aparati za uzemljenje, pak, spajaju pojedine dijelove strujnog kruga sa zemljom. Rastavljači su u načelu predviđeni za sklanjanje u praznom hodu, ali se u određenim uvjetima dopušta da im se kontakti otvaraju i zatvaraju također pod opterećenjem.

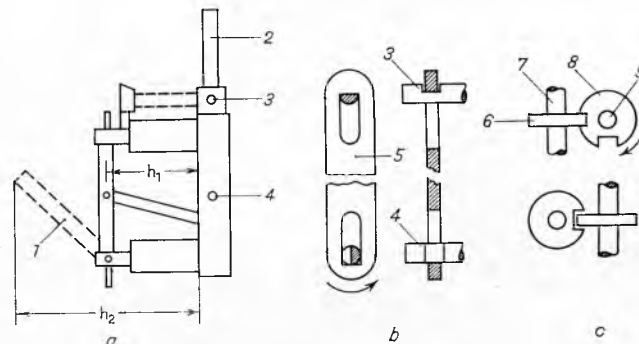


Sl. 73. Prespajanje dvostrukih sabirnica pod teretom. S Sabirnice, R rastavljači, P prekidači, Z aparat za uzemljenje, v dalekovod

Takav je slučaj prikazan jednopolnom shemom stanice sa dva sistema sabirnice prema sl. 73. U njoj kvadratični simboli označuju prekidače (P), kružni simboli rastavljače (R), a trokutni aparate za uzemljenje (Z). Pretpostavimo da dalekovod V treba prespojiti od jednih sabirnice (S₁) na druge (S₂). Kad u stanici ne bi bilo spojnog polja s prekidačem P_S, trebalo bi najprije isključiti dalekovod otvaranjem prekidača P_V u vodnom polju, zatim otvoriti rastavljač R_{P1} i zatvoriti rastavljač R_{P2}, te na kraju uspostaviti pogon uklapanjem prekidača P_V. Uz pomoć aparata u spojnom polju može se to izvršiti bez prekidanja pogona. Redoslijed sklanjanja u sedam uzastopnih etapa pokazuje programska tablica sl. 73 u kojoj bijela polja označuju otvorene, a srafinirana polja zatvorene položaje pojedinih aparata. (U tablici nisu prikazani aparati vodnog polja P_V i R_V jer oni u svih 7 spojeva ostaju zatvoreni, ni aparat za uzemljenje voda Z_V, koji je pri tome stalno otvoren). Zatvaranje rastavljača R_{P2} pri prelazu od spoja 3 na spoj 4 i otvaranje rastavljača R_{P1} pri prelazu od spoja 4 na spoj 5 zbiva se pod strujom, ali bez uklopnog i bez povratnog napona, jer su u toj etapi sabirnice S₁ i S₂ kratko spojene mostom R_{S1}—P_S—R_{S2}.

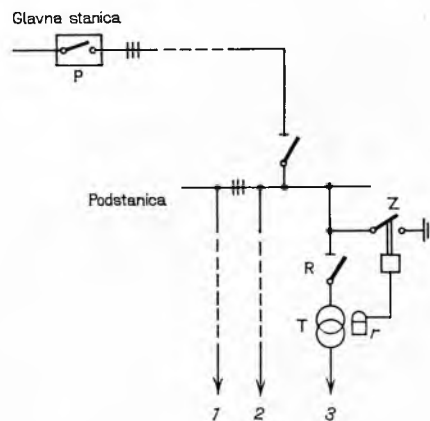
Prije početka bilo kakvih radova na dalekovodu treba osoblje osigurati od dodira s naponom time što se otvori rastavljač R_V na početku voda i zatvore aparati za uzemljenje Z_V na oba njegova kraja. Njihova je zadaća da odvedu u zemlju naboj koji je preostao na vodu nakon isklapanja i eventualno naboje izazvane atmosferskim utjecajima. Posebni uređaji za blokiranje sprečavaju istodobno zatvaranje aparata R_V i Z_V, kao i promjenu položaja rastavljača R_V dok je prekidač P_V zatvoren.

Izvedbe rastavljača i aparata za uzemljenje. Rastavljač i aparat za uzemljenje često se grade kao zajednička cjelina (rastavljač s noževima za uzemljenje), kako je to prikazano u sl. 74 a.



Sl. 74. Mehaničko blokiranje glavnih noževa i noževa za uzemljenje. 1 Glavni nož, 2 nož za uzemljenje, 3 pogonska osovina aparata za uzemljenje, 4 pogonska osovina rastavljača, 5 spojnica, 6 kružni segment na vertikalnoj osovini, 7 kružni segment na horizontalnoj osovini

Glavni nož 1 i nož za uzemljenje 2 kreću se u vertikalnoj ravni polova, što je uobičajena izvedba za srednje napone. Ovdje su pogonske osovine 3 i 4 noževa jedna drugoj paralelne, pa se mogu mehanički blokirati tako da se prema sl. 74 b povežu spojnicom 5 s dugoljastim prorezima. Osovine su na spojnici mjestima ravno usječene. U prikazanom je položaju blokiranja osovina 3 noževa za uzemljenje, te se ona ne može osloboditi prije nego što se zakretanjem osovine 4 za 90° u smjeru strelice otvore glavni noževi. U konstrukcijama s međusobno okomitom osovinama 7 i 9 može se blokiranje postići kružnim segmentima 6 i 8 prema sl. 74 c. U prikazanom položaju nalazi se segment 8 u utoru segmenta 6 i blokira njegovu osovinu 7. Za njeno oslobađanje treba osovinu 9 zakrenuti za 90° u smjeru strelice, da bi se oba utora postavila jedan nasuprot drugom.



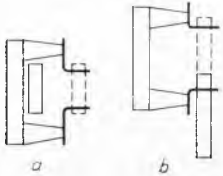
Sl. 75. Primjena brzih aparata za uzemljenje. P zajednički prekidač, Z brzi jednopolni aparat za uzemljenje, R rastavljač, T transformator, r termički relej, 1...3 izlazni vodovi

Za rastavljače treba izolaciju rastavnog razmaka (među stezaljkama otvorenog pola) dimenzionirati jače nego izolaciju među fazama ili izolaciju prema zemlji. Tako npr. rastavljači nazivnog napona 12 kV moraju na rastavnom razmaku izdržati udarni napon 85 kV i jednodimenzionalni izmjenični napon 45 kV, a za izolaciju među

fazama i prema zemlji propisuje se 75 kV udarnog i 35 kV izmjeničnog napona.

Aparati za uzemljenje ne moraju imati povećanu probojnu čvrstoću na otvoru noža. Iako u normalnim pogonskim uvjetima ne vode struju, od njih se u zatvorenom položaju zahtijeva termička i dinamička otpornost prema kratkotrajnim strujama kratkog spoja koje bi se mogle pojaviti uslijed pogrešne manipulacije ili kvara. Grade se, međutim, i aparati za uzemljenje sa brzim zatvaranjem koji imaju kratkospojnu uklopnu moć. Jednu od primjena takvih aparata pokazuje sl. 75.

Zajednički prekiđač P, smješten u glavnoj stanici, služi za napajanje nekoliko izlaznih vodova (a, b, c) udaljene podstanice. Ako u jednom odvodu proradi termička zaštita r transformatora T, zatvori se jednopolni brzi aparat za uzemljenje Z. Uslijed toga poteče struja jednofaznog zemnog spoja, koja izazove isklapanje prekiđača P. Nakon otvaranja rastavljaja R i aparata Z u oštećenom odvoju mogu se uklapanjem prekiđača P ostali potrošači ponovo staviti u pogon.

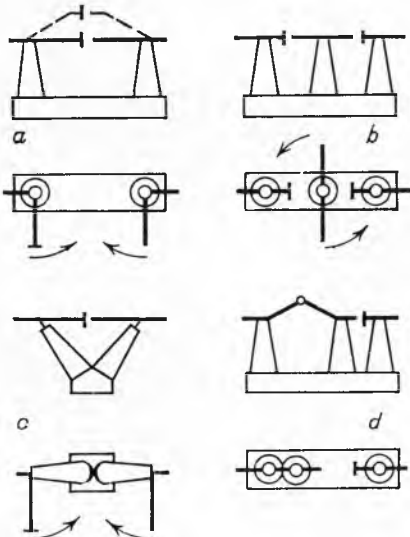


Sl. 76. Rastavljaji s dvostrukim prekidom (a) i s kliznim noževima (b)

Otvaranjem rastavljaja izvedenih po koncepciji sl. 74 povećava se njihova visina u smjeru osi izolatora tako da je $h_2/h \approx 2 \dots 2,5$. Za slučajeve kada je upravo ova dimenzija kritična s obzirom na raspoloživi prostor, grade se posebne izvedbe, kao što su *rastavljaji s dvostrukim prekidom* (sl. 76 a) i *rastavljaji s kliznim noževima* (sl. 76 b). Pomični kontakti prvih translatorno se spuštaju među izolatore, a pomični kontakti drugih izvlače se u smjeru svoje osi.

Za *rastavljaje visokih i vrlo visokih napona* postoji mnoštvo konstrukcijskih oblika. Oni se mogu podijeliti u dvije osnovne grupe. Aparati prve grupe, tzv. *višestupni rastavljaji*, imaju po fazi 2 ili 3 izolatora kojima su oba čvrsta kontakta (ulazni i izlazni) mehanički vezana uz postolje pola. Aparati druge grupe, tzv. *jednostupni rastavljaji*, imaju u svakoj fazi samo jedan izolator s pripadnim čvrstim kontaktom, a drugi je kontakt odvojeno zavješten na vodiču sabirnice iznad rastavljaja.

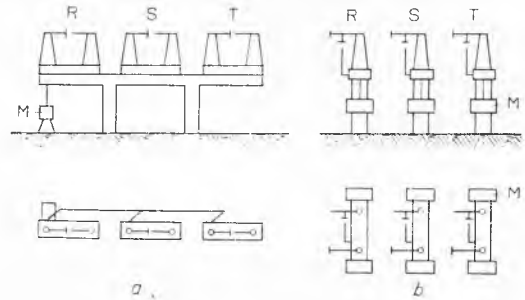
Nekoliko je karakterističnih oblika *višestupnih izvedbi* shematski prikazano u sl. 77, gdje tlocrti pokazuju otvoreni, a nacrti zatvoreni položaj. U izvedbi na sl. 77 a rotiraju oba izolatora, a u izvedbi na sl. 77 b samo se srednji izolator vrti oko svoje osi; u oba slučaja kontakti se noževi kreću u horizontalnoj ravnini. Ako se



Sl. 77. Oblici rastavljaja sa 2 i 3 izolatora po fazi. a Dva okretna izolatora, b jedan (srednji) okretni izolator, c dva okretna izolatora postavljena u obliku slova V, d jedan (srednji) klizni izolator

noževi izvedbe sl. 77 a montiraju u kosom položaju, kako je crtkano naznačeno, može se smanjiti razmak među paralelnim fazama. Primjenom aparata s okretnim izolatorima u obliku slova V (izvedba na sl. 77 c) smanjuje se tlocrtna površina, a betonski ili čelični nogari reduciraju se na jedan stup po fazi. U izvedbi na sl. 77 d pomiče se srednji izolator duž postolja, a kontakti pri otvaranju ne izlaze iz ravnine pola, što omogućuje najmanji fazni razmak.

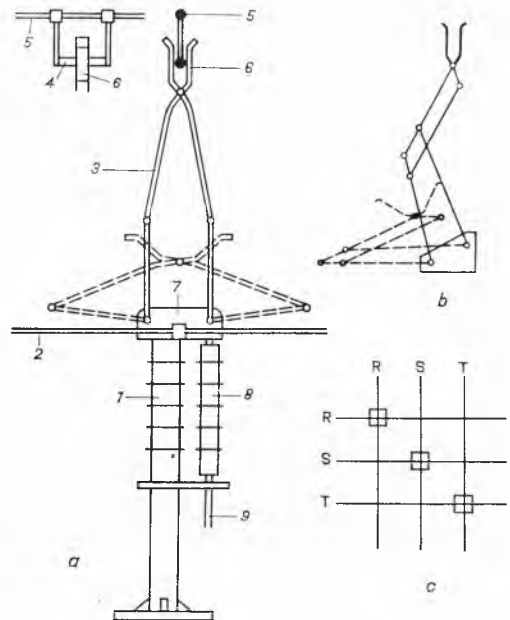
Dok se rastavljaji za srednje napone grade kao tropolne jedinice sa zajedničkim okvirom, za visoke napone proizvode se aparati s odvojenim polovima. Prostorni raspored polova ovisi o koncepciji postrojenja. Na sl. 78 vide se dva tipična rasporeda: »u brazdi« (sl. 78 a) i »u paraleli« (sl. 78 b). Sl. 78 a prikazuje manji rastavljaj bez noževa za uzemljenje, kojemu su pogonske osovine polova povezane poluzjem, te se pokreću zajedničkim mehanizmom M.



Sl. 78. Raspored polova: a u brazdi, b u paraleli

U primjeru sl. 78 b, koji se odnosi na veće aparate s noževima za uzemljenje, svaki pol ima dva vlastita mehanizma: jedan pokreće glavni nož, a drugi pokreće nož za uzemljenje.

Od *jednostupnih izvedbi* našle su široku primjenu konstrukcije pantografskih (sl. 79 a) i semipantografskih rastavljaja (sl. 79 b).



Sl. 79. Jednostupni rastavljaji. a Pantografski (simetrični), b semipantografski (nesimetrični) rastavljaj, c tlocrt tropolnog aparata s dijagonalnim rasporedom polova

Na glavi potpornog izolatora 1 smješten je karter prenosnog mehanizma 7 s pantografskim poluzjem 3 i kontaktnim klijestima 6, koja u zatvorenom položaju aparata hvataju nepomični kontakt 4 na gornjoj sabirnici 5. Donja sabirnica 2 stegnuta je priključnicom na karteru 7. Pogonski se mehanizam priključuje na osovinu 9 s okretnim izolatorom 8. Nesimetričnim oblikom poluzja prema sl. 79 b mogu se smanjiti horizontalne dimenzije aparata u otvorenom položaju. Tlocrt tropolnog aparata (sl. 79 c) prikazuje tipičan raspored polova u dijagonali.

Pogon rastavljaja. Za sklapanje rastavljaja primjenjuje se direktni ručni pogon uklopnom motkom, poluzni ručni mehanizam, pneumatski ili hidraulički pogon i elektromotorni pogon. Prvi način dolazi u obzir za male rastavljaje prema sl. 74. Njihovi noževi imaju u tu svrhu posebne ušice, u koje se pri sklapanju stavlja kuka na kraju izolacione uklopne motke. Ovaj način treba izbjegavati zbog opasnosti za pogonsko osoblje. Pri drugom se načinu zakretanje ručice, koja ima oblik stremena ili volana, prenosi sistemom poluzja na pogonsku osovinu rastavljaja. Za veće aparate i za primjenu daljinskog upravljanja dolaze u obzir samo

pneumatski, hidraulički ili elektromotorni pogon, pri čemu se pogonski mehanizam prigraduje na postolje rastavljača ili montira odvojeno, kao što je označeno u sl. 78.

Visokonaponski osigurači

Visokonaponski osigurači služe za zaštitu naponskih mjernih transformatora i manjih transformatorskih stanica od struja kratkog spoja. Grade se većinom do nazivnog napona 30 kV, rjeđe za više napone. Zbog preduhkih rastalnih vremena u području manjih struja (do 10-struke nazivne struje I_n za starije izvedbe) treba zaštitu od pogonskih preopterećenja provesti drugim sredstvima (v. sl. 65 b). Upotrebom novih konstrukcija spušta se ova donja granica na $2,5 I_n$.

Osigurači s rastalnicom u zraku. Za umjerene napone i struje do nekoliko desetaka ampera susreću se jednostavne izvedbe *zračnih osigurača* s dugačkim rastalnicama, koje se, ako su posrijedi osigurači unutarnje montaže, nalaze u osi vertikalno položene keramičke cijevi. Za vanjsku montažu može se rastalnica 1 prema sl. 80 a slobodno razapeti u horizontalnom položaju među rogovima 2 na kojima se luk produljuje i gasi. Ako pregore rastalnice u više faza, može doći do spajanja susjednih lukova i premoštenja faza ispred osigurača.

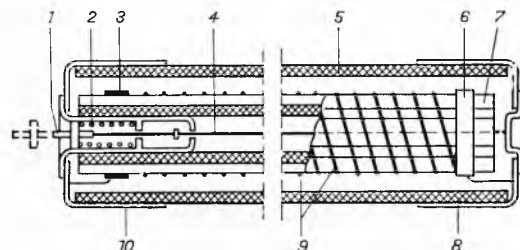
Veće se prekidne moći (~ 3 kA uz napon 20 kV) postižu *ekspulzivnim osiguračima* prema sl. 80 b. Tu se kratka rastalnica 1 nalazi u cijevi od plinotvornog materijala 5. Gornjim je krajem spojena na priključnu kapu 3, a donjim na fleksibilnu bakrenu pletenicu 4, koja je galvanski vezana s donjom priključnicom 6. Plinovi koji nastaju djelovanjem luka na cijev izbacuju pletenicu kroz donji otvor i tako produžuju i gase luk. Prekidanje traje obično nekoliko poluperioda. U instalaciji takvih osigurača treba paziti da im se susjedni dijelovi ne približe preko granice opasne zone u kojoj su ispušni plinovi još vrući i ionizirani. Osigurači s rastalnim žicama u zraku ne mogu se upotrijebiti za više napone jer prejako električno polje na površini vodiča izaziva efekte korene sa stvaranjem ozona, što razara rastalnicu i uzrokuje neželjeno prekidanje.

