

ELEKTRIČNI VODOVI, skupovi električnih vodiča koji su jedan od drugog, od zemlje i od drugih konstruktivnih dijelova izolirani, a služe za vođenje električne struje. Oni predstavljaju prostorno ograničen medij za prijenos električne energije radi prijenosa snage ili informacija. U širem smislu, vod, kao elektromagnetski pojam, obuhvaća također antene, nehomogene vodove, vodiče u električnim uređajima, instrumentima i strojevima, namote električnih strojeva, transformatora, prigušnica i sl.

PODJELA ELEKTRIČNIH VODOVA

Električni se vodovi mogu podijeliti prema konstrukciji, prema namjeni i prema električnim karakteristikama.

Podjela električnih vodova prema konstrukciji. Električni vodovi (za prijenos energije i informacija) dijele se na nadzemne (zračne) vodove, izolirane vodove (u užem smislu) i kabele.

Nadzemni vod sastoji se od vodiča ovješnih nad zemljom (u zraku); vodiči mogu biti goli ili izolirani. Goli vodiči pričvršćuju se na stupove ili nosače s pomoću staklenih ili keramičkih izolatora. Nadzemni vod, u širem smislu, obuhvaća, pored vodiča, i sav ovjesni materijal, stupove ili nosače za zavješanje vodiča, zajedno s njihovim temeljima. Ovamo se ubrajaju nadzemni vodovi niskonaponskih mreža i dalekovodi visokonaponskih distributivnih i prenosnih mreža (v. *Dalekovodi*, TE 3, str. 136).

Izolirani vodovi (u širem smislu) mogu se podijeliti na izolirane vodove (u užem smislu) i kabele.

Izolirani vodovi (u užem smislu) upotrebljavaju se najčešće u električnim instalacijama. Vodiči u izoliranim vodovima najčešće su prevučeni izolacionim materijalima ali mogu biti i goli. Izolirani vod s izoliranim vodičima nastaje kad se vodiči obuhvate u jedan vod bilo posebnim slojevima izolacionog ili drugog materijala bilo uvlačenjem u instalacione cijevi ili kanale. Izolirani vod s golim vodičima građen je tako da se goli vodič okruglog ili profilnog presjeka odmakne s pomoću posebnih izolatora od pokrivača koji zaštićuje vodič. Zaštitni pokrivači vodiča učvršćuju se na zid ili uz zid objekta, a služe za zaštitu od slučajnog ili namjernog dodira vodiča. Vodovi s golim vodičima (obično u obliku trake) držani izolatorima sreću se u praksi pod nazivom šinski razvod (engl. bus bar).

Izolirani vodovi (u užem smislu) upotrebljavaju se uglavnom za napone do 1 kV (v. članak *Električne instalacije*, str. 1).

Kabel je izolirani električni vod koji se najčešće polaže pod zemlju ili u zemlju, ponekad i u vodu i građevine.

Teško je povući oštru granicu između kabela i drugih izoliranih vodova (izoliranih vodova u užem smislu riječi). Naročito se kabeli i vodovi izolirani gumama ili plastičnim masama mogu često jedni od drugih razlikovati samo po tome što je u konstrukciji kabela poklonjena veća pažnja zaštiti od vanjskih utjecaja. Izolirani vodovi izvede se samo za napone do 1 kV (osim vodova za instalacije svijetlećih cijevi), dok se kabeli izrađuju za niske i visoke napone. Kabeli izolirani plastičnim masama izvede se za nazivne napone do 110 kV, a kabeli s izolacijom od papira i do 500 kV.

Podjela električnih vodova prema namjeni. Prema namjeni vodovi se mogu podijeliti na vodove za prijenos snage i vodove za prijenos informacija. Za prijenos snage služe nadzemni vodovi, kabeli i drugi izolirani vodovi za električne instalacije u zgradama, na brodovima i u vozilima. U širem smislu idu ovamo i vodovi kontaktne mreže električnih željeznica. Od vodova za prijenos informacija najvažniji su *vodovi u telekomunikacijama*. Nadzemni vodovi se u telekomunikacijama napuštaju gdje god je to moguće i zamjenjuju se kabelima. Ovamo idu naročito *telefonski kabeli*. Posebnu kategoriju čine *spojni vodovi* u visokofrekventnim uređajima, telefonskim centralama, radio-uređajima, regulacionim sistemima i sl. Za visoke frekvencije do ~ 1 GHz primjenjuje se u komunikacionoj tehnici *koaksijalni* kabel, a u mikrovalnoj tehnici, npr. u radaru, upotrebljava se — obično samo pri frekvencijama višim od ~ 1 GHz — *valovod*.

Namoti električnih transformatora i strojeva moraju se promatrati kao vodovi čim treba uzeti u obzir konačnu brzinu rasprostiranja pojava; u tu kategoriju idu sva prelazna stanja.

Podjela vodova prema električnim karakteristikama razlikuje *homogene* i *nehomogene* vodove. Homogenom su vodu elektromagnetske karakteristike konstantne po cijeloj dužini, a nehomogenom vodu nisu.

V. Srb

TEORETSKE OSNOVE ELEKTRIČNIH VODOVA

Električna energija prenosi se kroz elektromagnetsko polje u dielektriku valom. Val može biti vođen iz jednog dijela prostora u drugi tako da se zatvara u šuplje vodljive cijevi, koje se zovu valovodi, ili s pomoću običnog električnog prijenosnog voda. Električni prijenosni vod, najpoznatiji konvencionalni sistem za vođenje valova, izgrađen je od dva ili više paralelnih cilindričnih vodiča, proizvoljnog ali jednolikog poprečnog presjeka, koji su razdvojeni dielektrikom.

Posebno ponašanje elektromagnetskih valova na prijenosnom vodu, tj. u neposrednoj blizini granica između dielektrika i vodiča, uvjetovano je konfiguracijom tih granica. Ono ima efekt vođenja valova duž vodiča. Pri tome se pod vođenjem valova razumijeva da je tok energije uglavnom usmjeren duž voda. Ima naravno i nekog toka energije iz polja vala u dielektriku prema metalnim vodičima koji tvore prijenosni sistem. Takvo vođenje valova po vodu moguće je u svim prijenosnim sistemima koji se odlikuju tijesnom vezom između polja vala u dielektriku i struja i naboja na vodičima. Granice između vodiča i dielektrika od primarne su važnosti u oblikovanju značajki vala koji se prenosi. Osnovni oblik prostiranja na vodu u biti je transverzalni elektromagnetski val. Takav će se val podržavati na vodu samo ako su ispunjena dva uvjeta: da postoji skup naboja koji stvara električno polje i da postoji skup struja koji stvara magnetsko polje. Oba polja su statičkog tipa u ravni normalnoj na smjer prostiranja. Stvarni vodovi imaju vodiče načinjene od tvari konačne električne vodljivosti, što ima za posljedicu da transverzalni elektromagnetski val ima, iako malu, longitudinalnu komponentu električnog polja, pa to u proračunima treba uzeti u obzir.