Tekućinski osigurači. Mnogi su nedostaci zračnih i ekspulzivnih izvedbi otklonjeni konstrukcijom osigurača u kojima se rastalnica nalazi u tekućini, prema sl. 81.

Staklena cijev 7 napunjena je pogodnim uljem ili tekućim ugljik-tetrakloridom 6. Rastalnica 4, kojoj se radi mehaničkog pojačanja dodaje paralelni vodič 3 od materijala velikog specifičnog otpora, napeta, je vlačnom oprugom 2. Rastalni vodiči vezani su gornjim krajem na priključnicu 5, a donjim, preko bakrene pletenice 1, na priključnicu 8. Pošto se rastalila rastalnica 4, poteče puna struja kroz paralelni vodič 3, koji se također rastali i time stvori električni luk. Djelovanjem opruge luk se naglo produži i ugasi slično kao u uljnom prekidaču koji bi imao vanredno veliku brzinu otvaranja. Efekt gašenja može se pojačati specijalnim klipom 9 s uskim provrtima. U tom je slučaju cijev napunjena tekućim medijem samo do visine klipa koji prisilnim kretanjem prema dolje kroz svoje provrte ubacuje mlaz tekućine u prostor luka.

Osigurači s rastalnicom u zrnatim tvarima. Naprijed opisani osigurači ipak ne mogu udovoljiti sve strožim zahtjevima suvremene zaštite, od kojih su najvažniji: velika prekidna moć, brzo prekidanje kratkog spoja, precizna vremensko-strujna karakteristika prekidanja u slučaju manjih preopterećenja, mogućnost propuštanja velikih trenutnih preopterećenja, prekidanje bez stvaranja opasnih prenapona. Od osigurača se traži da i najveće struje prekidaju bez vanjskih manifestacija (ispušnih plinova i sl.) u bilo kojem položaju rastalnog uložka (patrone). Takvim zahtjevima odgovaraju jedino osigurači punjeni čvrstim sitnozrnatim mate-

rijalima, među koje ide u prvom redu čisti kremeni pijesak (SiO_2). Poznata je primjena i nekih drugih sipkih materijala (krede, sadre, mramornog brašna, milovke, borne kiseline), ali se ona zbog visoke cijene i nekih tehničkih nedostataka ograničava samo na specijalne izvedbe. Cijevi uložaka izrađene su od keramike velike mehaničke čvrstoće ili od vatrostalnog stakla (Pyrex), a rastalnice od jedne ili više srebrenih žica ili traka. U starijim izvedbama nailazi se i na



Sl. 82. Osigurači s kremeni pijeskom. 1 Udarni svornik, 2 tlačna opruga, 3 prsten, 4 pomoćna rastalnica, 5 porculanska cijev, 6 prsten, 7 steatitno tijelo, 8 priključna kapa, 9 glavna rastalnica, 10 priključna kapa

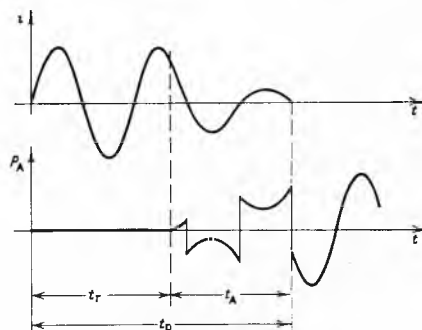
primjenu bakra, olova i cinka. Bakru se zbog znatne oksidacije pri višim temperaturama mijenja vodljivost, a time i karakteristika taljenja. Rastalnice od ostalih spomenutih metala imaju veći specifični otpor i niže talište, a stoga i veći presjek za jednaku nazivnu struju. To otežava prekidanje uslijed veće količine metalnih para u luku. Princip konstrukcije uložka sa znatnim materijalom vidi se u sl. 82.

U porculanskoj cijevi 5 nalazi se steatitno tijelo 7 poprečnog presjeka u obliku zvijezde, s aksijalnim cilindričnim povrtom i vanjskim uzdužnim rebrima. Na rebra je spiralno namotana glavna rastalnica 9 od jedne ili više kalibriranih srebrenih žica ili traka. Njeni su krajevi zalemljeni na prstene 3 i 6, galvanski vezane s priključnim kapama 10 i 8. Kroz povrt tijela 7 prolazi pomoćna rastalnica 4 manjeg presjeka, izrađena od materijala većeg specifičnog otpora (čelika, volframa). Ona je jednim krajem vezana na kapu 8, a drugim na udarni svornik 1. Pomoćna rastalnica pregara tek nakon taljenja glavne rastalnice, te oslobađa udarni svornik, koji pod pritiskom tlačne opruge 2 ikoči u crtkano označeni položaj. Njegova je funkcija ili da služi kao indikator stanja osigurača (optička signalizacija) ili da mehanički prenese impuls na okidač drugog aparata. Povrt izolacionog tijela 7 i prostor između njega i vanjske cijevi 5 ispunjeni su kremeni pijeskom velike čistoće i određene granulacije (veličine zrnaca).

Zbog velike rashladne površine u malom volumenu, dobre toplinske vodljivosti ($1,2 \dots 6,5 \text{ W/Km}$) i znatnog utroška topline za promjenu svog fizikalnog stanja (vitifikaciju), zrnati SiO_2 osobito je povoljan kao sredstvo za gašenje i brzu deionizaciju luka, koji u njemu gori s velikim gradijentom (do 600 V/cm).

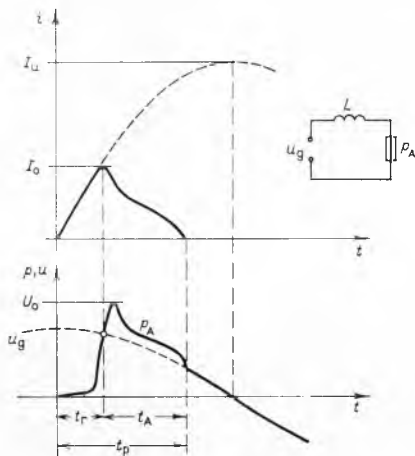
Karakteristike osigurača. Ukupno trajanje prekidanja t_p (od nastanka preopterećenja do gašenja luka) sastoji se od rastalnog vremena t_r potrebnog za taljenje rastalnice i trajanja luka t_A . Dok jakost struje ne prekorači određenu granicu, ovi se intervali protežu na nekoliko poluvalova pogonske frekvencije, kako se to vidi iz oscilogramā struje i i pada napona p_A na stezaljkama osigurača, prikazanih u sl. 83. Zbog velikog otpora i napona luka smanjuju se amplitude struje u intervalu t_A . Nakon prekida struje u prirodnoj nultočki javlja se na osiguraču sinusni povratni napon.

Odrežana struja. Drugačiji je karakter pojava kad osigurač prekida velike struje kratkog spoja. Uslijed goleme gustoće struje



Sl. 83. Prekidanje struje preopterećenja. p_A Pad napona na stezaljkama osigurača, t_p ukupno trajanje prekidanja, t_r rastalno vrijeme, t_A trajanje luka

u rastalnici skraćuje se, kako pokazuje sl. 84, interval taljenja t_r na početni dio prvog poluvala, a zbog energične deionizacije u zrnatom mediju počinje se struja odmah zatim smanjivati prema nuli. Njena maksimalna propuštena vrijednost I_0 , nazvana odre-
zanom strujom, samo je dio tjemene vrijednosti I_u udarne struje kratkog spoja. Nagla promjena gradijenta struje nakon prolaza

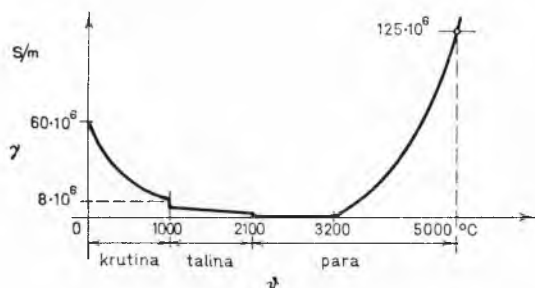


Sl. 84. Prekidanje kratkog spoja, p_A Pad napona na stezaljkama osigurača, t_p ukupno trajanje prekidanja, t_r rastalno vrijeme, t_A trajanje luka, I_0 odrezana struja, I_u tjemena vrijednost prirodne struje, u_g napon izvora

kroz maksimum I_0 uzrokuje porast napona osigurača na iznos U_0 , koji je viši od napona izvora u_g . To proizlazi iz sheme induktivnoga kruga prema sl. 84, kojemu odgovara jednačba

$$p_A = u_g - L \frac{di}{dt}$$

Zbog negativne derivacije struje u intervalu luka t_A , drugi je član desne strane pozitivan, te je $p_A > u_g$. Nagli porast napona u intervalu taljenja t_r posljedica je vrlo velikog specifičnog otpora ρ rastaljenog srebra rastalnice. Promjenu električne specifične vodljivosti srebra $\gamma = 1/\rho$ u različitim agregatnim stanjima kao funkciju temperature ϑ prikazuje dijagram u sl. 85. Velike gustoće struje, koje su pri kratkom spoju i veće od 10 kA/mm², dovode do naglog taljenja i isparavanja rastalnice. Ionizirana para srebra difundira u zrnati medij, te se vodljivi presjek gotovo trenutno smanji na nulu.



Sl. 85. Specifična vodljivost srebra ($\gamma = 1/\rho$) kao funkcija temperature (ϑ)

Visina odrezane struje I_0 ovisi o nazivnoj struji osigurača I_n , koju on trajno podnosi, i efektive vrijednosti simetrične komponente struje kratkog spoja I_K , a određuje se iz »karakteristike rezanja« prema sl. 86. Ona je u dvostruko logaritamskom koordinatnom sustavu I_0, I_K prikazana paralelnim pravcima $I_n = \text{konst}$, koji su s lijeve strane ograničeni pravcima udarne struje (najveće struje koja se pojavljuje u slučaju kratkog spoja) $I_u = n I_K$. Faktor asimetrije n ovisi o trenutku pojave kratkog spoja, te se kreće u granicama $\sqrt{2} \leq n \leq 1,8 \sqrt{2}$. Donja granica (pravac $I_{us} = \sqrt{2} I_K$), vrijedi za slučaj pune simetrije, tj. struju bez istosmjerne komponente, a gornja (pravac $I_{ua} = 1,8 \sqrt{2} I_K$) za najveću moguću

asimetriju. Debelo izvučene linije odgovaraju nekom srednjem slučaju asimetrije (pravac I_u između oba granična pravca) uz nazivnu struju osigurača I_{n3} . Struja kratkog spoja određene efektive vrijednosti I_K bit će u tom slučaju ograničena na maksimalni iznos I_{0B} (ordinata točke B), dok bi bez osigurača struja postigla amplitudu jednaku ordinati točke A. Lijevo od točke C (tj. za struje $I_K < I_{KC}$) nema više rezanja struje, te osigurač propušta tjemenu vrijednost I_u .

Na osnovi sl. 84 može se početni dio simetrične struje kratkog spoja (nastalog u trenutku kad napon prolazi kroz maksimum) aproksimirati pravcem

$$i = a t, \quad (22)$$

čiji je koeficijent smjera

$$a = \left(\frac{di}{dt} \right)_0 = \frac{d}{dt} (I_u \sin \omega t)_0 = \omega I_u = \frac{I_0}{t_r}. \quad (23)$$

Oдавде slijedi rastalno vrijeme

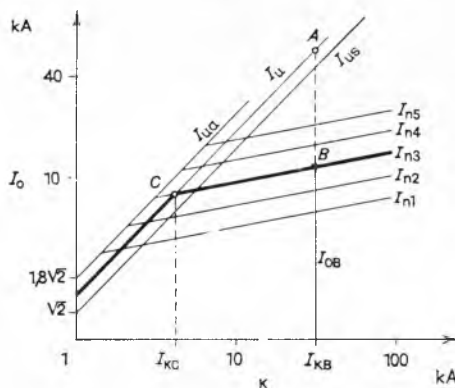
$$t_r = \frac{I_0}{\omega I_u}. \quad (24)$$

Ako se za vrijeme taljenja zanemari prelaz topline na pijesak, imat će Jouleovi gubici u tom intervalu, bez obzira na jakost struje, konstantnu vrijednost

$$W_r = \int_0^{t_r} R i^2 dt,$$

gdje je R srednji otpor rastalnice do trenutka t_r . Oдавде se uz pomoć jednačbi (22) do (24) dobiva relacija

$$W_r = \int_0^{t_r} R (\omega I_u t)^2 dt = \frac{R \omega^3}{3} \cdot I_u^2 t_r^3 = \frac{R \omega^2}{3} \cdot I_u^2 \left(\frac{I_0}{\omega I_u} \right)^3.$$



Sl. 86. Karakteristika rezanja struje, I_0 odrezana struja, I_u udarna struja, I_n nazivna struja, I_K simetrična struja kratkog spoja

Budući da je u simetričnom kratkom spoju $I_u = \sqrt{2} I_K$, slijedi iz posljednjeg izraza

$$I_0 = \sqrt[3]{\frac{3 \omega W_r}{R}} \sqrt{2} I_K = K \sqrt{I_K}, \quad (25)$$

ili

$$\log I_0 = \log K + \frac{1}{2} \log I_K. \quad (26)$$

Konstanta K ovisi o toplini taljenja W_r i otporu R rastalnice, pa se mijenja s nazivnom strujom I_n osigurača. Zato se jednačba (26) može grafički prikazati familijom pravaca ($I_{n1} \dots I_{n5}$ u sl. 86). Za dvije odabrane točke karakteristike (npr. B i C u sl. 86) daje relacija (25) ovaj omjer odrezanih struja I_0 i pripadnih efektivnih vrijednosti I_K ili amplituda I_u :

$$\frac{I_{0B}}{I_{0C}} = \sqrt[3]{\frac{I_{KB}}{I_{KC}}} = \sqrt[3]{\frac{I_{uB}}{I_{uC}}}.$$

Iz početnog linearnog porasta struje

$$i = \frac{I_0}{t_r} t$$

proizlazi Jouleov integral taljenja osigurača

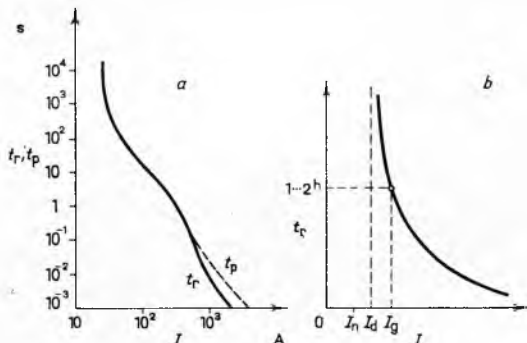
$$(I^2 t)_r = \int_0^{t_r} i^2 dt = \frac{I_0^2}{3} t_r.$$

Analogno se definira i Jouleov integral prekidanja

$$(I^2 t)_p = \int_0^{t_p} i^2 dt,$$

koji se odnosi na ukupno vrijeme $t_p = t_r + t_A$. Sa gledišta štice objekta veličina $(I^2 t)_p$ predstavlja specifičnu energiju koja se po jedinici otpora strujnog kruga pretvara u toplinu. Posebno je važna za izbor ultrabrzih osigurača. (Takvi osigurači na području niskog napona služe za zaštitu osjetljivih poluvodičkih elemenata, npr. silicijevih dioda, kojih se termička izdržljivost također definira Jouleovim integralom.)

Ovisnost rastalnog vremena t_r i ukupnog trajanja prekidanja t_p o struji I druga je važna karakteristika osigurača. Dijagram sl. 87 a prikazuje takvu karakteristiku u dvostruko logaritamskom koordinatnom sustavu. Uz linearna mjerila vremena i struje ona poprima oblik krivulje u dijagramu sl. 87 b. U njemu su pored nazivne struje I_n označene još dvije veličine, važne za ispitivanje osigurača: donja (I_d) i gornja (I_g) granična struja. Prva predstavlja najveću struju koja još sigurno ne smije dovesti do taljenja, a struja I_g mora izazvati prekidanje nakon određenog duljeg vremena (npr. 1...2 sata).



Sl. 87. Karakteristike $t(I)$ i granične struje. a Ovisnost rastalnog vremena t_r i ukupnog trajanja prekidanja t_p o jakosti struje I (u logaritamskom mjerilu); b ovisnost $t_r(I)$ u linearnom mjerilu; I_d i I_g donja i gornja granična struja, I_n nazivna struja

Treba imati na umu da karakteristike $t(I)$ nisu osobito prikladne za uspoređivanje različitih tipova osigurača u području rezanja struje, jer oblik odrezane struje, a zbog toga i izmjerena vremena, ovise o trenutku uklopa na kratki spoj. Zato je ispravnije da se u spomenute karakteristike umjesto stvarno izmjerenih veličina t_r i t_p uvedu tzv. *virtualna trajanja* t_{vr} i t_{vp} . Takva bi se vremena taljenja i prekidanja postigla kad bi u intervalu rezanja kroz osigurač prolazila konstantna struja I_K jednaka efektivnoj vrijednosti simetrične komponente struje kratkog spoja. Struja I_K proizvela bi u rastalnici do trenutka taljenja ili prekidanja jednaku energiju u kraćem vremenu koje je definirano omjerom pripadnog Jouleovog integrala i kvadrata struje I_K :

$$t_{vr} = \frac{(I^2 t)_r}{I_K^2}, \quad t_{vp} = \frac{(I^2 t)_p}{I_K^2}.$$

Veća prekidna moć i smanjeno ugrijavanje postižu se rastalnicama s nekoliko suženih mjesta, na kojima će najprije doći do pregaranja. Posljedica toga je serijsko vezanje većeg broja lukova uz znatno viši ukupni napon luka, što olakšava prekidanje i smanjuje odrezanu struju. Kako preostali dijelovi rastalnice imaju veći presjek, bit će u trajnom radu manji ukupni gubici snage, a time i niža pogonska temperatura osigurača. Na rastalnicama od

okrugle srebrenе žice jednolikog presjeka formiraju se pri taljenju sama od sebe sužena mjesta, ali u znatno manjoj mjeri. Rastaljeni se metal nastoji razdvojiti na kratke odsječke, koji se pod djelovanjem napetosti površine skupljaju u kapljice na razmacima 1...2 mm. Zbog toga se među kapljicama smanjuje presjek metala, te se ovaj naglo ispari i zatim kondenzira na hladnom pijesku. Ponovnim isparivanjem tako nastalog sloja stvara se nevodljiva sinterovana smjesa u obliku gusenice, koja osigurava definitivni prekid struje.