Analizi prijenosnih vodova može se pristupiti na dva načina: može se ili sa zadanim parametrima voda, a uz primjenu teorije polja, analizirati prostiranje valova duž voda, ili se mogu iz same konfiguracije vodiča odrediti parametri vodova slično kao u strujnim krugovima. Prvi način daje bolji uvid u procese na vodu, ali je kompliciraniji i ovdje neće biti obrađen.

Parametri električnih vodova

Promatra li se električni vod kao strujni krug, moraju se u njemu pojaviti isti parametri kao i u strujnom krugu, a to su: otpor, induktivitet i kapacitet. Osim njih postoji u vodovima još i odvod koji je uzrokovan nesavršenošću izolacije i dielektrikuma, a izražava se vodljivošću.

Zbog činjenice da se pojave na vodovima (strujni i naponski valovi) šire duž vodiča nekom doduše velikom ali ipak konačnom brzinom, parametri se vodova ne smiju promatrati kao zbijeni, koncentrirani u jednoj tački (kao što se to radi u strujnim krugovima), već kao porazdijeljeni duž voda onako kako pripadaju pojedinim kratkim odsjecima voda. Stoga se parametri vodova i izražavaju po jedinici duljine voda, npr. kao induktivitet voda po jedinici duljine.

U homogenom vodu navedena su četiri parametra (otpor, induktivitet, kapacitet i odvod) duž cijelog voda konstantni, pa se stoga zovu i *konstante voda* ili primarne konstante voda (za razliku od sekundarnih konstanti, o kojima će kasnije biti riječ).

Da bi se simboli za konstante električnih vodova razlikovali od simbolâ za (koncentrirane) parametre u strujnim krugovima, konstante vodova bit će u ovom članku označene crticom (R' , L' , C' , G'). Za homogene energetske i telekomunikacione nisko-frekventne vodove te se konstante daju u praksi obično po kilometru duljine homogenog voda.

Otpor vodiča po jedinici duljine, R' , dobije se ako se otpor R_v dovoljno kratkog odsjeka voda podijeli njegovom duljinom z_v : $R' = R_v/z_v$. Otpor vodiča ovisi o obliku i materijalu od kojeg je vodič izrađen, a osim toga još i o temperaturi, te o frekvenciji i gustoći struje koja teče tim vodom.

Utjecaj materijala, oblika i temperature na otpor vodiča. Otpor vodiča za istosmjernu struju na temperaturi 20°C izračunava se s pomoću izraza:

$$R_{20} = \varrho_{20} \frac{l}{S} = \frac{l}{\kappa S},$$

gdje ϱ_{20} znači specifični otpor (koji se daje u Ωm ili u $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$), κ specifičnu vodljivost (u S/m ili u Sm/mm^2), l duljinu vodiča a

S njegov presjek. Specifična vodljivost aluminijuma koji se primjenjuje za izradu električnih vodiča iznosi 33...35 MS/m, a bakra 57...58 MS/m.

Otpori vodiča za istosmjernu struju, naročito ako su vodiči izrađeni od čistih nelegiranih metala, mijenjaju se linearno s temperaturom u opsegu temperaturnih promjena koje se pojavljuju pri redovnom radu. Ako je poznata vrijednost otpora za istosmjernu struju na temperaturi θ_1 (npr. na 20 °C), može se omski otpor istog vodiča izračunati za bilo koju drugu temperaturu θ_2 s pomoću izraza:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{M + \theta_2}{M + \theta_1},$$

gdje M znači konstantu temperature koja ovisi o materijalu vodiča i njegovom kvalitetu. Ona iznosi npr. 234,5 °C za omekšani bakar vodljivosti 100 prema ACS (v. Bakar, TE 1, str. 658) a 228,1 °C za hladno vučeni aluminijum čistoće 99,5%.

Utjecaj temperature na otpor vodiča pri normalnim promjenama temperature u pogonu i normalnim promjenama temperature okoline nije značajan. Tako je npr. pri promjenama temperature u intervalu od $\theta_1 = -10$ °C do $\theta_2 = +40$ °C odnos otpora $R_2/R_1 = 1,21$.

Utjecaj frekvencije izmjenične struje. Otpor vodiča koji je izrađen od neferomagnetskih materijala ovisi pri izmjeničnoj struji i o njezinoj frekvenciji. Pri izmjeničnoj struji javlja se, naime, istiskivanje struje ili *skin-efekt* (v. Elektrotehnika), tj. neravnomjerna raspodjela gustoće struje u presjeku vodiča: gustoća struje najveća je u blizini vanjske površine vodiča, a opada prema njegovoj sredini. Ova pojava uzrokovana je neravnomjernim magnetskim poljem u vodiču i većim induktivnim otporom u njegovoj sredini. Otpor vodiča R_0 koji vrijedi za istosmjernu struju povećava se zbog skin-efekta prema jednadžbi

$$R_s = k_s R_0,$$

gdje je k_s koeficijent skin-efekta za otpor. Ovim su koeficijentom obuhvaćeni uvjeti pogona, frekvencija struje, materijal i oblik vodiča. Budući da je matematički prikaz tog koeficijenta složen, on se redovito uzima iz tablica u elektrotehničkim priručnicima.

Pojava istiskivanja struje to je veća što je presjek vodiča veći i što je frekvencija struje viša. Za male presjeke vodiča i pri frekvenciji struje 50 Hz povećanje otpora zbog skin-efekta malo je i može se često zanemariti. U tom se slučaju računa samo s otporom što ga vodič pruža istosmjernoj struji.

Blizinski efekt. Kad se u blizini promatranog vodiča nalazi drugi vodič kroz koji također protječe izmjenična struja, ovaj drugi vodič utječe na raspodjelu struje po presjeku prvog, te promatrani vodič ima otpor povećan iznad iznosa povećanja zbog normalnog skin-efekta. To se povećanje skin-efekta naziva blizinskim efektom. Blizinski je efekt zanemarljiv kad je razmak između osi okruglih, paralelnih vodiča jednak bar peterostrukom promjeru vodiča, ali on je značajan kad se analiziraju kabeli, naročito telefonski, jer su u njima vodiči smješteni vrlo blizu jedan drugome. Koeficijent blizinskog efekta k_b određuje se dovoljno tačno jednadžbom

$$k_b = \frac{c A \left(\frac{d}{a}\right)^2}{1 + B \left(\frac{d}{a}\right)^2},$$

gdje c znači konstantu koja uzima u obzir shemu petlje telefonskih kabela, d promjer vodiča, a razmak među osima vodiča, a A i B faktore koji se dobiju iz tablica s pomoću koeficijenta skin-efekta. Konstanta c iznosi 1 za običnu paricu (dva paralelna vodiča kružnog presjeka), 5 za zvjezdastu četvorku u osnovnom spoju, 1,6 za zvjezdastu četvorku u fantomskom spoju, 2 za udvojenju paricu u osnovnom spoju i 3,5 za udvojenju paricu u fantomskom spoju.

Utjecaj gustoće struje na otpor vodiča ispoljava se samo pri primjeni vodiča izrađenih od feromagnetskih materijala, kao što su čelik, alužel, koperveld, koji se ponekad upotrebljavaju na dalekovodima za vodiče i zaštitnu užad radi postizanja veće mehaničke čvrstoće (v. Dalekovodi, TE 3, str. 137). Do povećanja otpora takvih vodiča dolazi zbog magnetskih gubitaka koji rastu s povećanjem gustoće struje. Povećanje otpora utvrđuje se u tom slučaju s pomoću tablica ili dijagrama.

Vanjski utjecaji na otpor vodiča. Na otpor vodiča utječu i vanjski konstruktivni elementi zračnih vodova i kabela. U metalnom oklopu kojim su zaštićeni kabeli pojavljuju se struje zbog indukcije i u vezi s time gubici. Zbog te pojave povećava se otpor vodiča. Često instalacioni vodovi prolaze preko metalnih podloga, pa i one vrše sličan utjecaj kao oklop kabela. Metalne armature zračnih vodova također su sjelo gubitaka. Ovo povećanje otpora zbog konstruktivnih elemenata vodova uzima se u obzir primjenom koeficijenta vanjskih utjecaja k_k koji se dobiva iz tablica.

Sva tri utjecaja (skin-efekt, blizinski efekt i vanjski utjecaji) uzimaju se u obzir u koeficijentu povećanja otpora k_R , te je konačni otpor vodiča za izmjeničnu struju:

$$R = k_R R_0, \\ k_R = k_s + k_b + k_k,$$

gdje R_0 znači otpor za istosmjernu struju, k_R koeficijent otpora, k_s koeficijent skin-efekta, k_b koeficijent blizinskog efekta i k_k koeficijent utjecaja konstruktivnih dijelova voda, armature kabela, metalne podloge, armature voda i sl.

Odvod po jedinici duljine voda, G' , pojavljuje se zbog nesavršenosti izolacije i gubitaka u dielektrici. On predstavlja vodljivost, a mjeri se u simensima (S) po jedinici duljine voda. Sastoji se od dva dijela: od osnovnog dijela G'_0 i od dodatnog dijela G'_d :

$$G' = G'_0 + G'_d.$$

Osnovni dio odvoda, G'_0 , pojavljuje se pri prolazu istosmjerne struje kroz vod, a zbog nesavršenosti njegove izolacije, zbog koje nesavršenosti mali dio struje što teče vodom protječe poprečno kroz izolaciju. Do odvoda dolazi i pri pojavi korone. Odvod zbog nesavršenosti izolacije jednak je recipročnom iznosu izolacionog otpora R_{iz} (tj. otpora između pojedinih međusobno izoliranih vodiča istog voda), $G'_0 = 1/R_{iz}$. On je neznan u zračnim vodovima, ali je osjetan u kabelima. Telefonski kabel, npr., mora imati izolacioni otpor $R_{iz} = 10\,000\text{ M}\Omega/\text{km}$, čemu odgovara odvod $G'_0 = 10^{-18}\text{ S/m}$. Korona (v. Električna pražnjenja u plinovima, TE 3, str. 685, i Dalekovodi, TE 3, str. 158) javlja se na dalekovodima vrlo visokih napona kad dolazi do prekoračenja kritičnog napona. Pri normalnom pogonu i suhom vremenu gubici zbog korone manji su od 1 kW/km. Neki meteorološki faktori (kiša, inje, magla) povećavaju gubitke zbog korone te oni mogu postići i iznos do 50 kW/km.

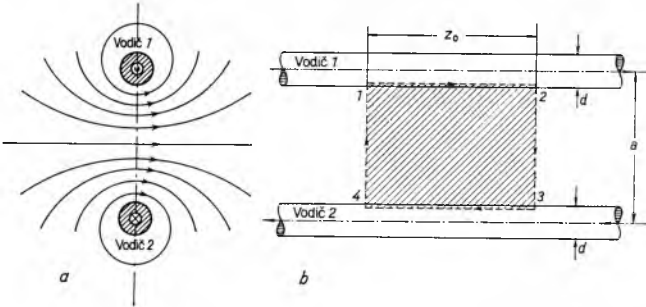
Dodatni odvod G'_d dolazi do izražaja samo pri izmjeničnoj struji kad se električno polje mijenja harmonično određenom frekvencijom. I on nastaje zbog nesavršenstva izolacije. Mjerilo za dielektrične gubitke predstavlja *faktor gubitaka*, omjer između djelatne struje I_R i jalove struje I_C , koji se izražava tangensom kuta gubitaka δ , $\tan \delta = I_R/I_C$. Kut gubitaka δ komplementni je kut kuta faznog pomaka φ : $\delta = 90^\circ - \varphi$. Dodatni odvod iznosi:

$$G'_d = \omega C' \tan \delta,$$

gdje je ω kružna frekvencija primijenjenog napona ($\omega = 2\pi f$), a C' kapacitet po jedinici duljine. U praksi je $\tan \delta$ skoro uvijek malen, pa je $\tan \delta \approx \delta$. Kut gubitaka je ovisan o jakosti električnog polja, o temperaturi i frekvenciji. Dodatni odvod ipak je najviše ovisan o frekvenciji. On za većinu dielektričnih materijala raste u početku proporcionalno s frekvencijom, a pri višim frekvencijama (reda veličine megaherca) brže nego frekvencija. Postoje neke moderne sintetske izolacije na bazi polimerâ, npr. polietilen, koje imaju praktički konstantan faktor gubitaka u vrlo širokom intervalu frekvencija. Izolacioni papir za kabele u pogledu dielektričnih gubitaka loša je izolacija, ali je njegov kut gubitaka još uvijek mali. Njegov faktor gubitaka, $\tan \delta$, iznosi 5...10% za tonske frekvencije i temperature do 60 °C. Moderne sintetske izolacije imaju $\tan \delta$ ispod 1%. Papična izolacija telefonskih kabela ima faktor gubitaka oko 2,5% za frekvenciju 500 kHz, 1,2% za 120 kHz. Faktor gubitaka u izolaciji ne uzima se u obzir pri industrijskoj i tonskoj frekvenciji (do 20 kHz) jer je u tom području frekvencija općenito malen.