Ako se zanemari odvod topline kroz metalni strujni put i pijesak, može se trajanje taljenja izraziti jednadžbom

$$t_r \approx \frac{W_r}{I_d^2 R} = \frac{W_r}{I_d^2} \frac{S}{\varrho l} = \left(\frac{S}{I_d} \right)^2 \frac{W_r}{\varrho l S} = \frac{K_r}{\sigma^2}.$$

Pri tome je W_r potrebna toplota ugrijavanja i taljenja, I_d donja granična struja, R srednji otpor rastalnice u promatranom intervalu, S presjek suženog mjesta, l duljina suženog mjesta, ϱ srednji specifični otpor rastalnice, σ gustoća struje u smanjenom presjeku. Veličina

$$K_r = \frac{W_r}{\varrho l S} = \sigma^2 t_r,$$

poznata pod imenom Meyerove konstante, ovisi o svojstvima materijala rastalnice (specifičnoj vodljivosti $\gamma = 1/\varrho$ i toplini taljenja po jedinici volumena $W_r/l S$). Njena vrijednost za srebro iznosi otprilike 72 000, za bakar $\sim 100\,000 \text{ A}^2 \text{ s/mm}^4$.

Povećana termička tromost zahtijeva se često u području manjih struja, da ne bi dolazilo do čestih prekidanja uslijed kratkotrajnih pogonskih preopterećenja. To se postiže tako da se neposredno uz neka od uskih mjesta nalemi prikladna legura nižeg tališta (npr. legura kositra i olova). Pri zagrijavanju rastalnice legura difundira u osnovni materijal spomenutih uskih mjesta. Time nastaje lokalno povećanje mase i sniženje tališta (»metalurški efekt«). Veća masa pridonosi produljenju rastalnog vremena t_r , ali će se u periodu preopterećenja, zbog nižeg tališta, luk najprije pojaviti na tom mjestu. Opisane rastalnice imaju, prema tome, točno definirane *zone preopterećenja* (uska mjesta s lemom) i *zone kratkog spoja* (uska mjesta bez lema).

Kompletni osigurači sadrže *rastalne uloške* (patrone) i pripadna *podnožja*, koja se sastoje od postolja i potpornih izolatora s kontaktnim viljuškama i priključnicama za vodove. Patrone se svojim krajnjim metalnim kapama ulažu u viljuške podnožja. Uz nazivni napon (jednak maksimalnom pogonskom naponu mreže) i nazivnu struju, najvažnija im je karakteristika *prekidna moć*. Ona je definirana najvećom efektivnom vrijednošću simetrične komponente prirodne struje kratkog spoja koju osigurač može prekinuti (bez obzira na to što je stvarna struja u procesu prekidanja ograničena na vrijednost odrezane struje). Izražena kao ekvivalentna tropolna snaga, prekidna se moć normalno kreće u granicama do 1000 MVA uz 10 kV, odnosno 1500 MVA uz 30 kV.

Prenapone koje osigurači uzrokuju naglim prekidanjem treba ograničiti prikladnom izvedbom. Najjednostavniji bi način bio skraćivanje rastalnice ili povećanje granulacije pijeska, ali se time smanjuje prekidna moć. Dobri se rezultati postižu paralelnim ili serijskim spajanjem više rastalnih vodiča različitog presjeka, koji sukcesivno pregaraju. Na taj se način u strujni krug postepeno uključuje sve veći otpor, odn. sve veća duljina luka.

Odvodnici prenapona

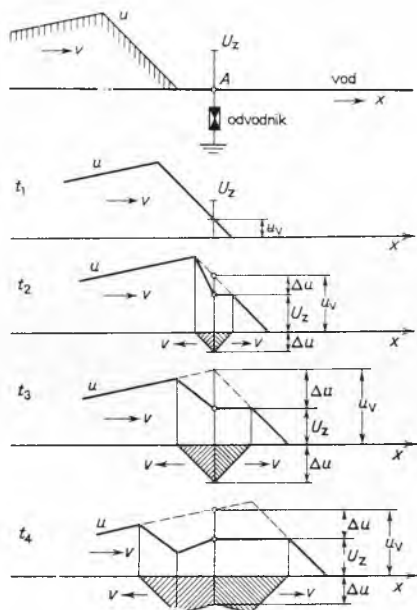
Atmosferska izbijanja, procesi sklapanja i druge nagle promjene stanja u mrežama mogu biti uzrokom visokih prenapona, koji po svom iznosu nadmašuju podnosive napone pojedinih elemenata mreže. Takvi bi prenaponi u postrojenju doveli do proboja izolacije i duljih prekiada u dobavi energije. Za zaštitu od spomenutih pojava služe odvodnici prenapona, koji se najčešće priključuju između pojedinog faznog voda i zemlje. Oni ograničuju visinu tranzijentnih prenapona time što sa štice objekta odvođe višak naboja, pri čemu kroz odvodnik prođe udarni val odvodne struje. Ujedno ograničuju trajanje (a često i amplitudu) popratne struje, koja nakon prolaza odvodne struje poteče odvodnikom pod djelovanjem pogonskog napona mreže.

Utjecaj odvodnika na prostorno širenje prenapona duž voda može se objasniti slikom 88. U slici se radi jednostavnosti pret-

postavlja »idealno« djelovanje odvodnika kojim se maksimalni napon voda u priključnoj točki A ograničuje na konstantnu vrijednost U_z (v. sl. 89 a). Udarni naponski val u kreće se duž voda u smjeru x brzinom

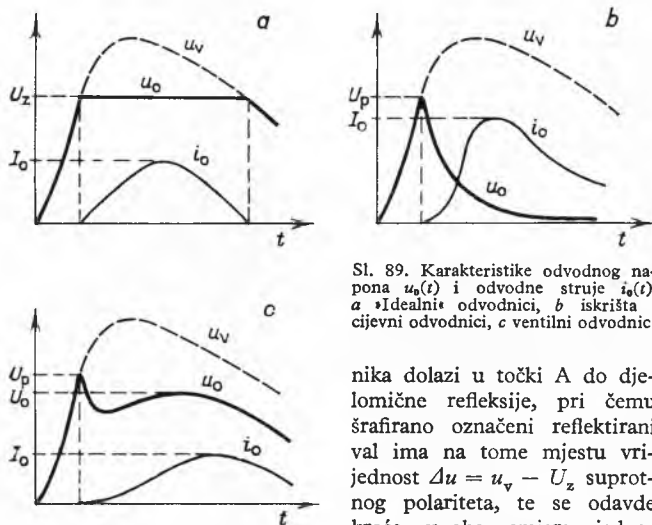
$$v = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s},$$

gdje su L_1 i C_1 induktivitet i kapacitet voda po jedinici duljine.



Sl. 88. Širenje prenapona na vodu koji je zaštićen »idealnim« odvodnikom. U_z zaštitni nivo odvodnika, u_v trenutna vrijednost napona koju bi udarni val u proizveo u točki A bez djelovanja odvodnika, v brzina širenja putnih valova

Pošto je čelo vala stiglo do točke A, počinje djelovanje odvodnika, ali tek u momentu kada njegova trenutna vrijednost u_v prekorači iznos prorađnog napona U_z . Dijagrami $u(x)$ pokazuju prostornu razdiobu napona u četiri različita momenta ($t_1 \dots t_4$). U momentu t_1 još je $u_v < U_z$, te val prelazi nesmetano preko priključnog mjesta. Da nema odvodnika, val bi u trenutku t_2 na mjestu A već imao nedopušteno visoku ordinatu u_v . Djelovanjem odvod-

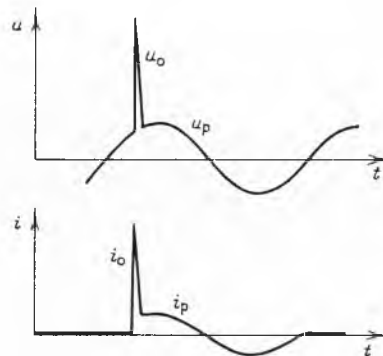


Sl. 89. Karakteristike odvodnog napona $u_v(t)$ i odvodne struje $i_v(t)$. a »Idealni« odvodnici, b iskrišta i cijevni odvodnici, c ventilni odvodnici

nika dolazi u točki A do djelomične refleksije, pri čemu šrafirano označeni reflektirani val ima na tome mjestu vrijednost $\Delta u = u_v - U_z$ suprotnog polariteta, te se odavde kreće u oba smjera jednakom brzinom v . Razlika ordinata direktnog i reflektiranog

vala, označena debelom linijom, prikazuje rezultantni napon voda. Iz slika razdiobe napona u momentima $t_2 \dots t_4$ može se vidjeti da iza odvodnika (ako se gleda u smjeru kretanja direktnog vala)

prenapon nigdje nije veći od U_z , a ispred odvodnika njegovo se zaštitno djelovanje proteže samo na određeno područje. Stvarne su prilike složenije utoliko što se napon odvodnika $u_v(t)$ u intervalu odvođenja mijenja. U sl. 89 vidi se odstupanje od »idealne« karakteristike (prikazane u sl. 89 a) za različite konstrukcije odvodnika. Dijagram sl. 89 b odgovara otvorenim iskrištima i cijevnim odvodnicima, a dijagram sl. 89 c ventilnim (»katodnim«) odvodnicima. Krivulja u_v predložuje kako bi se mijenjao napon udarnog vala na stezaljkama odvodnika kad ovaj ne bi proradio. Zaštitnim djelovanjem, tj. propuštanjem odvodne struje $i_v(t)$, smanjuje se iznos napona udarnog vala na visinu odvodnog napona $u_v(t)$. U potpunom oscilogramu napona i struje prema sl. 90 prikazani su, osim odvodnog napona u_v i odvodne struje i_v (trajanja nekoliko mikrosekundi), također pogonski napon mreže u_p i popratna struja i_p .

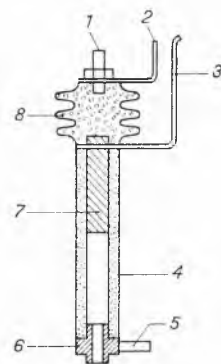


Sl. 90. Potpuni oscilogram napona i struje odvodnika. u_v Odvodni napon, u_p pogonski napon, i_v odvodna struja, i_p popratna struja

Iskrišta su najstarija i najjednostavnija sredstva za zaštitu od prenapona. Pružaju samo grubu zaštitu, jer im proradni napon zavisi od oblika i polariteta udarnog vala. Njihovo se zaštitno djelovanje sastoji u tome da lučnim izbijanjem spoje fazu sa zemljom, što znači da naponsko preopterećenje pretvaraju u strujno. Gašenje popratne struje (koja odgovara struji zemljospoja ili kratkog spoja) ovisi o pogonskim prilikama, te se u težim slučajevima mora prepustiti uređajima nadstrujne zaštite. Iskrišta nisu prikladna za zaštitu transformatora, jer kad ona prorade, nastaje strmo odrezani val (v. sl. 89 b), koji može biti vrlo opasan za izolaciju namota. Iskrišta se većinom izvode sa štapnim elektrodama; one se znatno troše uslijed luka pa im se stoga mijenja proradni napon. Horizontalno smještene elektrode u obliku rogova manje se troše i bolje gase luk.

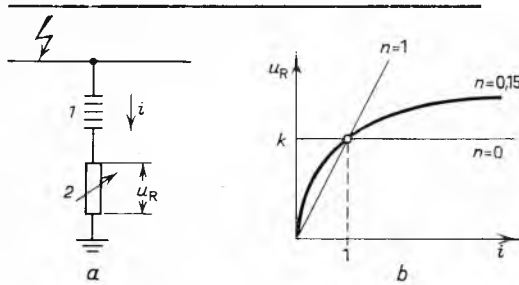
Cijevni odvodnici su zatvorena iskrišta, koja imaju znatnu prekidnu moć. Princip njihova rada može se razabrati iz sl. 91. Odvodnik ima dva u seriju spojena iskrišta: vanjsko (2/3) i unutarnje (7/6). Njihovim se probojem uspostavlja galvanska veza 1-2-luk-3-7-luk-6-5, kojom odvodna struja poteče iz faznog voda u zemlju. Svrha je vanjskog iskrišta spriječiti da izolaciona cijev 4 od plinovornog materijala bude stalno pod naponom. Unutarnje se iskrište sastoji od punog štapa 7 i prstenaste elektrode 6. Plin koji se djelovanjem luka oslobađa iz stijenke cijevi izlazi velikom brzinom kroz otvor te elektrode. Njegovim se strujanjem luk ugasi u prvom ili drugom poluvalu popratne struje.

Ventilni odvodnici imaju jednostavno ili višestruko iskrište, serijski spojeno s jednim ili više promjenljivih otpornika. Iskrišta služe za udešavanje visine prorađnog napona, neovisno o obliku i polaritetu vala, kao i za gašenje luka. Otpornici imaju nelinearnu karakteristiku napon-struja. Uz visoke prenapone djeluju kao otpornici malog otpora, koji lako pro-



Sl. 91. Cijevni odvodnik. 1 Gornja priključnica, 2-3 vanjsko iskrište, 4 plinovorna cijev, 5 donja priključnica, 6-7 unutarnje iskrište, 8 porculanski izolator

puštaju velike odvodne struje, a pod normalnim pogonskim naponom kao otpornici velikog otpora, koji smanjuju amplitudu popratne struje. Ventilni odvodnik shematski prikazuje sl. 92 a, a karakteristiku nelinearnog otpornika sl. 92 b. Otpornici se izrađuju



Sl. 92. Načelna shema ventilnog odvodnika (a) i karakteristika nelinearnog otpornika (b). 1 Serijski iskrišta, 2 otpornik

od specijalnih keramičkih masa s dodatkom sitnozrnatog silicijum-karbida (karborunda), poznatih pod različitim nazivima (Thyrit, Resorbit, Vilit, Carbosial, Metrosil). Njihove su nelinearne karakteristike uzrokovane pojavom tinjanja i mikroskopskih lukova među vodljivim zrnima. Gradijent napona nelinearnih otpornika E mijenja se s gustoćom struje j prema relaciji

$$E = aj^n, \quad 0 < n < 1,$$

gdje su a i n konstante. To znači da im specifični otpor ρ ovisi o spomenutim veličinama po zakonu

$$\rho = \frac{E}{j} = aj^{n-1} = \sqrt[n]{a} E^{(n-1)/n}.$$

Za otpornik duljine l i presjeka S dobivaju se na taj način, uz $k = al/S^n$, analogne relacije između otpora R , pada napona u_R i struje i :

$$R = \frac{k}{i^{1-n}} = \frac{\sqrt[n]{k}}{u_R^{(1-n)/n}}, \quad u_R = ki^n. \quad (27)$$

Posljednju jednadžbu ilustrira dijagram u sl. 92 b. Krivulja ($n = 0,15$) odgovara suvremenim nelinearnim otpornicima, kosi pravac ($n = 1$) idealnom linearnom, a horizontalni ($n = 0$) idealnom nelinearnom otporniku. Relacija (27) piše se često u obliku

$$i = C u_R^m,$$

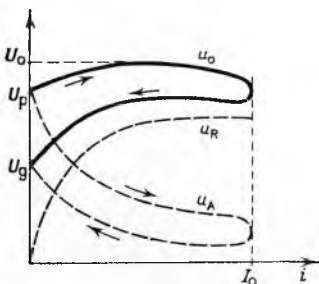
gdje je $C = 1/k^n$, $m = 1/n > 1$.

Oblik krivulje odvodnog napona $u_0(t)$ po proradi ventilnog odvodnika, prikazan u sl. 89 c, dobiva se sumiranjem krivulje napona luka na iskrištu (slične krivulji u_0 u slici 89 b) i krivulje napona na otporniku (slične krivulji u slici 92 b). Analognim se načinom dolazi do strujno-naponske karakteristike odvodnika

$$u_0(i) = u_A + u_R,$$

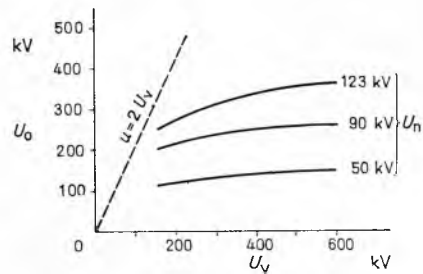
prikazane u sl. 93. Napon iskrišta u_A određen je dinamičkom karakteristikom luka koji se pali uz proradni napon U_p i gasi uz napon gašenja U_g . Njena prekretna točka odgovara udarnoj odvodnoj struji I_0 . Amplituda odvodnog napona U_0 može biti veća ili manja od proradnog napona U_p . Veća od ove dvije vrijednosti određuje zaštitni nivo odvodnika.

Točno uzevši nije karakteristika otpora $u_R(i)$ jednostruka linija, već i ona čini usku petlju zbog toplinske histereze.