Induktivitet voda po jedinici duljine, L' , ovisi u prvom redu o magnetskom toku što prolazi između vodiča, kao što je shematski prikazano na sl. 1. Induktivitet predstavlja, naime, po definiciji, omjer između struje i magnetskog toka što ga ulan-

čava dotična struja. Vodiči na toj slici čine jednu strujnu petlju promatranog električnog voda. Ta strujna petlja mora se zamisliti sastavljena po duljini voda od mnogo manjih petlji koje se promatraju svaka za sebe. Takva je manja petlja označena crtkano na sl. 1b. Šrafiranom površinom 1 2 3 4 1 što je obuhvaća ta petlja prolazi magnetski tok proizveden od struje petlje i strujâ susjednih petlji koje pripadaju drugim vodovima. Induktivitet promatranog električnog voda uključuje samo magnetski tok vlastite struje i vrtložnih struja što ih inducira struja promatranog voda u vodičima okoliša, u armaturama, u terenu i u vodljivoj podlozi. Te vrtložne struje sa svoje strane proizvode magnetsko polje suprotno polju primarne struje u vodu i stoga djeluju tako da je induktivitet voda nešto smanjen prema iznosu kad njih ne bi bilo. Magnetski tok susjednih vodova kroz promatranu petlju na sl. 1 b izražava se međuinduktivitetom.



Sl. 1. Magnetski tok (a) i strujna petlja (b) električnog voda s dva vodiča

Tako definirani induktivitet po jedinici duljine voda zove se još i *vanjski induktivitet*. Pored njega postoji još i *unutarnji induktivitet* koji ovisi o magnetskom toku čije silnice prolaze samim vodičima promatranog voda. Raspored magnetskog polja unutar vodiča ovisan je o skin-efektu. Što je jače izražena ta pojava to je manji magnetski tok kroz vodič, a to je manji i unutarnji induktivitet. Udio unutarnjeg induktiviteta postaje veći kad su vodiči smješteni blizu jedan drugome kao u kabelima, a zanemarljiva je iznosa u nadzemnim vodovima. Skin-efekt ima utjecaja i na vanjski induktivitet, što se naročito primjećuje kad su vodiči blizu jedan drugome.

Unutarnji induktivitet L_u' nije ovisan o dimenzijama presjeka vodiča. Njegov tačan iznos slijedi iz proračuna skin-efekta i blizinskog efekta. On se izražava jednačbom

$$L_u' = \mu_0 k_u \cdot 10^{-9}.$$

Tu je $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m i k_u koeficijent unutarnjeg induktiviteta. Koeficijent k_u je ovisan o konstanti vodiča upotrijebljenoj u proračunu skin-efekta, a dobiva se iz tablica. Ukupni je induktivitet jednak zbroju vanjskog i unutarnjeg induktiviteta:

$$L' = L_v' + L_u'.$$

Vanjski je induktivitet vezan za kapacitet voda odnosom

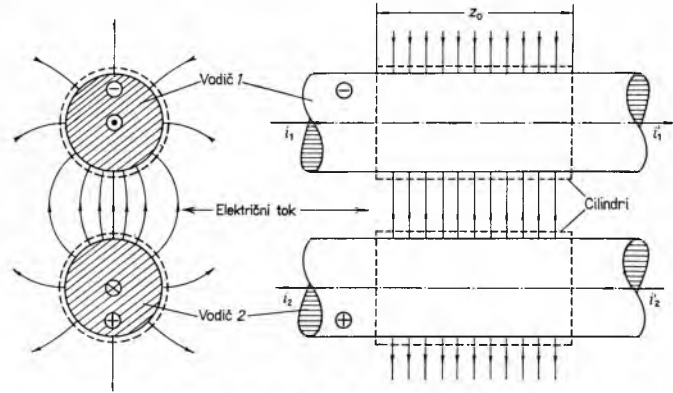
$$L_v' C' = \frac{\epsilon_r}{c_0^2}, \quad (1)$$

gdje je $c_0 = 3 \cdot 10^8$ m/s brzina svjetla u praznom prostoru, ϵ_r relativna dielektričnost sredine (izolatora) koji ispunja prostor između vodiča električnog voda ($\epsilon_r = 1$ za uzduh). Prednji odnos izlazi iz teorije elektromagnetskog polja i teorije rasprostiranja valova. Prema jedn. (1) određivanje vanjskog induktiviteta svodi se na određivanje kapaciteta električnog voda. Visokona-ponski nadzemni vod za prijenos energije ima induktivitet $\sim 1,3$ mH/km, telefonski zračni vod $\sim 1,7$ mH/km, a telefonski kabel $\sim 0,6$ mH/km.

Metalni plašt kabla i metalna podloga instalacionih vodova utječu na oba induktiviteta.

Kapacitet voda po jedinici duljine, C' . Električni tok ili tok silnica električnog polja između dva vodiča upravo je razmjernan naponu između njih; faktor razmjernosti je kapacitet između ta dva vodiča. Ukupni tok električnih silnica kroz neku zatvorenu plohu jednak je ukupnom naboju u prostoru koji zatvara

ta ploha. Na sl. 2. shematski je prikazan odsječak voda. Vodičar obuhvaćen je jednim cilindrom dužine z_0 . Na vodiču, unut 1 crtkano prikazanog cilindra, nalazi se neki određeni električni



Sl. 2. Električni tok dvožilnog voda

naboj koji je razmjernan naponu između toga vodiča i ostalih vodiča, što se izražava kapacitetom. Slično je i s vodičem 2. Naboj na svakom pojedinom vodiču nastaje induktivnim djelovanjem svih ostalih vodiča u susjedstvu. Vodiči su međusobno povezani električnim tokom. Iznos toka između dva vodiča mjerodavan je za iznos naboja na prvom vodiču koji je nastao utjecajem drugog vodiča. Na sl. 3. prikazano je nekoliko vodiča s električnim tokom između njih. Potencijali $V_1, \dots, V_n$ svakog po jedinog vodiča nastali su međusobnim djelovanjem svih vodiča, što se izražava jednačbom:

$$V_k = a_{k1} Q_1 + a_{k2} Q_2 + \dots + a_{kk} Q_k + \dots + a_{kn} Q_n,$$

gdje V_k označuje potencijal k -tog vodiča, $Q_1, Q_2, \dots, Q_k, \dots, Q_n$ električne naboje pojedinih vodiča uključivo i Q_k promatranog k -tog vodiča,

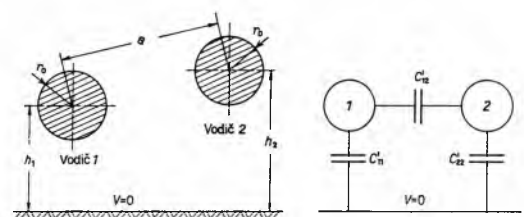
$a_{k1}, a_{k2}, \dots, a_{kk}, \dots, a_{kn}$ tzv. *potencijalne koeficijente*, koji ovise o međusobnom prostornom razmještanju vodiča, a neovisni su o naboju. Iz jednačbi potencijala slijede jednačbe naboja:

$$Q_k = b_{k1} V_1 + b_{k2} V_2 + \dots + b_{kk} V_k + \dots + b_{kn} V_n.$$

Tu su $b_{k1}, b_{k2}, \dots, b_{kk}, \dots, b_{kn}$ tzv. *kapacitivni koeficijenti*. Svi su potencijalni koeficijenti pozitivni, a od kapacitivnih su b_{kk} pozitivni a svi ostali negativni. Naboj k -toga vodiča izražava se po definiciji kapacitetima

$$Q_k = C_{k1}(V_k - V_1) + C_{k2}(V_k - V_2) + \dots + C_{kk} V_k + \dots + C_{kn}(V_k - V_n).$$

Tu su $(V_k - V_1), (V_k - V_2), \dots, (V_k - V_n)$ razlike potencijala ili električni naponi između pojedinih vodiča i promatranog k -tog vodiča, V_k potencijal k -tog vodiča računat prema tački nultoga potencijala, $C_{kk} = b_{k1} + b_{k2} + \dots + b_{kk} + \dots + b_{kn}$ je vlastiti kapacitet k -tog vodiča, a $C_{k1} = -b_{k1}, C_{k2} = -b_{k2}, \dots, C_{kn} = -b_{kn}$ međukapaciteti između promatranog k -tog vodiča i



Sl. 4. Kapaciteti dvožilnog voda

svakog pojedinog susjednog vodiča, kapaciteti C_{k1} , C_{k2} , C_{kk} , C_{kn} zovu se *parcijalni kapaciteti*. Njihovo je uvođenje potrebno čim se radi o više vodiča koji utječu svojim nabojima jedan na drugi. Parcijalni kapaciteti su konstante koje imaju dimenzije kapaciteta. Kad su poznati parcijalni kapaciteti, mogu se analizirati sva pogonska stanja. Na sl. 4 prikazan je vod sa dva vodiča iznad zemlje. Ovdje je zemlja dobar vodič i na nultom potencijalu, $V = 0$. Parcijalni kapaciteti po jedinici duljine iznose s veličinama iz slike

$$\begin{aligned} C'_{12} &= C'_{21} = \epsilon_r K_0 \frac{x_0}{x_1 x_2 - x_0^2} \\ C'_{11} &= \epsilon_r K_0 \frac{x_2 - x_0}{x_1 x_2 - x_0^2}, \\ C'_{22} &= \epsilon_r K_0 \frac{x_1 - x_0}{x_1 x_2 - x_0^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

gdje znači:

$$x_0 = \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{4 h_1 h_2}{a^2} \right), \quad x_1 = \ln \frac{2 h_1}{r_0}, \quad x_2 = \ln \frac{2 h_2}{r_0},$$

K_0 je dimenziona konstanta ($K_0 = 2 \pi \epsilon_0$), ϵ_r = relativna dielektričnost izolatora oko vodiča (za uzduh je $\epsilon_r = 1$).

Pogonski kapacitet zove se nadomjesni kapacitet pri određenoj vrsti pogona. On iznosi npr. za uobičajen pogon kad su vodiči 1 i 2 svaki na svom potencijalu i kad među njima vlada napon $u = V_1 - V_2$

$$C_p' = C'_{12} + \frac{C'_{11} \cdot C'_{22}}{C'_{11} + C'_{22}}.$$

Kad su vodiči 1 i 2 na istom potencijalu, vrijedi:

$$C_p' = C'_{11} + C'_{22}.$$

Ako je vodič 2 na nultom potencijalu, a vodič 1 na potencijalu $V_1 \neq 0$, izraz za pogonski kapacitet glasi:

$$C_p' = C'_{11} + C'_{12}.$$

C'_{11} , C'_{12} i C'_{22} su parcijalni kapaciteti iz izraza (2).

Tablica 1

POGONSKI KAPACITETI RAZLIČNIH VRSTA VODOVA

Vrsta kabela	Pogonski kapacitet nF/km
10 kV-ni trofazni kabel, papirom izoliran, dielektričnosti izolacije 3,7	300...900
35 kV-ni trofazni kabel, papirom izoliran, fazni vodiči zaslonjeni	180...370
trofazni, visokonaponski, prijenosni vodovi u uzduhu	8...10
parica telefonskog kabela s papirnom izolacijom	40...50
parica međunarodnog telefonskog kabela	23...35
parica zračnog telefonskog voda	5,5

Pogonski vanjski induktivitet slijedi iz pogonskog kapaciteta prema izrazu (1)

$$L'_{vp} = \frac{\epsilon_r}{c_0^2 C_p'}.$$

Da se vidi red veličine, navedeno je u tabl. 1 nekoliko pogonskih kapaciteta po kilometru dužine.

Jednadžbe voda

Jednadžbe voda služe za proračun napona i struje bilo na kojem mjestu voda i bilo pri kojem pogonskom stanju. Električni vod je sistem vodiča koji se može proučavati s pomoću teorije polja ili s pomoću teorije strujnih krugova. Za proučavanje elektromagnetskih polja tipični su vektori polja, a naponi i struje tipične su veličine pri proučavanju strujnih krugova. Teorija polja

da je fizikalno bolji uvid u procese na vodu i omogućuje detaljniji ulazak u pojedine pojave, teorija strujnih krugova je, međutim, pristupačnija i prikladnija za praktičan rad. Električni vod može da se promatra kao strujni krug samo ako se pretpostavi da na njemu vlada stacionarno stanje i da se pojave na njegovoj cijeloj duljini događaju istodobno. Takva je pretpostavka dozvoljena samo u slučaju kad je vod u električnom smislu dovoljno kratak. Za procjenu da li je neki vod dug ili kratak služi valna duljina valova koji se šire po njemu, $\lambda = c/f$, gdje c znači brzinu širenja elektromagnetskih valova u sredstvu koje ispunjava promatrani sistem, a f radnu frekvenciju. Da bi se sistem nekog voda smio promatrati statički, moraju njegove uzdužne dimenzije biti znatno manje (npr. $\sim 1\%$) od pripadne valne duljine. Takav se vod zove *kratki vod*. Vodovi koji su duži od toga zovu se *dugi vodovi*. Industrijskoj frekvenciji 50 Hz odgovara u uzduhu valna duljina ~ 6000 km, pa bi gornja granica za kratki vod u tom slučaju bila 60 km. Za visoku frekvenciju 1 MHz ta je granična duljina 3 m.