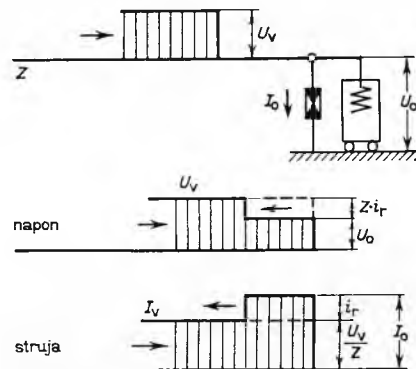
Sl. 93. Strujno-naponska karakteristika ventilnog odvodnika. u_0 Napon odvodnika, u_R napon otpornika, u_A napon iskrišta, U_0 amplituda odvodnog napona, U_p proradni napon, U_g napon gašenja, i struja odvodnika, I_0 udarna odvodna struja

Preporuke IEC određuju najvišu dopuštenu vrijednost napona U_0 koja nastaje prolazom udarnog strujnog vala oblika 8/20 (trajanje čela $8 \mu s$, trajanje hrpta $20 \mu s$) i amplitude I_0 jednake nazivnoj odvodnoj struji.



Sl. 94. Zaštitna karakteristika ventilnog odvodnika. U_0 amplituda odvodnog napona, U_v amplituda dolaznog udarnog vala, $u = 2 U_v$ napon koji bi se uslijed refleksije pojavio na nezaštićenoj stanici, U_n nazivni napon odvodnika

Zaštitna karakteristika ventilnog odvodnika prema sl. 94 određuje amplitudu odvodnog napona U_0 kao funkciju amplitude U_v udarnog vala koji dolazi iz velike udaljenosti. Ona se obično daje za postrojenja na kraju voda određenog valnog otpora $Z = \sqrt{L_1/C_1}$. (Za jednostruke vodiče je $Z \approx 450 \Omega$.) Na stanici bez odvodnika pojavio bi se napon $u \approx 2 U_v$ (kosi pravac), uzrokovan refleksijom udarnog vala tjemene vrijednosti U_v . Zaštitnim djelovanjem odvodnika prenapon je ograničen na maksimalni iznos U_0 , prikazan krivuljama od kojih svaka odgovara odvodniku drugog nazivnog napona U_n . Nazivni je napon odvodnika po definiciji najviša efektivna vrijednost napona pogonske frekvencije koja smije biti trajno priključena na njegove stezaljke. Prelazne pojave struje i napona u krajnjoj stanici mogu se objasniti na temelju sl. 95. Zajedno s putnim valom napona U_v kreće se prema stanici val struje amplitude $I_v = U_v/Z$. Kad valovi dođu



Sl. 95. Prelazne pojave u krajnjoj stanici. U_v i I_v napon i struja dolaznog pravokutnog putnog vala, Z valni otpor voda, $Z i_r$ i i_r napon i struja refleksiranog vala

u stanicu, nastaje refleksija. Dolaznom valu struje superponira se povratni val i_r istog polariteta

$$i_r = I_0 - I_v = I_0 - \frac{U_v}{Z},$$

a dolaznom valu napona superponira se reflektirani val u_r suprotnog polariteta

$$u_r = -Z i_r = U_v - Z I_0.$$

Napon na stezaljkama odvodnika iznosi

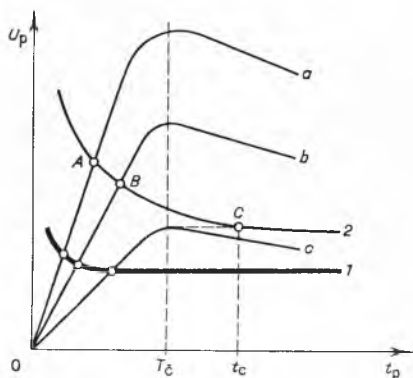
$$U_0 = U_v + u_r = 2 U_v - Z I_0 = 2 U_v - Z \cdot C U_0^m$$

odakle slijedi

$$U_v = \frac{U_0 + Z C U_0^m}{2}.$$

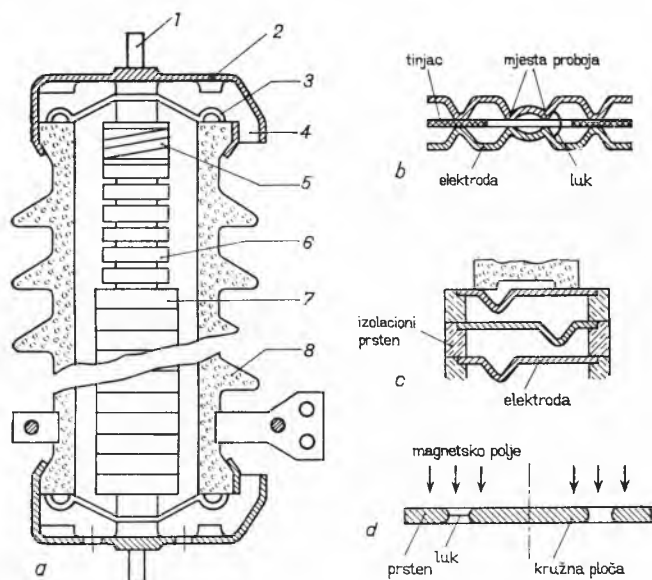
Ova je relacija grafički predočena krivuljama u sl. 94.

Proradna karakteristika određuje ovisnost proradnog napona U_p o vremenu prorade t_p , kao što je prikazano krivuljom 1 u sl. 96. Ona se snima uz normalne atmosferske udarne napone oblika 1,2/50 (trajanje čela vala $T_\delta = 1,2 \mu s$, trajanje hrpta vala $T_h = 50 \mu s$). Za odvodnike nazivnog napona preko 100 kV i nazivne odvodne struje $I_0 = 10$ kA snima se proradna karakteristika i uz sklopne prenapone sa tri različita trajanja čela vala u granicama 30...60, 150...300 i 1000...2000 μs . Udarne valovi (a, b, c) različite strmine čela dovode do prorade odvodnika (proboja iskrišta) u različitim točkama presjeka s krivuljom 1. U dijagramu je krivuljom 2 prikazana i udarna karakteristika štitećeg objekta, koja daje najveće momentane vrijednosti udarnog napona do trenutka proboja. Uz $t_p < T_\delta$ dolazi do proboja na čelu vala (točke A i B), uz $t_p > T_\delta$ na hrptu (točka C). Ordinata točke C određena je amplitudom vala c, koji dovodi do proboja u trenutku t_c . Međunarodne preporuke IEC određuju ove ka-



Sl. 96. Odnos proradne karakteristike odvodnika (1) prema udarnoj karakteristici štitećeg objekta (2). U_p proradni (probojni) napon, t_p vrijeme prorade (proboja), a...c udarne napone jednakog trajanja čela T_δ i različite strmine

rakteristične vrijednosti: a) najmanju amplitudu atmosferskog udarnog napona oblika 1,2/50 koja mora svaki put dovesti do prorade odvodnika i najviši dopušteni proradni napon uz tako definirani val; b) najviši dopušteni proradni napon na čelu



Sl. 97. Princip konstrukcije ventilnog odvodnika. a) Presjek odvodnika; b, c i d različiti tipovi iskrišta; 1 priključnica, 2 metalna kapa, 3 elastična membrana za ograničenje pretlaka, 4 ispušni otvor, 5 tlačna opruga, 6 serijsko iskrište, 7 nelinearni otpornik, 8 porculansko tijelo

vala određene strmine s, koja se za nazivne napone odvodnika $U_n \leq 123$ kV može aproksimirati izrazom $s \approx 100 U_n / 12$ (s je izraženo u kV/ μs , U_n u kV).

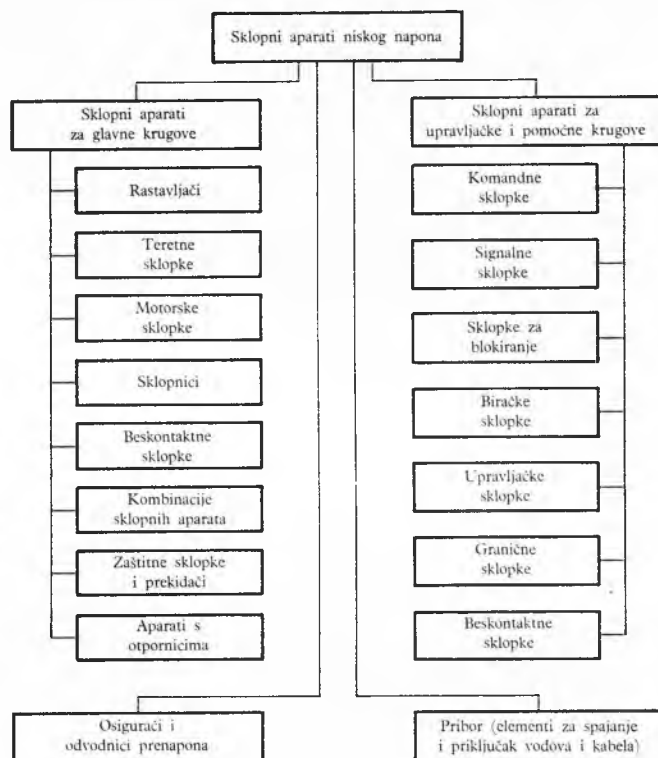
Načelni uvid u konstrukciju ventilnog odvodnika daje sl. 97 a.

U šupljem porculanskom tijelu 8 smještena su višestruka iskrišta 6 u seriji s nelinearnim otpornicima 7, koji se obično sastoje od većeg broja elemenata u obliku kružnih diskova ili prstena. U novije vrijeme rade se i kompaktni prizmatički blokovi kvadratnog presjeka (Siemens). Ovako sastavljen stup stlačen je oprugama 5 i spojen s vanjskim priključnicama 1. Unutrašnjost odvodnika hermetički je zatvorena elastičnim membranama 3, da bi se osjetljivi elementi zaštitili od utjecaja atmosfere. Membrane služe ujedno za ograničenje unutar-njegov tlaka, jer se pri određenom tlaku naglo odignu od čeonih ploha izolatora te kroz ispušne otvore 4 u kapama 2 uspostave vezu s vanjskom atmosferom. Iskrišta se sastoje od elemenata s malim probojnim razmacima i elektroda velike površine. Time se postiže malo rasipanje proradnog napona, a vlastiti kapaciteti osiguravaju jednoliku razdiobu napona na pojedine elemente. Nekoliko tipova iskrišta prikazuju slike 97 b, c, d. U izvedbi sl. 97 b umetnut je među posebno formirane elektrode od kružnih limenih ploča tanki prsten od tinjca. Luk se odmah nakon prorade udalji od probojnih izbočina, koje na taj način ostaju neoštećene. Izvedba sl. 97 c predstavlja sličan princip, ali poboljšan izolacionim prstenima koji sadrže sitnozrnati silicijum-karbid, te potpomažu jednoliku raspodjelu napona. U izvedbi sl. 97 d sastoji se elementarno iskrište od dvije koncentrične limene elektrode (ploče i prstena). Luk kruži velikom brzinom u prstenastom rasporu elektroda pod djelovanjem magnetskog polja, proizvedenog permanentnim magnetom ili solenoidom. Time se znatno povećava intenzitet gašenja.

B. Belin

SKLOPNI APARATI NISKOG NAPONA

Sklopni aparati niskog napona služe za sklapanje glavnih, upravljačkih i pomoćnih krugova, a primjenjuju se uglavnom u niskonaponskim distribucionim i industrijskim postrojenjima i uređajima. Oni se prema svojoj namjeni mogu podijeliti na sklopne aparate za glavne krugove, sklopne aparate za upravljačke i pomoćne krugove, niskonaponske odvodnike, osigurače i pribor koji obuhvaća različite elemente za spajanje i priključak vodova i kabela.



Sl. 98. Podjela sklopni aparata niskog napona

Pojedine grupe niskonaponskih sklopni aparata mogu se i dalje podijeliti na više načina, npr. prema načinu rada, prema vrsti pogona, prema sklopnoj moći, prema načinu gašenja luak i prema namjeni.

U ovom je članku za opis i obradu sklopni aparata niskog napona prihvaćena osnovna namjenska podjela prikazana na slici 98.

Sklopni aparati koji se upotrebljavaju u električnim instalacijama obrađeni su i opisani u članku *Električne instalacije*, str. 6...8.

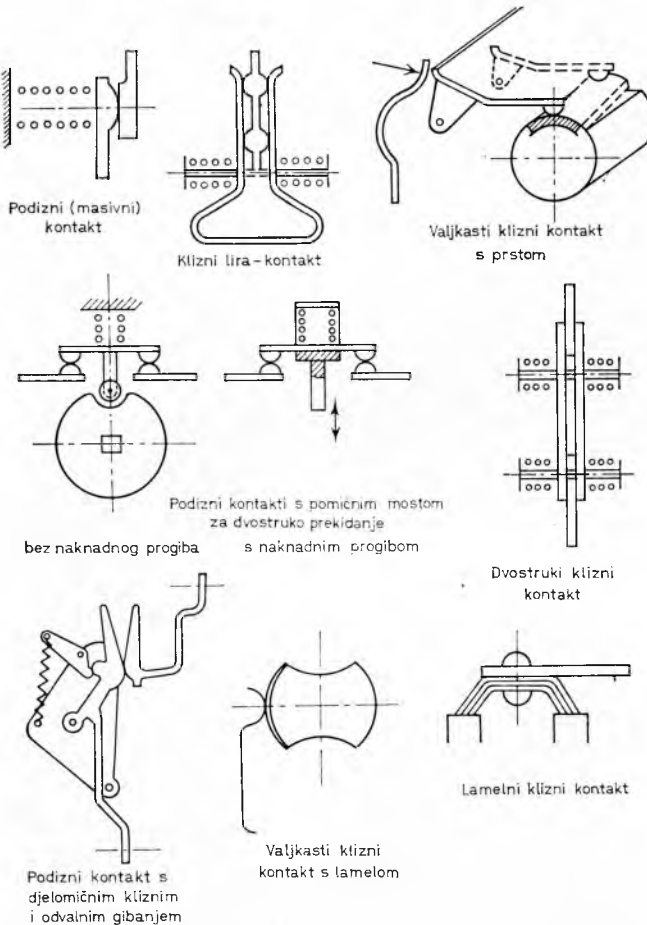
U vezi s opisom niskonaponskih sklopni aparata upotrijebljeni su različiti pojmovi koji se odnose na njihove karakteristike. Neki od njih spomenuti su već ranije. Među te pojmove idu: prekidna snaga, prekidna moć, uklopna moć (v. str. 121), sklopni

ciklus (jedno uklapanje i isklapanje), mehanička trajnost (ukupni broj sklopnih ciklusa koji aparat izdrži u neopterećenom stanju), učestalost sklapanja (broj sklopnih ciklusa u jednom satu), i trajnost kontakata.

Zaštita sklopnih aparata niskog napona. Prema svom smještaju na električnim uređajima i postrojenjima aparati niskog napona mogu biti posve otvoreni (nezaštićeni) ili zaštićeni svojim kućištem. Primjenjuju se ove glavne vrste zaštite: zaštita od dodira dijelova pod naponom; zaštita od štetnih utjecaja okoline (stranih tijela, prašine, vode, plinova, para i mehaničkih udaraca); zaštita od eksplozije okoline u kojoj se nalaze aparati, a koju mogu oni prouzročiti zapaljenjem eksplozivnih plinova i para iskom, lukom, ili dijelovima ugrijanih na visoku temperaturu.

Prema preporukama IEC mehanička zaštita sklopnih aparata podijeljena je na dvije vrste: na zaštitu od dodira s dijelovima pod naponom, koja je ujedno i zaštita od prodora čvrstih tijela, i na zaštitu od prodora tekućina. Svaka od ovih dviju vrsta zaštite podijeljena je prema efikasnosti na nekoliko stupnjeva koji se označuju brojevima, a ispred kojih se stavlja oznaka IP.

Kontakti. U sklopnim se aparatima primjenjuju kontakti različitih oblika kao npr. u obliku noža, podizni kontakti, klizni kontakti, itd. Sl. 99 daje shematski pregled najvažnijih vrsta kontakata koji se primjenjuju u ovim aparatima. To su, kako se vidi, različiti klizni i podizni kontakti; kontakti drugih vrsta upotrebljavaju se manje.



Sl. 99. Shematski prikaz najvažnijih vrsta kontakata niskonaponskih sklopnih aparata

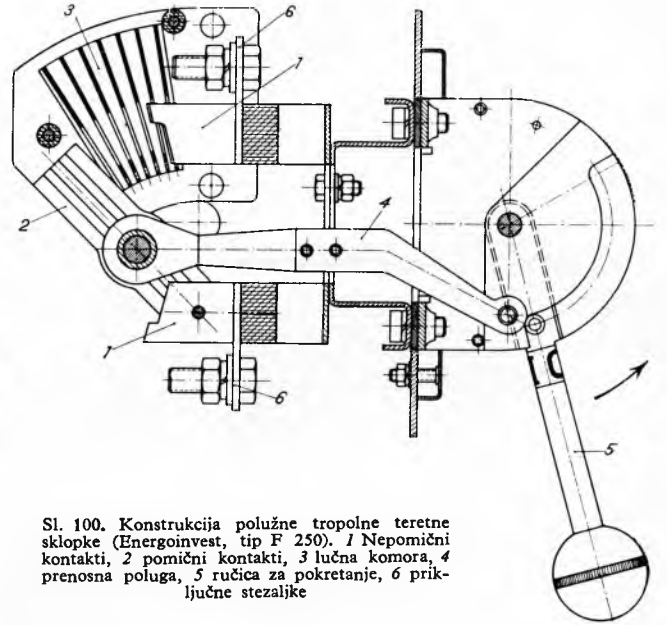
Za aparate niskog napona koji ne prekidaju struje kratkog spoja (sklopke, sklopničke) dolaze najčešće u obzir kontakti s dvostrukim prekidanjem, na kojima se energija luka podijeli na dva prekidna mjesta. Kontakti koji služe i za prekidanje struja kratkog spoja imaju veći kontaktni tlak, pa po pravilu rade s jednostrukim prekidanjem.