U teoriji vodova promatra se samo vrlo kratak odsječak voda i utvrđuje stanje u nekom poprečnom presjeku u kome su slike električnog i magnetskog polja statične, pa stoga u većini slučajeva nije ni važno da li postoji pretpostavljena istodobnost pojava duž voda. Teorija vodova polazi također od toga da je dugi vod sastavljen od većeg broja kratkih vodova.

Kratki vod čini, dakle, osnovu za proučavanje električnih vodova. Nadzemni vod za prijenos energije pri 50 Hz ulazi, kako je već spomenuto, u kategoriju kratkih vodova ako mu je duljina ispod 60 km. Međutim, brzina širenja elektromagnetskih valova nije na svim vrstama vodova jednaka brzini svjetla c_0 ($= 3 \cdot 10^8$ m/s). Ona iznosi, naime, $c = c_0/\sqrt{\epsilon_r}$, tj. ona je obrnuto razmjerna kvadratnom korijenu iz relativne dielektričnosti medija koji okružuje vodiče voda. Prema tome je, npr., granica između kratkog i dugog voda za energetske kabele koji radi pri istoj frekvenciji kao nadzemni vod (50 Hz) već pri 32 km, jer brzina širenja elektromagnetskih valova na njemu iznosi samo $1,6 \cdot 10^8$ m/s. Kratki kabele tonske frekvencije u telefoniji doseže najviše ~ 3 km.

Neka je duljina kratkog voda z_0 (v. sl. 1). Stanje napona dobije se ako se na vod primijeni Faradayev zakon o elektromagnetskoj indukciji i drugi Kirchhoffov zakon. Pretpostavlja se da je jakost struje duž voda konstantna. Pad napona na vodu iznosi

$$u_g - u_t = E_0 z_0 + L_v' z_0 \frac{di}{dt}.$$

Tu je u_g napon na generatorskoj strani voda, u_t napon voda na strani tereta i $E_0 = R' i + L_u' \frac{di}{dt}$ pad napona u vodičima po jedinici duljine voda, L_v' vanjski i L_u' unutarnji induktivitet po jedinici duljine. Budući da se govori o ukupnom induktivitetu $L' = L_v' + L_u'$, pad napona na vodu iznosi

$$u_g - u_t = z_0 R' i + z_0 L' \frac{di}{dt}.$$

Vodičima teku iste struje $i_1 = -i_2 = i_g, i_1' = -i_2' = i_t$ (v. sl. 2). Pretpostavlja se da je napon voda konstantan po cijeloj duljini. Primjenom zakona o konzervaciji električnog naboja i prvog Kirchhoffovog zakona dobiva se da je gubitak struje u vodu

$$i_g - i_t = z_0 G' u + z_0 C' \frac{du}{dt}.$$

Ovdje je i_g struja voda na generatorskom kraju i i_t struja voda na kraju tereta.

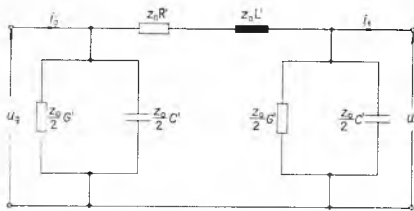
Električni vod ima dva kraja. Kako se njime prenosi energija, krajevi se voda označavaju prema smjeru prijenosa energije. Energija ide od generatora prema teretu. Zato se jedan kraj voda zove *generatorski kraj*, a drugi je *kraj tereta*.

Jednadžbe napona i struje pokazuju da se kratki vod smije prikazati shematski kao strujni krug koncentriranih elemenata otpora $z_0 R'$, induktiviteta $z_0 L'$, odvoda $z_0 G'$ i kapaciteta $z_0 C'$. Četveropol strujnih krugova ima slične karakteristike kao što su ove opisane za kratki vod. Zato je na sl. 5 prikazan kratki vod shematski kao četveropol. Dvije od njegovih vezaljki pripadaju generatoru napona u_g i struje i_g , a dvije teretu napona u_t i struje i_t . Elementi odvoda i kapaciteta prepolovljeni su, te je jedna polovica stavljena na stranu generatora, a druga polovica

na stranu tereta. Primjena Jouleova zakona daje bilansu energije na vodu. Struja i i napon u jesu prosječne veličine: $i = (i_g + i_t)/2$, $u = (u_g + u_t)/2$. Generator daje snagu P_g , a teret troši snagu P_t . Gubitak snage slijedi tada iz jednadžbi napona i struje:

$$P_g - P_t = u_g i_g - u_t i_t = z_0 (R' i^2 + G' u^2) + z_0 \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L' i^2 + \frac{1}{2} C' u^2 \right).$$

Tu je $z_0 R' i^2$ gubitak energije u otporu vodiča voda, $z_0 G' u^2$ gubitak energije u izolaciji među vodičima, $\frac{1}{2} C' u^2 z_0$ energija akumulirana u električnom polju voda i $\frac{1}{2} L' i^2 z_0$ energija akumulirana u magnetskom polju voda.



Sl. 5. Nadomjesna shema kratkog voda

Jednadžbe napona, struje i energije osnovne su jednadžbe električnih vodova.

Ako vodom teče istosmjerna struja, otpadaju vremenske derivacije. Najčešći su stacionarni pogoni sa sinusoidnim strujama i naponima određene frekvencije. Najlakše se računa s njima ako se primijene kompleksni brojevi. Dovoljno se tačno dobivaju napon U_g i struja I_g generatora, ako su zadani naponi U_t i struja I_t tereta, s pomoću jednadžbi

$$U_g = U_t + z_0 Z' I_t, \\ I_g = I_t + z_0 Y' U_t,$$

gdje je $Z' = R' + j\omega L'$ impedancija voda po jedinici duljine a $Y' = G' + j\omega C'$ admitancija voda po jedinici duljine.

Kao primjer neka posluži prijenos energije trofaznim kabelom. Napon na teretu je 30 kV među fazama i jakost struje 250 A po fazi kod 50 Hz. Struja tereta zaostaje fazno 37° za naponom. Teret troši prividnu snagu od 13 000 kVA. Kabel je dug 30 km. Konstante kabela iznose $R' = 0,165 \Omega/\text{km}$, $\omega L' = 0,103 \Omega/\text{km}$, $\omega C' = 77 \mu\text{S}/\text{km}$, odvod je zanemaren. Napon generatora mora iznositi 32,6 kV s faznim zaostajanjem od $0,4^\circ$ za naponom tereta. Struja generatora po fazi iznosi 228 A uz fazno zaostajanje od $28,4^\circ$ iza napona generatora. Utjecaj velikog kapaciteta kabela osjeća se na velikoj razlici struje tereta i generatora. Takva razlika ne postoji u zračnih vodova.

Dugi vod ima duljinu reda veličine duljine vala. Jednadžbe dugog voda izvode se iz jednadžbi za kratki vod time što se pusti da duljina voda z_0 postane toliko malena da razlika napona na vodu dobiva diferencijalni karakter

$$\lim_{z_0 \rightarrow 0} \frac{u_t - u_g}{z_0} = \frac{\partial u}{\partial z}, \quad \lim_{z_0 \rightarrow 0} \frac{i_t - i_g}{z_0} = \frac{\partial i}{\partial z}.$$

Na dugom su vodu struja i napon ovisni o vremenu i mjestu na vodu. Naponska i strujna jednadžba u diferencijalnom obliku glase:

$$-\frac{\partial u}{\partial z} = E_0 + L' \frac{\partial i}{\partial t}, \quad (3)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial z} = G' u + C' \frac{\partial u}{\partial t}. \quad (4)$$

Tu je opet $E_0 = R' i + L' \frac{\partial i}{\partial t}$, tj. toliki je pad napona u vodičima po jedinici duljine voda. Običaj je da se naponska jednadžba (3) piše u ovom obliku:

$$-\frac{\partial u}{\partial z} = R' i + L' \frac{\partial i}{\partial t}. \quad (5)$$

U stacionarnom su pogonu naponi i struje vrlo često sinusoidni. Proučavanje vodova sa sinusoidnim naponima i strujama jednostavno je, a ono omogućuje i analizu vodova pri različitim frekvencijama. Ponašanje voda kad su naponi i struje neharmoničke veličine može se također utvrditi ovom metodom ako se te

veličine rastave na više sinusoidnih veličina različitih frekvencija. Rješenje diferencijalnih jednadžbi (4) i (5) uz primjenu kompleksnih veličina glasi

$$U = U_1 e^{\gamma z} + U_2 e^{-\gamma z}, \quad (6)$$

$$I = -\frac{U_1}{Z_v} e^{\gamma z} + \frac{U_2}{Z_v} e^{-\gamma z}.$$

Tu su U_1 i U_2 integracione konstante koje se dobiju iz graničnih uvjeta, γ konstanta prostiranja ili valna konstanta, Z_v valna ili karakteristična impedancija (otpornost) voda, a z je koordinata voda od generatora prema teretu. Konstanta prostiranja jest

$$\gamma = +\sqrt{Z' Y'} = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')}, \quad (7)$$

a valna impedancija:

$$Z_v = \sqrt{\frac{Z'}{Y'}} = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}}. \quad (8)$$

Ovo rješenje omogućuje da se analizira i prikaže bilo koji slučaj pogona homogenog električnog voda. Konstanta prostiranja γ ima kompleksni karakter, te se prikazuje najbolje u kompleksnom obliku:

$$\gamma = \alpha + j\beta. \quad (9)$$

U prednjem izrazu zove se *a* prigušna konstanta i iznosi:

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{|Z'| \cdot |Y'| - (\omega^2 L' C' - R' G')}, \quad (10)$$

a β fazna konstanta (pomak faze po jedinici duljine voda) i iznosi:

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{|Z'| \cdot |Y'| - (\omega^2 L' C' - R' G')}, \quad (11)$$

gdje je $|Z'| = \sqrt{R'^2 + \omega^2 L'^2}$ impedancija voda (apsolutni iznos) i $|Y'| = \sqrt{G'^2 + \omega^2 C'^2}$ admitancija voda (apsolutni iznos). Jednako se može i valna impedancija prikazati u kompleksnom obliku:

$$Z_v = |Z_v| e^{j\varphi_v},$$

$$|Z_v|^2 = \frac{|Z'|}{|Y'|},$$

$$\tan \varphi_v = \frac{\omega L' \alpha - R' \beta}{\omega L' \beta + R' \alpha}.$$

Konstanta prostiranja γ i valna impedancija Z_v zovu se *sekundarne konstante voda*. One omogućuju bolji uvid u ponašanje voda.

Val napona i struje na vodu sastoji se općenito od dva vala. Pozitivni se val giblje od generatora prema teretu, u pozitivnom smjeru od z , a negativni val obrnuto. Fazna brzina (brzina kojom se faza vala, npr. njegov čvor, širi duž voda) iznosi za pozitivni, odnosno negativni val:

$$v = \pm \frac{\omega}{\beta},$$

a duljina vala je zadana jednadžbom $\lambda = v/f$, gdje f znači frekvenciju.

Neki karakteristični dugi vodovi. U nekim karakterističnim slučajevima mogu se jednadžbe za pojedine sekundarne konstante voda (7) do (11) pojednostavniti ili neke veličine u njima zanemariti, što je prikladno za praktičnu primjenu. U nastavku je navedeno nekoliko takvih slučajeva.

Vod bez gubitaka. U njemu su $R' = 0$, $G' = 0$ i $\alpha = 0$, pa stoga vrijedi:

$$\alpha = 0, \quad \beta = \omega \sqrt{L' C'} = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda},$$

$$Z_v = \sqrt{\frac{L'}{C'}}, \quad \varphi_v = 0.$$

Vod za istosmjernu struju. U tom je slučaju $\omega = 0$, pa jednadžbe glase:

$$\alpha = \sqrt{R' G'}, \quad \beta = 0,$$

$$Z_v = \sqrt{\frac{R'}{G'}}, \quad \varphi_v = 0.$$

Vod malih gubitaka ili visoke frekvencije. U tom je slučaju: $\frac{R'}{\omega L'} \ll 1$ i $\frac{G'}{\omega C'} \ll 1$, pa jednadžbe glase:

$$\alpha = \frac{R'}{2} \sqrt{\frac{C'}{L'}} + \frac{G'}{2} \sqrt{\frac{L'}{C'}}, \quad \beta = \omega \sqrt{L' C'}$$

$$Z_v = \sqrt{\frac{L'}{C'}}, \quad \varphi_v = 0.$$

Vod bez distorzije. U tom je slučaju $R/L = G/C$ pa vrijedi:

$$\alpha = \sqrt{R'G'}, \quad \beta = \omega \sqrt{L'C'},$$

$$Z_v = \sqrt{\frac{L'}{C'}}, \quad \varphi_v = 0.$$

Kabel pri tonskoj frekvenciji $f = 800$ Hz. U tom slučaju iznosi $G' = \omega L' = 0$, pa vrijedi $\alpha = \beta = \sqrt{\frac{1}{2} \omega R' C'}$,