Sklopni aparati niskog napona za glavne strujne krugove

Rastavljači su mehanički sklopni aparati koji u principu otvaraju kontakte bez strujnog opterećenja. U otvorenom položaju moraju imati minimalni propisni razmak među kontaktima, a u zatvorenom položaju treba da izdrže struje u normalnim pogonskim uvjetima, odnosno, kroz kratko vrijeme (do reagiranja zaštite), struje kratkog spoja. Izvana mora biti dobro uočljivo da li je rastavljač uklopljen ili iskllopljen. Rastavljači se grade obično kao polužne sklopke s kontaktima u obliku noža ili s podiznim kontaktima. Njihov je glavni zadatak prekidanje vodova radi zaštite poslužilaca koji rade na vodovima ili uređajima.

Rastavljači nemaju lučnu komoru. S obzirom na to da su namijenjeni rjeđem sklapanju uz malu učestalost, od njih se ne zahtijeva veća mehanička trajnost.

Teretne sklopke po konstrukciji su slične rastavljačima, ali su opremljene još i lučnom komorom. One mogu po pravilu



Sl. 100. Konstrukcija polužne tropolne teretne sklopke (Energoinvest, tip F 250). 1 Nepomični kontakti, 2 pomični kontakti, 3 lučna komora, 4 prenosna poluga, 5 ručica za pokretanje, 6 priključne stezaljke

uklapati i prekidati struje do nazivne vrijednosti ($1 \dots 3 I_n$) u slabo induktivnim krugovima (sa $\cos \varphi = 0,65$ i vremenskom konstantom $T = L/R = 2,5$ ms). Ovi sklopni aparati također nisu predviđeni za veću učestalost sklapanja. Oni se najviše upotrebljavaju u razvodnim uređajima i postrojenjima, gdje se ugrađuju u razvodne ploče, ormare i pultove.

Primjer konstrukcije polužne tropolne teretne sklopke nazivne struje 250 A prikazan je na sl. 100. Na nepomične kontakte 1 nasjeda sa svake strane pomični kontakt 2. Lučna komora 3 izvedena je na principu deion (v. str. 130). Pomični se kontakti pokreću s pomoću ručice 5 preko polužnog sistema 4. Vodovi se priključuju na stezaljke 6.

Motorske sklopke služe za uklapanje i isklapanje elektromotora pod različitim pogonskim uvjetima. Njima se sklapanju svi vodiči napojnog voda. Trajnost kontakata i mehanička trajnost suvremenih izvedbi motorskih sklopki vrlo je visoka.

Motorske sklopke sa dva ili više položaja mirovanja pokreću se obično ručno, a sklopke veće izvedbe mogu imati također pneumatski ili motorski pogon.

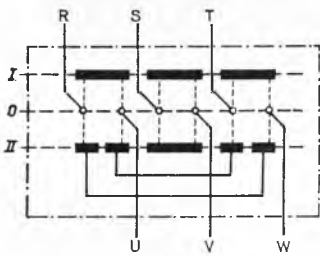
Motorske sklopke za asinhronu kaveznu motore moraju biti kadre da uklope i isklope zakočeni motor kome je potezna struja višestruko veća od nazivne, a $\cos \varphi$ nepovoljan. Ti su uvjeti mnogo teži nego u pogonu nakon zaleta motora. Motorske sklopke za kavezne motore proizvode se za direktno pokretanje, za promjenu smjera vrtnje (reverziranje), za pokretanje u spoju zvijezda-trkut i za promjenu brzine prespajanjem broja polova (Dahlanderov spoj, motori s više brzina, v. *Električni strojevi*, str. 192).

Po konstrukciji mogu se motorske sklopke uglavnom podijeliti na valjkaste i grebenaste sklopke.

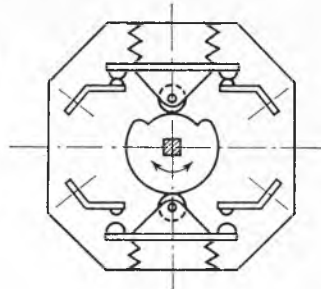
Valjkaste sklopke su po koncepciji starije, pa se danas više mnogo ne upotrebljavaju. Sastoje se od pokretnog valjka od izolacionog materijala, opremljenog kontaktnim oblozima koji kliču po nepomičnim kontaktima i u pojedinim položajima ostvaruju određene spojeve. Sheme spajanja valjkastih sklopki prikazuju se radi bolje preglednosti na razvijenom plaštu valjka. Primjer razvijene sheme valjkaste sklopke za reverziranje asinhronih motora zamjenom dviju faza vidi se na sl. 101. Položaj 0 je isklonpi, a položaji I i II odnose se na oba smjera vrtnje.

Grebenaste sklopke (sl. 102) imaju na osovini kolute s grebenima ili utorima koji služe za pokretanje pomičnih kontaktnih dijelova. Suvremene se izvedbe ističu velikom mehaničkom trajnošću i malim dimenzijama, koje se postižu zbijenom konstrukcijom. Variranjem duljine grebena ili utora i njihova rasporeda na obodu koluta ostvaruje se redoslijed i trajanje uklopnog i isklonpnog stanja kontakata. Na sl. 102 dva kontakta sa stezaljkama nalaze se na zajedničkoj izolacionoj ploči. Za realizaciju neke sheme sklapanja potrebno je obično više takvih ploča s kontaktima, koje se nanižu na zajedničku osovinu u tzv. »paket«, pa se grebenaste sklopke ove konstrukcije zovu i *paketne sklopke*.

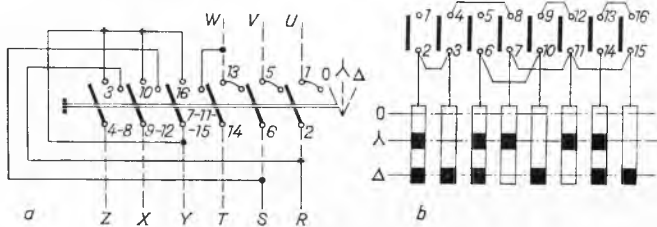
S prednje strane grebenastih sklopki nalazi se na istoj osovini razdjelni mehanizam koji služi za zaustavljanje i držanje sklopke u svakom predviđenom položaju.



Sl. 101. Razvijena shema valjkaste sklopke za reverziranje trofaznih asinhronih motora. O osnovni položaj, I i II položaji za dva smjera vrtnje



Sl. 102. Shematski prikaz kontakata grebenaste sklopke sa dvostrukim prekidanjem



Sl. 103. Shema spoja (a) i raspored kontakata (b) grebenaste sklopke zvijezda-trokut

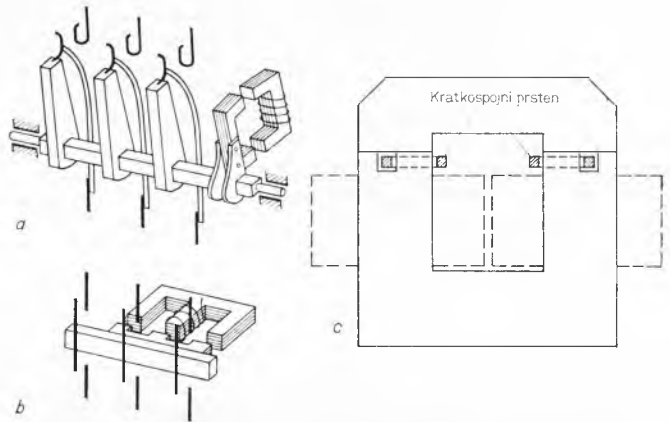
Na sl. 103 prikazan je primjer sheme spoja i raspored kontakata grebenaste sklopke za preklapanje motora iz zvijezde u trokut s elementima iz sl. 102.

Sklopnik ili kontaktor je daljinsko upravljani sklopni aparat bez zapornog mehanizma, koji se prilikom isklapanja sam vraća u svoj osnovni (otvoreni) položaj. Za uklapanje i držanje u uklopljenom položaju mora postojati neki vanjski (elektromagnetski ili pneumatski) pogonski uređaj.

Svaki se sklopnik, načelno, sastoji od pogonskog mehanizma za daljinsko pokretanje, od organa za mehanički prijenos gibanja od pogonskog mehanizma na kontakte i od kontaktnog sistema.

Pogon sklopnika najčešće je elektromagnetski, a rijetko pneumatski. Za uzbudu elektromagneta može se primijeniti izmjenična ili istosmjernja struja. Jezgre elektromagneta imaju obično oblik slova U ili E (sl. 104 a, b). Jezgre oblika U izvede se s jednim ili dva svitka (na oba kraka), a jezgre oblika E s jednim svitkom na srednjem kraku. Elektromagneti napajani jednofaznom izmjeničnom strujom bruje uslijed pulziranja privlačne sile dok su uzbuđeni. Radi sprečavanja tog brujanja postavljaju se u polove jezgre kratkospojni prstenovi koji obuhvaćaju samo dio pola (sl. 104 c). Magnetski tok što ga uzrokuje struja koja se po-

javljuje u kratkospojnom prstenu nije u fazi s tokom što ga proizvodi uzbudni svitak. Prema tome rezultirajući tok i ukupna



Sl. 104. Različite jezgre sklopnika. a Jezgra u obliku slova U, b jezgra u obliku slova E, c jezgra s kratkospojnim prstenom

privlačna sila elektromagneta nikad nije jednaka nuli jer se nultočke tokova kroz prsten i izvan prstena vremenski ne podudaraju. Rezultirajuća privlačna sila može se odrediti iz izraza

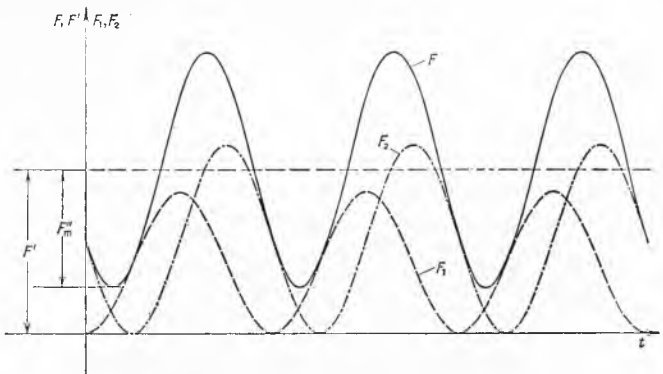
$$F = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} S = \frac{1}{2 \mu_0} \left[\frac{\Phi_{vm}^2}{(1-a) S} \sin^2 \omega t + \frac{\Phi_{um}^2}{a S} \sin^2 (\omega t - \varphi) \right] = F_1 + F_2,$$

u kojem je F_1 sila na dijelu pola izvan prstena, F_2 sila na dijelu pola obuhvaćenom prstenom, B magnetska indukcija, μ_0 permeabilitet vakuumu ($= 4 \pi \cdot 10^{-7}$ H/m), S ukupna površina pola, a dio površine pola obuhvaćen kratkospojnim prstenom, Φ_{vm} amplituda toka kroz dio pola izvan prstena, Φ_{um} amplituda toka kroz prsten, ω kružna frekvencija, t vrijeme, φ fazni pomak između tokova Φ_v i Φ_u . Relacija se može transformirati u oblik

$$F = F' + F'' = \frac{1}{4 \mu_0} \left[\frac{\Phi_{vm}^2}{(1-a) S} + \frac{\Phi_{um}^2}{a S} \right] - \frac{1}{4 \mu_0} \sqrt{\frac{\Phi_{vm}^4}{(1-a)^2 S^2} + \frac{\Phi_{um}^4}{a^2 S^2} + \frac{2 \Phi_{vm}^2 \Phi_{um}^2 \cos 2\varphi}{(1-a) a S^2}} \cos (2\omega t - \psi),$$

$$\text{gdje je } \tan \psi = \frac{(1-a) \Phi_{vm}^2 \sin 2\varphi}{a \Phi_{vm}^2 + (1-a) \Phi_{um}^2 \cos 2\varphi}.$$

Gornji izraz pokazuje da se ukupna sila F sastoji od neke konstantne sile F' i promjenljive sile F'' koja oscilira s frekvencijom dvostruko većom od frekvencije u svitku (sl. 105). Brujanje ne nastupa ako je ispunjen uvjet $F' > F''_m$, gdje je F''_m amplituda sile F'' .



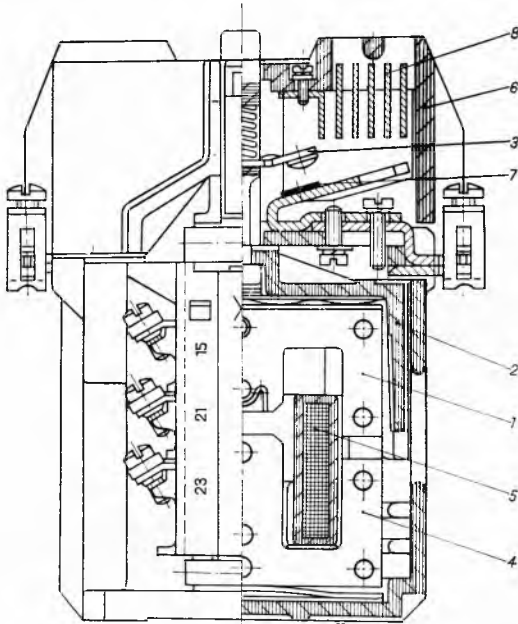
Sl. 105. Pulziranje privlačne sile jednofaznih elektromagneta s kratkospojnim prstenom. F_1 , sila na dijelu pola izvan prstena, F_2 , sila na dijelu pola obuhvaćenog prstenom, F' konstantna komponenta rezultirajuće sile čitavog pola, F rezultirajuća sila cijelog pola

Elektromagneti s istosmjernom uzbudom privlače »mekanije« od izmjeničnih, pa se odlikuju tihim radom (primjena za liftove).

Ako postoji mogućnost priključka na pneumatski vod, veliki sklopnici često imaju pneumatski pogon, jer su za njih potrebni glomazni i teški elektromagneti. Pneumatski pogon sklopnika sastoji se od cilindra sa stapom koji je mehanički povezan s pomičnim kontaktima. Tlak u cilindru mora djelovati čitavo vrijeme dok je sklopnik uklopljen.

Mehanički prijenos od pogonskog organa može se izvesti s različitim elementima, o čemu bitno ovisi koncepcija konstrukcije sklopnika.

Kontaktni se sistem sklopnika sastoji od kontaktnih dije-
lova, opruga za kontaktni tlak i po potrebi od lučne komore.

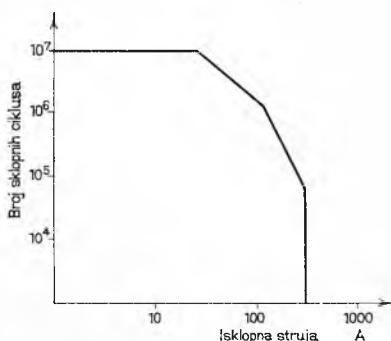


Sl. 106. Tropolni zračni sklopnik (Iskra, tip K 4/8). 1 Kotva elektromagneta, 2 nosač pomičnih kontakata, 3 pomični kontakt, 4 jezgra elektromagneta, 5 uzbudni svitak, 6 lučna komora, 7 nepomični kontakt, 8 limovi za gašenje luka

Većinom se primjenjuje dvostruko prekidanje. Materijal glavnih kontakata je najčešće od sinterovane legure Ag-CdO. Lučne su komore većih sklopnika izvedene s čeličnim pločicama (princip deion, v. str. 130). Kontakti se sistem većine sklopnika nalazi u zraku. Samo sklopnici koji su predviđeni za rad pod posebnim uvjetima (u prašnjastoj ili agresivnoj atmosferi) uronjeni su u ulje.

Primjer tropolnog zračnog sklopnika nazivne termičke struje 63 A prikazuje sl. 106. Na kotvu 1 elektromagneta pričvršćen je nosač 2 pomičnih kontakata 3. U jezgri 4 elektromagneta uložen je uzbudni svitak 5. Lučna komora 6 izvedena je na principu deion s limovima za gašenje 8.

Mehanička trajnost sklopnika i trajnost njihovih kontakata redovno su vrlo velike, njihova uklopna i prekidna moć odgovara, pak, pogonskim uvjetima rada elektromotora, odnosno drugih



Sl. 107. Dijagram trajnosti kontakata sklopnika: ovisnost broja sklopnih ciklusa o jačosti iskopne struje

trošila. Prema preporukama IEC karakteristike sklopnika svrstane su u kategorije prema težini pogonskih uvjeta (kategorije AC 1... AC 4 za izmjeničnu i DC 1...DC 5 za istosmjernu struju). Sklopnici za najteže pogonske uvjete (kategorija AC 4), koji se odnose na učestalo pokretanje i reverziranje kaveznih motora, mogu uklopiti 10...12-struku nazivnu struju motora, a isklapati 8...10-struku motorsku struju. Sklopnik na sl. 106 može u kategoriji AC 3 uklopiti i isklapati motor snage 30 kW pri naponu 380 V.

Trajnost kontakata ovisi o opterećenju, tj. o struji, naponu, pogonskim uvjetima i konstantama strujnog kruga. Dijagram na sl. 107 prikazuje za neki sklopnik trajnost kontakata, izraženu brojem sklopnih ciklusa u ovisnosti o iskopnoj struji.

Sklopnici se upotrebljavaju za daljinsko upravljanje elektromotorima i daljinsko sklopanje različitih drugih trošila. Kombinacijom dvaju ili više sklopnika može se preklapati motor iz zvijezde u trokut, promijeniti motoru smjer vrtnje (reverzirati) ili promijeniti broj uključenih polova.

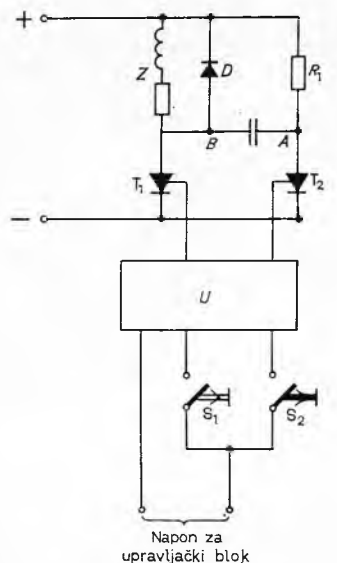
Beskontaktni sklopni aparati s poluvodičkim elementima.

U novije se vrijeme izvide sklopni aparati u kojima se primjenjuju poluvodički elementi umjesto mehaničkih kontakata. Prednosti su beskontaktnih ili statičkih aparata: što im je učestalost i trajnost velika i rad potpuno tih; što ne zahtijevaju održavanje i što se mogu uklopiti ili isklapati u točno određenom trenutku. Kao nedostaci mogu se navesti: zasad još visoka cijena, osjetljivosti prema strujama preopterećenja i kratkog spoja, veći volumen i kod mnogih aparata potreba pomoćnih izvora struje.

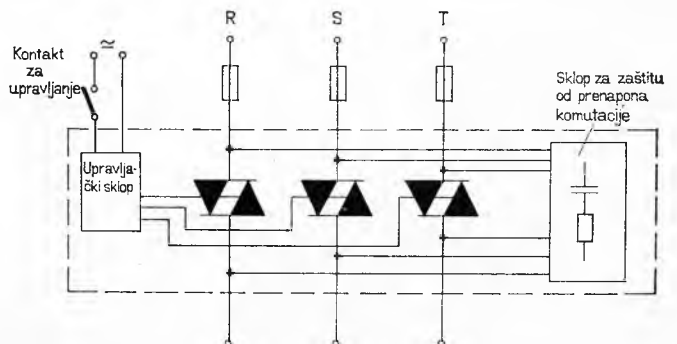
Uklapanje i isklapanje beskontaktnih aparata počiva na djelovanju upravljanih poluvodičkih ventila (v. *Elektronika*) koji propuštaju ili blokiraju struju pod određenim električnim uvjetima. Za to se upotrebljavaju u glavnim krugovima većinom tiristori, a u upravljačkim i pomoćnim krugovima tranzistori. Za upravljanje tiristorima potrebni su uređaji koji šalju impulse na upravljačku elektrodu tiristora.

Na sl. 108 prikazan je princip *beskontaktnih sklopke za istosmjernu struju*.

Pomoću kontakta za uklapanje S_1 upravljački uređaj U deblokira tiristor T_1 i struja prolazi kroz teret Z . Tiristor T_2 ostaje blokiran, pa se kondenzator C nabije tako da mu je strana A pozitivno, a strana B negativno nabijena. Zatvaranjem kontakta S_2 deblokira se tiristor T_2 , kondenzator C se izbije preko tiristora T_2 i promijeni polaritet tiristora T_1 . Time se tiristor T_1 blokira i struja kroz teret prekine. Dioda D služi za zaštitu od prenapona u slučajevima induktivnih tereta. Otpor R_1 ograničava struju kroz tiristor T_2 na vrijednosti ispod struje prihvatanja, pa se tiristor T_2 blokira odmah nakon izbijanja kondenzatora C .



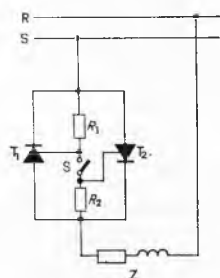
Sl. 108. Tiristorska sklopka za istosmjernu struju. Z impedancija tereta, D dioda, R_1 otpor otpornika za ograničenje struje, C kapacitet kondenzatora, T_1 tiristor za uklapanje, T_2 tiristor za isklapanje, U upravljački blok, S_1 kontakt za uklapanje, S_2 kontakt za isklapanje



Sl. 109. Tropolni beskontaktni sklopnik s triac-komponentama (C. Maier Co, Schaffhausen).

Beskontaktna sklopke za izmjeničnu struju imaju u svakom polu koji prekida struju po dva tiristora u antiparalelnom spoju, ili simetrični tiristor poznat također pod nazivima simistor ili »triac«, koji je ekvivalentan navedenom spoju dvaju tiristora. Upravljanje tiristorima može biti ili pomoću posebnog uređaja ili automatsko, korištenjem izmjeničnog napona mreže. Princip beskontaktnog trolnog sklopnika za izmjeničnu struju s »triac«-komponentama i s uređajem za upravljanje prikazuje sl. 109. Aktiviranjem kontakta za upravljanje deblokiraju se poluvodički elementi i omogućuje prolaz struje.

Zbog osjetljivosti poluvodiča prema struji preopterećenja i kratkog spoja treba za zaštitu upotrijebiti ultrabrzeg osigurače.



Sl. 110. Tiristorska sklopka s automatskim upravljanjem. T_1 i T_2 tiristori, R_1 i R_2 otpornici djelio- ca napona, S upravljački kontakt, Z teret, trošilo

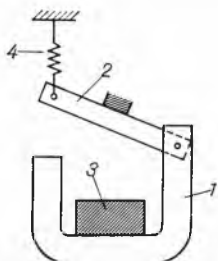
trijebiti jeftiniji poluvodički elementi.

Zaštitni uređaji sklopki i prekidača. Zaštitne sklopke i prekidači su sklopni aparati kojima je zadaća da zaštite električne uređaje i vodove od struja nedozvoljene jakosti ili naponâ nedozvoljene visine. Sklopke, kojima je po definiciji ograničena prekidna moć do struje pogonskih preopterećenja, moraju za automatsko djelovanje imati ugrađene ili priključene posebne mehaničke ili električne organe. Pojam prekidača, naprotiv, uključuje postojanje takvih organa, jer svi prekidači prvenstveno štite od struje kratkog spoja.

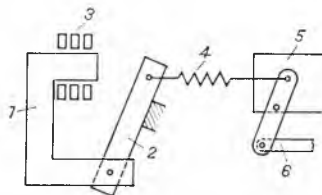
U zaštitne sklopke i prekidače ugrađuju se radi automatskog djelovanja zaporni i okidni mehanizmi. Zaštitne se sklopke i prekidači aktiviraju automatski čim nastupi potreba jedne od zaštita za koju su predviđeni. One se dijele na generatorske, motorske i transformatorske zaštitne sklopke, odn. prekidače.

Zaporni mehanizam povezuje pogon aparata s kontaktima. On omogućuje automatsko isklapanje kad proradi jedan od okidača. Pri uklapanju napinje se isklonpa opruga koju zaporni mehanizam blokira u uklopnom položaju, a oslobađa je pri pokretanju pogonske ručice u smislu isklapanja ili kad proradi okidač. Zaporni mehanizam dozvoljava još i tzv. slobodno okidanje. Ono se sastoji u tome da se u slučaju aktiviranja okidača ne može spriječiti isklapanje zadržavanjem ručice u uklopnom položaju.

Okidači su naprave koje pri prekoračenju dozvoljene granice struje ili napona, primjenom male snage, mehanički okinu zaporni mehanizam zaštitne sklopke ili prekidača i time ga vraćaju u njegov osnovni (otvoreni) položaj. Okidači se dijele s obzirom



Sl. 111. Princip elektromagnetskog okidača. 1 Jezgra, 2 kotva, 3 vodič, 4 opruga



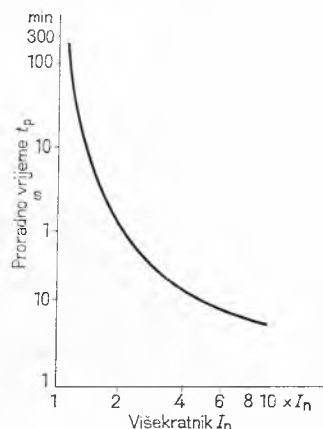
Sl. 112. Princip elektromagnetskog okidača sa zatezanjem pomoću satnog mehanizma. 1 Jezgra, 2 kotva, 3 namot vodiča, 4 opruga, 5 satni mehanizam, 6 poluga za okidanje

na princip rada na elektromagnetske i toplinske. Elektromagnetski okidači mogu biti brzi i usporeni (sa zatezanjem ili bez njega).

Elektromagnetski okidači služe za zaštitu od kratkog spoja i preopterećenja. Oni djeluju kad struja u okidaču premaši dozvoljenu vrijednost. Magnetski krug okidača (sl. 111) sastoji se od jezgre 1 i kotve 2 koje obuhvataju vodič 3. Čim je polje dovoljno jako da privuče kotvu, mehanički se aktivira zaporni mehanizam. Zatezanje elektromagnetskih okidača postiže se npr. pomoću satnog mehanizma (sl. 112), priljubljenim pločama u ulju i prolazom tekućine ili zraka kroz uske raspore.

Kao **termički okidači i releji** najviše dolaze u obzir izvedbe s bimetalima (v. *Elektrotehnički materijali*). (Aparati na principu vruće žice ili rastalnog lema primjenjuju se rijetko.)

Funkcioniranje aparata s bimetalima temelji se na ugrijavanju trake od dva sljubljena metala različitih koeficijenata toplinskog rastezanja, pri čemu traka ili membrana savijajući se na jednu stranu djeluje bilo na kontakti sistem (releji) bilo na napeti zaporni mehanizam, oslobađajući time mehaničku energiju akumuliranu u oprugama aparata (okidači). Budući da je za zagrijavanje bimetala potrebno izvjesno vrijeme ovisno o opterećenju, nadstrujni termički releji i okidači djeluju s vremenskim zatezanjem prema karakteristici na sl. 113. Karakteristika prikazuje ovisnost proradnog vremena t_p o struji I , tj. o višekratniku nazivne struje I_n . Proradna vremena za neke točke karakteristike određena su propisima.



Sl. 113. Karakteristika nadstrujnog termičkog releja ili okidača

Bimetalnim se relejima i okidačima mogu štititi motori od preopterećenja samo do ograničene učestalosti sklapanja (15...25 sklapanja na sat). Bolja, i o učestalosti sklapanja neovisna, je zaštita elektromotora pomoću poluvodičkih sondi (termistora, kojima se otpor mijenja s temperaturom) koje se stavljaju direktno u namot motora. Promjenu temperature namota slijedi promjena otpora poluvodičkog elementa, što se koristi za upravljanje relejnim uređajem za zaštitu motora.

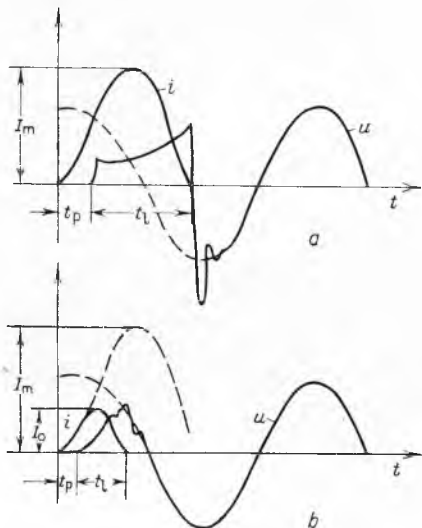
Releji za okidanje upotrebljavaju se i za aktiviranje sklopnika ako oni služe i kao zaštitna sklopka. U tom slučaju oni pomoću svojih kontakata prekinu strujni krug elektromagneta. Releji mogu se aktivirati i neki okidači pa preko njih i prekidači.

Releji koji služe za okidanje prekidača i za automatsko isklapanje sklopnika najčešće su termički ili elektromagnetski. Princip konstrukcije ovih releja isti je kao za okidače, jedino što umjesto mehaničkog elementa za okidanje imaju kontakt (v. članak *Releji*).

U novije se vrijeme pojavljuju tendencije da se umjesto bimetalnih i elektromagnetskih nadstrujnih okidača primijene **elektronički nadstrujni okidači**. Takvi aparati imaju na ulaznoj strani strujni transformator na čiji je sekundarni namot priključen otpornik. Pad napona na njegovom omskom otporu djeluje preko više elektroničkih sklopova na elektromagnet za okidanje koji je priključen na izlaz uređaja i koji mehanički djeluje na zaporne organe prekidača. Elektronički sklopovi aktiviraju taj elektromagnet pri preopterećenju i kratkom spoju, a služe i za regulaciju vremenskog zatezanja u širokim granicama. Postoji također mogućnost ponovnog uklapanja u kratkom vremenskom intervalu. Ovakvi okidači imaju mogućnost široke regulacije nazivne struje, proradne struje za zonu kratkog spoja i proradnog vremena za zonu preopterećenja. Za selektivnu zaštitu može im se regulirati vrijeme zatezanja u zoni kratkog spoja. Njihove se karakteristike mijenjaju relativno malo i pri znatnijim promjenama temperature okoline.

Direktni pokretači ili starteri najvažnija su vrsta zaštitnih sklopki. Oni služe za direktno uklapanje motora, a opremljeni su zaštitom od preopterećenja; oni priključuju motor na

još u porastu ograničava na neku vrijednost $I_0 < I_m$ (odrežana ili propuštena struja). Trajanje prekidanja brzih prekidača kreće se u granicama 4...6 ms. Ograničavanje porasta kratkospojne struje na vrijednost znatno ispod amplitude bitno smanjuje djelovanje elektrodinamičkih sila koje bi mogle proizvesti mehanička oštećenja u električnim postrojenjima. Ograničavanje struje kratkog spoja posebno je važno za ispravljačke uređaje, jer živini ili poluvodički ventili ne mogu ni kratko vrijeme podnijeti veće strujne udare.



Sl. 116. Prekidanje struje kratkog spoja u normalnom (a) i brzom prekidaču (b)

Naglo otvaranje brzih prekidača za ograničenje struje osniva se na principu direktnog djelovanja jakih elektrodinamičkih sila ili magnetskog polja, nastalih uslijed strmog porasta velikih kratkospojnih struja, na otvaranje pomičnih kontakata. Kod većih struja primjenjuje se i autorepulzorni princip koji za brzo djelovanje iskorištava odbojne sile među kontaktima.

Sklopni aparati s otpornicima služe za sklopanje strujnih krugova električnih strojeva, za pokretanje, za regulaciju brzine vrtnje, za kočenje motora, za regulaciju napona generatora, za terećenje i sl. U ovu grupu dakle idu: pokretači s otpornicima, aparati za kočenje elektromotora i regulatori uzbude.

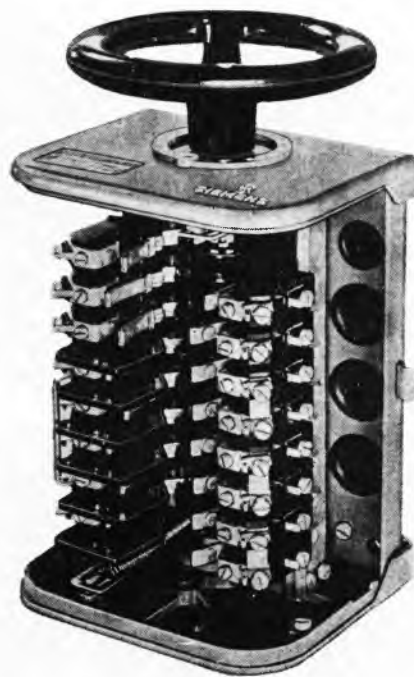
Aparati s otpornicima sastoje se od sklopke ili niza sklopničkih i otpornika. U manjim su aparatima sklopke i otpornici povezani u konstrukcionu cjelinu, a u većim jedinicama mogu biti posve odvojeni.

Sklopke za otpornike imaju više položaja u kojima uključuju, odnosno isključuju, pojedine stupnjeve otpora u krugu. Za manju učestalost i lakše pogonske uvjete upotrebljavaju se stepenaste sklopke, a za teže uvjete kontroleri ili niz sklopničkih.

Stepenaste sklopke sastoje se obično od ravne ploče od izolacionog materijala na kojoj su oko osovine raspoređeni nepomični kontaktni dijelovi, spojeni s parcijalnim otpornicima, što pripadaju pojedinim sklopnim položajima. Po nepomičnim kontaktima klize pomični kontakti i spajaju otpornike prema određenoj shemi. Stepenaste sklopke mogu imati kontakte smještene na obodu izolacionog valjka umjesto na ploči. **Kontroleri** su u principu velike valjkaste ili grebenaste sklopke, robustne izvedbe, za teže pogonske uvjete. Grebenasti su kontroleri u električnom i mehaničkom pogledu izdržljiviji od valjkastih, a mogu se opremiti i većim brojem kontakata. Primjer grebenastog kontrolera vidi se na sl. 117.

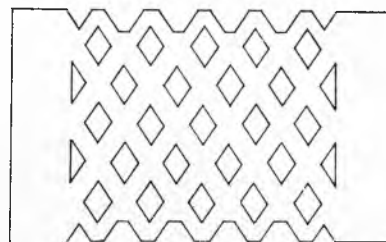
Sklopnički, koji sve više zamjenjuju stepenaste sklopke u aparatima s otporima, aktiviraju se malim kontrolerima u upravljačkom krugu, koji su također poznati pod nazivom upravljačke sklopke ili indirektni kontroleri.

Otpornici se prema svojoj konstrukciji dijele na žičane, vrpčaste, limene, lijevane i tekućinske. Žičani otpornici se sastoje od otporne žice namotane na keramički cilindar ili okvir s izolacionim podlogama, ili kod debljih žica u slobodnu spiralu. Kao

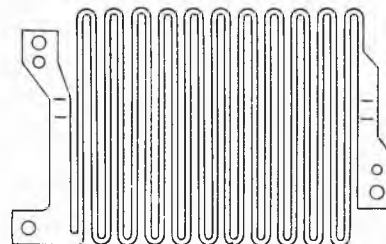


Sl. 117. Grebenasti kontroler (Siemens tip K 7431—11)

materijal za otpornike dolazi u obzir konstantan, krom-nikal i Kantal. Otporna vrpca ima veću rashladnu površinu nego žica. Za veće struje upotrebljavaju se limeni ili lijevani otpornici. Na sl. 118 prikazan je element limenog otpornika, a na sl. 119 lijevanog. Limeni se otpornici izrađuju od nerđajućeg čelika (legure željeza, kroma i nikla). Za lijevane se otpornike upotrebljava gvožđe s dodatkom silicija. Limeni su otpornici neosjetljivi prema vibracijama i udarcima i lakši su od lijevanih; ovi se opet, zbog veće mase mogu kratkotrajno više opteretiti. Elementi



Sl. 118. Element limenog otpornika



Sl. 119. Element lijevanog otpornika

prema sl. 118 ili 119 slažu se u bateriju ili slog otpornika. Kao otpor tekućinskih otpornika služi obično otopina natrijum-karbonata (Na_2CO_3) u vodi. Ugrijavanjem otopine njezin se otpor jako smanjuje.

Pokretači, regulacioni pokretači i regulatori uzbude slične su konstrukcije. Stepenaste sklopke ugrađene su iza ili ispred otpornika. Kontakti i otpornici određeni za rad u prašnoj ili agresivnoj atmosferi stavljaju se u ulje. Otpornici pokretača za

motore veće snage često se stavljaju u ulje, koje toplinu odvodi brže nego zrak.

Postoje i izvedbe tekućinskih pokretača kojima se mijenja otpor uranjanjem ploča u otopinu Na_2CO_3 , ili koji rade na principu naglog početnog isparavanja tekućine (maksimalni otpor) koja se postepeno opet kondenzira i time smanjuje otpor na konačnu minimalnu vrijednost.

Pokretači s otpornicima smanjuju udar struje pri uklapanju elektromotora, a kod asinhronih se motora postiže istodobno i povećanje poteznog momenta. Za vrijeme pokretanja smanjuje se stupnjevito otpor pokretača. Promjene struje tokom pokretanja variraju između neke maksimalne i neke minimalne vrijednosti. Maksimalna vrijednost zove se *vršna struja* I_2 , a minimalna, *sklopna struja* I_1 . Sklopna je struja pri pokretanju uz nazivni ili veći moment motora obično nešto veća od nazivne struje motora I_n . Srednja struja pokretanja I_s jednaka je

$$I_s = \frac{I_1 + I_2}{2}.$$

Za proračun pokretača važne su još ove veličine: trajanje pokretanja, broj uzastopnih pokretanja, učestalost pokretanja (u jednom satu) i težina pokretanja, definirana omjerom I_s/I_n .

Shemu spoja *pokretača istosmjernog porednog motora* prikazuje sl. 120. Otpori pokretača mogu se odrediti iz osnovne relacije za poredne motore (v. *Električni strojevi*, str. 181).

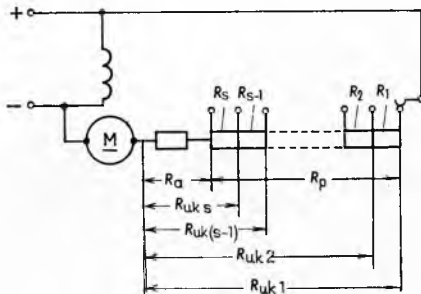
$$U - I R_{uk} = E = k \Phi n, \quad (28)$$

gdje je U napon mreže, I struja kroz otpornike i armaturu, R_{uk} ukupni otpor armature i uključenih otpornika, E inducirana protuelektromotorna sila, Φ uzbudni tok, n brzina vrtnje i k konstanta.

Iz sl. 120 slijedi da je na početku pokretanja ukupni otpor pokretača R_p

$$R_p = R_{uk1} - R_a, \quad (29)$$

gdje R_a znači otpor armature.



Sl. 120. Shema spoja pokretača istosmjernog porednog motora. R_a otpor armature, R_{uk} ukupni otpor armature i uključenih otpornika, R_p ukupni otpor pokretača, $R_1 \dots R_s$ parcijalni otpori

Za proračun pokretača redovno se zadaje omjer

$$\lambda = \frac{I_2}{I_1} \approx \frac{I_s}{I_n}. \quad (30)$$

Budući da je na početku pokretanja brzina vrtnje $n = 0$, dobiva se iz jedn. (28) i (29)

$$R_p = \frac{U}{I_2} - R_a = \frac{U}{I_n}.$$

Parcijalni otpori pokretača istosmjernog porednog motora mogu se naći grafičkom metodom prema sl. 121.

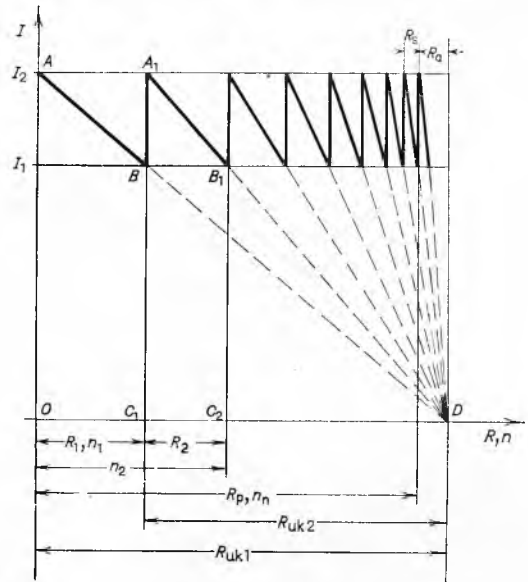
Na os ordinata nanesu se zadane vrijednosti struja I_1 i I_2 , a na os apscisa relativne vrijednosti otpora i brzine vrtnje, učinivši $OD = 1$. Pri tome dužina OD predstavlja u nekom mjerilu ukupni otpor $R_{uk1} = R_p + R_a$ i idealnu brzinu vrtnje n_1 koju bi motor teoretski postigao uz $R_a = 0$.

Iz jedn. (28) slijedi da se za vrijeme pokretanja uz sav uklju-
čeni otpor R_{uk1} mijenja struja od I_2 do I_1 po pravcu ABD :

$$I = \frac{k \Phi (n_1 - n)}{R_{uk1}}. \quad (31)$$

Kad struja padne do vrijednosti I_1 a brzina naraste na n_1 (točka B), treba isključiti prvi stupanj s otporom R_1 , pa će struja skočiti opet na I_2 (točka A_1) i zatim padati po pravcu A_1D do točke B_1 . Na osnovu izraza (31) i sl. 121 može se pisati

$$\frac{I_2}{k \Phi} = \frac{n_1}{R_{uk1}} = \frac{n_1 - n_1}{R_{uk2}} = \dots = \frac{n_1 - n_n}{R_a} = \text{konst.} \quad (32)$$



Sl. 121. Grafičko određivanje otpora pokretača istosmjernog porednog motora

Prema relaciji (32) odresci C_1D , C_2D itd. prikazuju u mjerilu ukupne otpore pokretača i armature uključene na pojedinom stupnju, a dužine OC_1 , C_1C_2 , ... parcijalne otpore R_1 , R_2 , ... pojedinih stupnjeva pokretača.

Parcijalni otpor x -tog stupnja R_x i broj stupnjeva pokretača m može se odrediti i računski iz ovih formula:

$$R_x = R_a (\lambda - 1) \lambda^{m-x}, \quad (33)$$

$$m = \frac{\log \frac{R_a + R_p}{R_a}}{\log \lambda} = \frac{\log \frac{U}{I_n \lambda R_a}}{\log \lambda}. \quad (34)$$

Regulacioni pokretači istosmjernih porednih motora služe za pokretanje i regulaciju brzine vrtnje. U principu su jednaki pokretačima, jedino je dio otpornika koji služi za regulaciju jače dimenzioniran, jer su opterećeni dulje vrijeme nego otpornici za pokretanje.

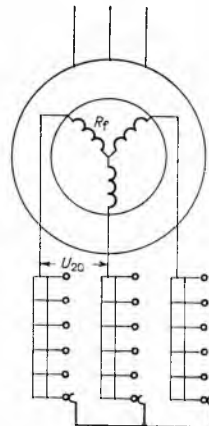
Otpor za regulaciju R_r do brzine n_{min} može se izračunati uz primjenu izraza (28) i (31):

$$R_r = \frac{U}{I} \left(1 - \frac{n_{min}}{n_1} \right) - R_a. \quad (35)$$

Relacija (35) vrijedi za konstantni moment vrtnje kad brzina ovisi samo o uključenom otporu.

Pokretači istosmjernih serijskih motora ne mogu se tako jednostavno proračunati kao pokretači porednih motora, jer uzbudni tok Φ nije konstantan, već je funkcija struje, koja je određena teretom. Stoga je za proračun potrebno poznavati karakteristike koje prikazuju ovisnost brzine vrtnje n o momentu motora M .

Pokretači asinhronih kolutnih motora uključuju otpornike u rotorski krug motora prema sl. 122. Ako se zanemari induktivni otpor rotora, struja I_2 u rotoru proporcionalna je klizanju s , odnosno brzini vrtnje n :



Sl. 122. Shema spoja pokretača trofaznog kolutnog motora

$$I_2 \approx \frac{U_{20}}{R_f \sqrt{3}} s.$$

Uz $s = 1 - \frac{n}{n_s}$, gdje je n_s sinhrona brzina vrtnje, slijedi

$$I_2 \approx \frac{U_{20}}{R_f \sqrt{3}} \left(1 - \frac{n}{n_s}\right). \quad (36)$$

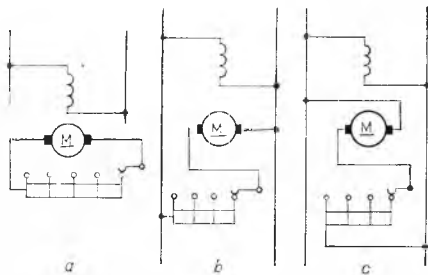
Relacija (36) analogna je izrazu (31) za istosmjerne poredne motore. Ako se, dakle, u formule (30), (33) i (34) umjesto R_a uvrsti otpor faze rotora R_f , a umjesto napona U fazni napon rotora $U_{20}/\sqrt{3}$, dobiju se približne relacije za ukupni otpor R_p , parcijalni otpor x -tog stupnja R_x i broj stupnjeva m pokretača asinhronih kolutnih motora:

$$R_p = \frac{U_{20}}{I_2 \sqrt{3}} - R_f,$$

$$R_x = R_f (\lambda - 1) \lambda^{m-x},$$

$$m = \frac{\log \frac{R_f + R_p}{R_f}}{\log \lambda}.$$

Aparati za kočenje elektromotora s pomoću otpornika razlikuju se prema vrsti motora. Nezavisno uzbuđeni i poredni motori koče se s pomoću otpornika u tri spoja: kratkim spajanjem armature otpornicima (sl. 123 a), protustrujnim kočenjem (sl. 123 b, c) i generatorskim kočenjem (v. *Elektromotorni pogoni*).



Sl. 123. Kočenje otpornicima istosmjernog porednog motora. a) Kratkospojno kočenje, b) i c) protustrujno kočenje

U slučaju *kratkospojnog ili elektrodinamičkog kočenja* motor se u vrtnji odvoji od mreže i spoji na otpornike aparata. Njihov otpor za kočenje iznosi približno:

$$R_{kk} = \frac{k \Phi n}{I_a} - R_a, \quad (37)$$

gdje je $k \Phi n$ inducirana EMS pri brzini vrtnje n , I_a struja armature, R_a otpor armature.

Ako je ukupni otpor u krugu motora prije kočenja iznosio R_a pri nazivnoj struji $I_a = I_n$ (isključeni otpornici), tada se uz primjenu izraza (28) i (37) dobije

$$R_{kp} = \frac{U_n}{I_n} - 2 R_a.$$

Za ovaj se način kočenja obično iskorištavaju stupnjevi otpora pokretača.

Pri *protustrujnom kočenju* naglo se promijeni smjer struje u armaturi, tako da nastane moment vrtnje smjera suprotnog smjeru u kojem se motor vrti uslijed svoje kinetičke ili potencijalne energije. Inducirana EMS u armaturi pribraja se naponu stezaljki U , pa se ukupni otpor za kočenje R_{kp} računa prema izrazu

$$R_{kp} = \frac{2 U}{I_n} - R_a.$$

Generatorsko kočenje dolazi u obzir samo kad motor prijeđe idealni broj okretaja n_1 (npr. pri spuštanju tereta). Tada motor postaje generator i šalje struju u mrežu.

Za kočenje serijskih motora pomoću otpornika primjenjuje se protustrujni ili kratkospojni spoj.

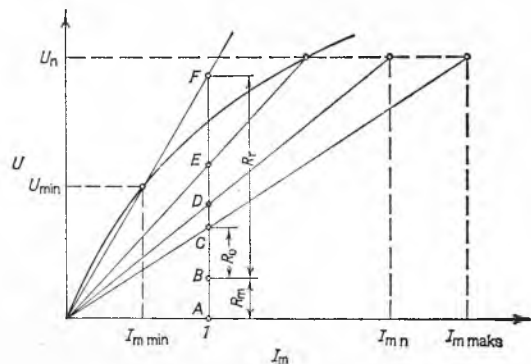
Kočenje trofaznih asinhronih kolutnih motora izvodi se pomoću raznovrsnih spojeva. U kranskim se pogonima primjenjuje nadsinhrono (generatorsko) i podsinhrono kočenje. Pri većim brzinama podsinhronog kočenja (brzina manja od sinhrona) upotrebljavaju se specijalni spojevi, a za manje brzine protustrujno kočenje.

Regulatori uzbuđbe služe za regulaciju napona samouzbuđenih i strano uzbuđenih istosmjernih generatora i sinhronih generatora. Istosmjernim se motorima pomoću njih regulira brzina vrtnje (redovno iznad nazivne vrijednosti). Shema spoja regulatora uzbuđbe istosmjernog porednog generatora prikazana je na sl. 124. Prije prekidanja uzbuđnog kruga treba namot magnetski spojiti, da ne dođe do nedozvoljenih prenapona. Za određivanje otpora regulacije treba poznavati karakteristiku praznog hoda. Još se moraju navesti vrijednosti uzbuđne struje za nazivno opterećenje I_{mn} i za 25% preopterećenja $I_{m \max}$ pri nazivnom naponu U_n . Ukupni otpor regulatora R_r jednak je

$$R_r = \frac{U_{min}}{I_{m \min}} - R_m,$$

gdje su U_{min} i $I_{m \min}$ minimalni napon regulacije (npr. 0,5 U_n) i pripadna uzbuđna struja.

R_m je otpor magnetskog namota, a R_0 predotpor koji ostaje uključen kod struje $I_{m \max}$. Svi parcijalni otpori mogu se odrediti grafički prema sl. 125. Treba kroz točku A ($I_m = 1$) povući pravac



Sl. 125. Određivanje otpora za regulaciju uzbuđbe istosmjernog porednog generatora s pomoću karakteristike praznog hoda

paralelan s osi ordinata. Odresci AB, AC, ..., AF predstavljaju tada ukupne vrijednosti otpora u dotičnoj točki regulacije. Dužina od točke E do točke D, koja prikazuje područje fine regulacije, razdjeli se na 20...100 jednakih dijelova (ovisno o snazi stroja), kao grafički prikaz stupnjeva otpora.

Aparati za upravljačke i pomoćne krugove

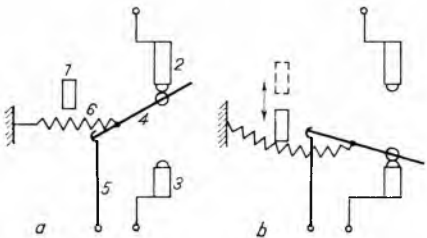
Ovi aparati mogu se podijeliti na komandne, signalne, biračke, upravljačke, granične sklopke i sklopke za blokiranje. Komandne sklopke služe za sklopanje komandnih strujnih krugova, signalne sklapaju krugove signalizacije, biračkima odabire se jedan od više strujnih putova, upravljačke indirektno upravljaju električnim uređajima, a granične kontroliraju neku fizičku veličinu ili pogonsko stanje te isklapaju strujne krugove pri prekoračenju gornje ili donje granice. Po svojim karakteristikama sve su to većinom sklopke za male nazivne struje (do 10 A).

Komandne sklopke. U ovu grupu idu releji (v. članak *Releji*), pomoćni sklopnici, tipkala, mikrosklopke i višestruke sklopke.

Pomoćni sklopnici slični su po konstrukciji malim sklopnicima za glavne krugove. Oni se razlikuju od releja većom nazivnom strujom, većim brojem kontakata (4...10) i većom uklopnom i prekidnom moći. Njihova je izvedba robustnija od izvedbe releja.

Tipkala su komandne sklopke koje se pokreću pritiskom ruke, ili općenito pritiskom nekog dijela ljudskog tijela. Sastoje se od rozete s tipkom i od jednog ili više kontaktnih elemenata. Postoje i tzv. svijetleća tipkala, koja imaju ispod prozirne tipke u boji signalnu žaruljicu. Otvori za smještaj rozete su standardizirani.

Mikrosklopke su minijaturne sklopke s brzim preklapanjem iz jednog položaja u drugi. Imaju veliku mehaničku trajnost i učestalost. Princip djelovanja prikazuje sl. 126. Sklopka se pokreće malom tipkom, koja pritisne oprugu za preklapanje kontakta. Opuštanjem tipke pomični se kontakt naglo vrati u položaj mirovanja. Primjenjuju se izvedbe i sa 2 položaja mirovanja.



Sl. 126. Princip rada mikrosklopke. a) Položaj mirovanja, b) položaj pri pritisnutoj tipki; 1 tipka, 2 i 3 nepomični kontakti, 4 pomični kontakt, 5 držač pomičnog kontakta, 6 opruga

Višestruke sklopke upotrebljavaju se za sklapanje komandnih, signalnih i mjernih krugova. Njima se mogu ostvariti raznovrsni spojevi, pogotovo u slučajevima istodobnog sklapanja većeg broja neovisnih strujnih krugova s više sklopnih položaja. Po svojoj konstrukciji spadaju u paketne sklopke, jer se obično sastoje od niza kontaktnih elemenata.

Signalne sklopke sklapaju signalne uređaje npr. za dojavu položaja prekidača, rastavljača, ventila i sl.

Upravljačke sklopke dijele se na indirektnu kontroleru i programske sklopke. Indirektni kontroleri su vrsta valjkastih ili grebenastih kontrolera što služe za upravljanje sklopnicima i drugim aparatima ili uređajima ponajviše u valjaoničkim pogonima, dizaličnim i transportnim postrojenjima i električnim vozilima. Programske sklopke upravljaju nekim uređajem po unaprijed određenom stalnom programu.

Granične sklopke dijele se na krajne sklopke, tlačne sklopke, kontrolnike temperature i vodostaja i sklopke za ograničenje brzine. Graničnim se sklopkama sklapaju često i glavni strujni krugovi.

Krajne sklopke služe većinom za zaustavljanje kranova, dizalica, različitih strojeva i sl. kad stignu na kraj svog puta, odnosno na granicu gibanja. Krajne sklopke s linearnim gibanjem slične su tipkalima, samo umjesto tipke imaju prikladan element (nos, kotačić) na koji djeluje uređaj na kraju gibanja. Vretenaste krajne sklopke imaju rotaciono gibanje, a isklapaju nakon određenog broja okretaja vretena s navojem.

Beskontaktni sklopni aparati primjenjuju se i u upravljačkim i pomoćnim krugovima a rade s pomoću poluvodičkih elemenata. To mogu biti manji tiristori, tranzistori i drugi. Tako se npr. primjenjuju poluvodički elementi kojima je otpor promjenljiv pod utjecajem magnetskog polja (galvanomagnetski efekt). Približavanjem ili odmicanjem permanentnog magneta u tim se elementima promijeni otpor i taj se efekt u vezi s tranzistorskim pojačalom upotrebljava za upravljanje, signalizaciju i sl. Na tom principu rade različite beskontaktnu krajne sklopke i tipkala. Poznate su također izvedbe elektronskih sklopki s oscilatornim krugom koji se priguši približavanjem metalnih predmeta i na taj način blokira izlazni signal.

Niskonaponski osigurači

Niskonaponski osigurači služe za zaštitu od kratkog spoja i nedozvoljenih preopterećenja vodova, kabela, sklopnih postrojenja i različitih trošila. Oni se mogu podijeliti na instalacione osigurače (v. članak *Električne instalacije*, str. 6) i osigurače velike prekidne moći (iznad 50 kA). Kao sredstvo za gašenje luka upo-

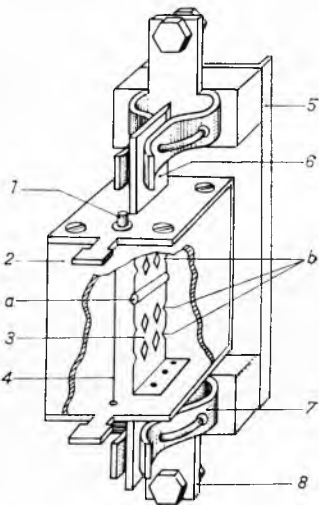
trebljava se u ulošcima tih osigurača čisti kremen pijesak određene granulacije. Rastalnice uložaka velike prekidne moći obično su izvedene od kalibrirane bakrene ili srebrene trake, a rjeđe od žice.

Sve što je rečeno o procesu prekidanja struje i o osnovnim karakteristikama visokonaponskih osigurača (v. str. 138), vrijedi i za niskonaponske osigurače. S obzirom na njihovu karakteristiku, to jest s obzirom na ovisnost rastalnog vremena o struji, $t_r = f(I)$, osigurači velike prekidne moći mogu imati tromo, brzo, tromo-brzo ili ultrabrizno djelovanje. Najčešće se nalaze izvedbe koje u području preopterećenja djeluju tromo, a u području kratkog spoja brzo (tromo-brzi ulošci). Tromo djelovanje uložaka potrebno je pri pokretanju asinhronih kaveznih motora da ne dođe do pregaranja osigurača za kratkog trajanja većih struja zaleta. Stoga valja za zaštitu motora osiguračima upotrijebiti tromo uloške. Njihovu nazivnu struju treba odabrati ~60% veću od nazivne struje motora. Tako dimenzionirani osigurači mogu štiti motore samo od većih struja (većih od približno osmerostruke do desetostroke nazivne struje), a vodove i kabele štite u čitavom području struja koje po veličini i trajanju prelaze dozvoljene granice. Za zaštitu elektromotora od nedozvoljenih preopterećenja, na koja ne reaguju osigurači, primjenjuju se najčešće nadstrujni termički releji ili okidači.

Ultrabrizni ulošci upotrebljavaju se za zaštitu poluvodičkih elemenata (dioda, tiristora) i živinih ispravljača, koji ne mogu podnijeti veća preopterećenja.

Sl. 127 prikazuje uložak velike prekidne moći s podnožjem.

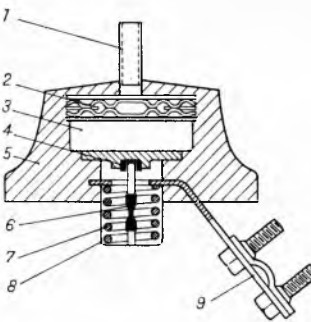
Rastalnica 3 ima zonu preopterećenja a s dodatnim lemom niskog tališta i zone b sa suženim mjestima za kratki spoj. Valjić indikatora 1 malo iskoči kad pregori indikatorska žica 4 što pridržava valjić. Kućište uložka 2 (obično od teatita) ispunjeno je kremenim pijeskom. Po stavljanju uložka u podnožje kontakti noževi 6 spojeni su s elastičnim lira-kontaktima 7 podnožja. Stezaljke 8 s lira-kontaktima pričvršćene su na ploču 5 podnožja.



Sl. 127. Niskonaponski osigurač velike prekidne moći (uložak i podnožje). 1 Indikatorski valjić, 2 kućište uložka, 3 rastalnica, 4 indikatorska žica, 5 ploča podnožja, 6 kontakti nož uložka, 7 lira-kontakt podnožja, 8 stezaljka podnožja; a zona preopterećenja, b zona kratkog spoja

Niskonaponski odvodnici

Za zaštitu niskonaponskih mreža, postrojenja i uređaja od nedozvoljenih prenapona primjenjuju se odvodnici prenapona koji djeluju analogno visokonaponskim. Većinom se upotrebljavaju ventilni odvodnici prenapona s iskrištem i otpornikom nelinearne karakteristike. Sl. 128 prikazuje, kao primjer, Siemensov ventilni odvodnik za niskonaponske vodove. Odvodnici za zaštitu mreža imaju uređaj koji prekine spoj između voda i dozemnog priključka



Sl. 128. Niskonaponski odvodnik prenapona (Siemens). 1 Priključak na vod, 2 iskrište, 3 otpornik s nelinearnom karakteristikom, 4 lem, 5 kućište, 6 otpornik za zaštitu od eksplozije, 7 tlačna opruga, 8 kapa, 9 priključak za uzemljenje

ako određena popratna struja dulje vrijeme teče kroz odvodnik (5 A kroz 1 min). Uređaj se obično sastoji od dva kontakta spojena lemom koji se rastali pod spomenutim okolnostima i prekine spoj. Neke su izvedbe odvodnika također zaštićene od eksplozije koja može nastati pri odvođenju velikih struja. Odvodnik prikazan na sl. 128 ima radi takve zaštite otpornik 6 sa suženim presjekom. Taj se otpornik naglo rastali pri prolazu većih struja. Kad se spoj prekine, tlačna opruga 7 odbaci kapu 8 i tako daje optički signal da odvodnik treba za-

mijeniti. Starije konstrukcije odvodnika imaju stakleno kućište napunjeno inertnim plinom, npr. dušikom. U novijim se odvodnicima primjenjuje specijalna epoksidna masa otporna prema utjecajima vanjske atmosfere; njome se zalije unutrašnjost odvodnika. Postoje izvedbe odvodnika za istosmjernu struju u kojima je iskrište smješteno u polju permanentnog magneta. Polje magneta produljuje luk i tako olakšava njegovo gašenje.

Osim ventilnih odvodnika prenapona upotrebljavaju se i *odvodnici sa izbijanjem u plinu*. Obično se sastoje od iskrišta u staklenoj cjevčici napunjenoj plemenitim plinom. Paralelno s unutarnjim iskrištem spojeno je izvan cijevi vanjsko iskrište, koje djeluje pri većim prenaponima.

Utikači i pribor

Utikačke naprave i pribor za priključak vodova i kabela opisani su u članku *Električne instalacije*, str. 9.

V. Jurjević

LIT.: F. Kesselring, Theoretische Grundlagen zur Berechnung der Schaltgeräte, Berlin 1943. — A. Я. Буџало, Основы электроаппаратостроения, Москва 1946. — J. Saint Germain, Les appareils electriques connecteurs et deconnecteurs, Paris 1949. — H. W. Baxter, Electrical fuses, London 1950. — R. Rüdenberg, Elektrische Schaltvorgänge in geschlossenen Kreisen von Starkstromanlagen, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1953. — M. A. Babikov, Wichtige Bauteile elektrischer Apparate, Teil I (Theoretische Einführung), Berlin 1954. — W. Burstyn, Elektrische Kontakte und Schaltvorgänge, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1956. — Е. М. Цейцос, Воздушные выключатели высокого напряжения, Москва - Ленинград 1957. — R. Holm, Electric contacts handbook, Berlin - Göttingen - Heidelberg 1958. — H. Franken, Schütze und Schützensteuerungen, Berlin - Göttingen 1959. — A. Mauduit, Installations électriques à haute et basse tension, tome II, Paris 1959. — R. Voigt, Elektrische Widerstände, Berlin 1959. — A. Keil, Werkstoffe für elektrische Kontakte, Berlin 1960. — Г. А. Кукеев, Проектирование выключателей переменного тока высокого напряжения, Москва 1961. — H. Schulze, Technik der Wechselstrom-Hochspannungsschalter, Berlin 1961. — S. Dzierżicki, Wysokonapięciowe aparaty łączeniowe, Warszawa 1962. — H. Franken, Motorschutz, Berlin 1962. — М. А. Бабилов, Электрические аппараты, часть третья, Москва - Ленинград 1963. — А. М. Залесский, Электрическая дуга отключения, Москва - Ленинград 1963. — E. Slamecka, Prüfung von Hochspannungs- Leistungsschaltern, Berlin - Heidelberg - New York 1966. — Г. В. Буткевич, Дуговые процессы при коммутации электрических цепей, Москва 1967. — G. Hortopan, Apparate electric, București 1967. — T. Lipski, Bezpieczniki niskonapięciowe, Warszawa 1968. — W. Kussy, Elektrische Niederspannungsschaltgeräte und Antriebe, Berlin 1969. — H. Franken, Niederspannungs-Leistungsschalter, Berlin 1970. — А. И. Голубев, Быстродействующие автоматические выключатели, Москва 1970. — Р. С. Кузнецов, Аппараты распределения электрической энергии на напряжение до 1000 в, Москва 1970.

B. Belin V. Jurjević

ELEKTRIČNI STROJEVI, naprave za pretvaranje energije jednog oblika u energiju drugog oblika posredovanjem mehaničkog (najčešće rotacionog) gibanja, pri čemu je bar jedan od oba oblika električna energija. Pretvaranje energije nije savršeno jer se sva energija koja se stroju dovodi ne može pretvoriti u drugi željeni oblik, ili se ne može sva iskoristiti za određenu svrhu. Korisna je energija ona koju stroj daje u željenom obliku. Razlika između dovedene i korisne energije jesu gubici. Redovito se gubici pojavljuju kao toplinska energija koja se predaje okolini i koja je prema tome izgubljena za dalje iskorišćenje.

Najčešće vrste pretvorbe energije iz jednog oblika u drugi navedene su u ovoj tablici, zajedno s vrstama električnih strojeva s pomoću kojih se izvede:

Oblik dovedene energije	Oblik predane energije	Vrsta električnog stroja
električna	mehanička	električni motori
mehanička	električna	električni generatori
električna	električna	električni pretvarači

Osim toga pripadaju električnim strojevima električni reduktori i spojke; energija se i njima dovodi i od njih uzima u obliku mehaničke energije, ali se u njima najprije mehanička energija pretvara u električnu, a zatim ova opet u mehaničku energiju.

Uređaji za pretvorbu energije bez posredovanja mehaničkog gibanja ne ubrajaju se među električne strojeve u užem smislu, unatoč tome što se pri pretvorbi s jedne i/ili druge strane javlja električna energija. Među takve naprave idu npr. transformatori, usmjerivači, akumulatori i baterije, uređaji za direktnu konverziju energije, itd. Postoji, međutim, čitav niz malih električnih naprava kojima nije svrha pretvaranje energije, već prenošenje podataka, analiza podataka, mjerenje ili sl., a ipak se ubrajaju u električne strojeve jer su po izvedbi i načinu rada analogni električnim strojevima za pretvorbu energije.

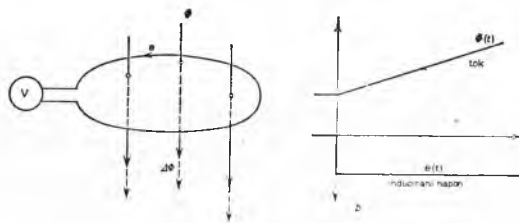
OSNOVE ELEKTRIČNIH STROJEVA

Osnovno djelovanje svih električnih strojeva svodi se na vezu između mehaničkog gibanja i mehaničkih sila, s jedne strane, i električnih napona i struja, s druge strane. Posrednik je pretvorbe u svim slučajevima magnetsko polje, bilo da je stvoreno električnim strujama bilo da je posrijedi polje permanentnog magneta.

Osnovni zakoni

Funkcioniranje električnih strojeva u najrazličitijim varijantama njihovih izvedbi osniva se na tri temeljna zakona elektrotehnike. To su: opći zakon indukcije, zakon elektromagnetskog protjecanja i zakon sile u magnetskom polju.

Opći zakon indukcije kazuje da se u zatvorenoj petlji koja obuhvaća magnetski tok Φ inducira električni napon e jednak

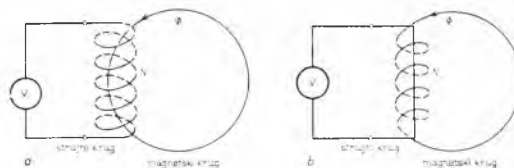


Sl. 1. Opći zakon indukcije, a Promjena magnetskog toka inducira napon u petlji koja ga obuhvaća, b inducirani napon jednak je brzini promjene toka

brzini promjene toka u petlji, a smjera takvog da bi proizveo struje koje se protive promjeni toka (sl. 1):

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

Ako petlja N puta obuhvaća isti tok (sl. 2 a) ili ako tok N puta prođe kroz istu petlju (sl. 2 b), kroz plohu koju zatvara petlja



Sl. 2. Ulančeni tok. a Namot s više (N) svojih zavoja (petlja) obuhvaća isti tok, b isti zavoj (petlju) više (N) puta obuhvaća magnetski krug

prolazi tzv. **ulančeni tok** $\Psi = N\Phi$, koji je općenito definiran izrazom

$$\Psi = \int_S B \, dS,$$

gdje je B magnetska indukcija, tj. gustoća silnica magnetskog toka, a integral se proteže na čitavu površinu S plohe omeđene promatranom petljom. Općenito dakle vrijedi

$$e_N = - \frac{d\Psi}{dt}$$

Za induciranje napona potrebna je promjena toka. Ta promjena može se izazvati na dva načina: a) tako da dio stroja u kojemu se stvara magnetski tok i petlja u kojoj se inducira napon miruju jedan u odnosu prema drugom, a mijenja se iznos toka; to se postiže tako da se mijenja bilo struja koja tok uzbuđuje bilo otpor magnetskog kruga; b) tako da se iznos toka ne mijenja, ali se mehaničkim gibanjem mijenja dio toka obuhvaćen petljom. U slučaju a) govori se o **naponu transformacije**, u slučaju b) o **naponu rotacije**. Javlja se i kombinacija napona transformacije i napona rotacije.

Često je napon rotacije lakše računati na osnovi predodžbe prema sl. 3, tj. polazeći od činjenice da je inducirani napon u vodiču proporcionalan brzini kojom vodič siječe silnice magnetskog toka. Ako je magnetska indukcija jednaka B , duljina vodiča jednaka L , a njegova brzina v , i ako se vodič kreće kroz magnetsko polje u smjeru koji je okomit na smjer njegova protezanja, a smjer silnica polja okomit je na ravninu koju čine vodič i smjer njegova