$$|Z_v| = \sqrt{\frac{R'}{\omega C'}}, \quad \varphi_v = -45^\circ.$$

Refleksije u vodovima. U izrazu (6) negativni val zove se još i reflektirani val. Refleksija nastaje zbog nepravilnog prilagođivanja tereta na vod. Ako je duljina voda z_0 , faktor refleksije (omjer amplituda polaznog i reflektiranog vala) definira se u kompleksnom obliku kao

$$r = \frac{U_1 e^{j\gamma z_0}}{U_2 e^{j\gamma z_0}} = |r| \cdot e^{j\psi}.$$

On se određuje iz tereta na kraju voda. Teret se zadaje impedancijom Z_t , te je faktor refleksije

$$r = \frac{Z_t - Z_v}{Z_t + Z_v}.$$

Refleksije nema kad je impedancija tereta Z_t jednaka valnoj impedanciji Z_v . Takav se teret u tehnici prijenosa energije zove *prirodni teret*. U signalnoj i komunikacionoj tehnici uvijek se teži tome da nema refleksije. To se postiže prilagođenjem tereta valnoj impedanciji. Zbog refleksije napon i struja nisu jednako raspoređeni po vodu. Ako se uvede mjerenje udaljenosti na vodu od tereta, $s = z_0 - z$, jednostavnije se prikazuje mijenjanje napona i struje po vodu. Napon i struja se mijenjaju harmonički istom frekvencijom na bilo kome mjestu na vodu, ali tjemeni iznos se mijenja duž voda. Tjemeni iznosi napona U_{ms} i struja I_{ms} mijenjaju se duž voda prema jednadžbama

$$U_{ms} = U_{zm} \cdot K_u,$$

$$I_{ms} = \frac{U_{zm}}{Z_v} K_i,$$

gdje je

$$K_u^2 = 1 + |r|^2 + 2|r| \cos \left(\psi - 4\pi \frac{s}{\lambda} \right),$$

$$K_i^2 = 1 + |r|^2 - 2|r| \cos \left(\psi - 4\pi \frac{s}{\lambda} \right).$$

Tu je U_{zm} tjemeni iznos pozitivnog vala. U ovim jednadžbama zanemareno je prigušenje. Napon i struja na vodu mijenjaju se između najvećeg iznosa $(1 + |r|)$ i najmanjeg iznosa $(1 - |r|)$. Maksimum i minimum su razmaknuti na vodu za $\lambda/4$, četvrtinu duljine vala. Prvi minimum udaljen je za $s_0 = \lambda (\psi - \pi)/(4\pi)$ od tereta. Omjer između najvećeg iznosa napona ili struje i najmanjeg iznosa napona ili struje, $S = (1 + |r|)/(1 - |r|)$, pokazuje kolike su njihove najveće moguće promjene. Prazni hod i kratki spoj ekstremni su tereti na vodu. Impedancija tereta je pri praznom hodu beskonačna, a pri kratkom spoju nula; faktor refleksije je u oba slučaja jednak jedinici. Najveći napon nastupa na kraju voda u praznom hodu. Najveća promjenljivost napona i struje nastaje u praznom hodu i kratkom spoju voda. Na sl. 6 prikazan je raspored relativnog napona U_{ms}/U_{zm} na vodu bez gubitaka čija je duljina jednaka duljini vala λ . Navedeno je pet različitih tereta: kratki spoj ($Z_t/Z_v = 0$), polovina valnog otpora ($Z_t/Z_v = \frac{1}{2}$), dvostruki valni otpor ($Z_t/Z_v = 2$),

prazni hod ($Z_t/Z_v = \infty$) i pravilno prilagođenje ($Z_t/Z_v = 1$, prirodni teret).

Obično su poznati uvjeti tereta na kraju voda, pa odatle treba ustanoviti stanje na generatorskoj strani. Opće rješenje jednadžbi voda daje rješenje za taj slučaj. Jednadžbe za napon i struju na generatorskoj strani glase:

$$U_g = U_t \cosh \gamma z_0 + Z_v I_t \sinh \gamma z_0, \quad (12)$$

$$I_g = I_t \cosh \gamma z_0 + \frac{U_t}{Z_v} \sinh \gamma z_0, \quad (13)$$

gdje je U_t napon tereta, I_t struja tereta i z_0 duljina voda. Impedancija na početku voda prikazuje se jednostavno za vod bez gubitaka pri praznom hodu i kratkom spoju na njegovu kraju:

$$Z_0 = -j Z_v \cot \left(2\pi \frac{z_0}{\lambda} \right) \text{ za prazni hod,}$$

$$Z_k = j Z_v \tan \left(2\pi \frac{z_0}{\lambda} \right) \text{ za kratki spoj.}$$

Kad je duljina voda manja od četvrtine vala, vod djeluje na generatorskoj strani kapacitivno u praznom hodu, a induktivno u kratkom spoju.

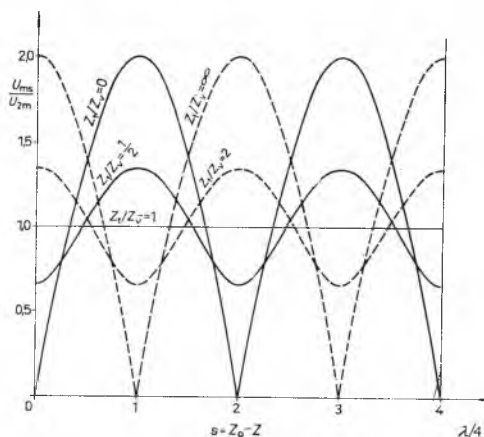
Trofazni dalekovod 220 kV, 50 Hz, dug je 320 km, a ima konstante $R' = 0,077 \Omega/\text{km}$, $\omega L' = 0,4 \Omega/\text{km}$, $\omega C' = 2,8 \mu\text{S}/\text{km}$, $G' = 0$. To je vod malih gubitaka, te je valna impedancija $Z_v = 378 \Omega$ bez faznog pomaka, a prigušna konstanta $\alpha = 1,02 \cdot 10^{-4} \text{ Np}/\text{km}$ i fazna konstanta $\beta = 2\pi/\lambda$ (u radijanima) uz $\lambda \approx 6000 \text{ km}$. Vod u praznom hodu djeluje kapacitivno kao kapacitivna reaktancija od $2,88 Z_v = 1090 \Omega$.

Pokus praznog hoda i kratkog spoja voda služi za to da se odrede konstante voda, valna konstanta i valna impedancija. Pokusom se ustanovi impedancija u praznom hodu Z_0 i u kratkom spoju Z_k , te se iz njih izračunaju konstanta prostiranja γ i valna impedancija Z_v s pomoću relacija

$$e^{2\gamma z_0} = \frac{1 + \sqrt{\frac{Z_k}{Z_0}}}{1 - \sqrt{\frac{Z_k}{Z_0}}},$$

$$Z_v = \sqrt{Z_0 Z_k}.$$

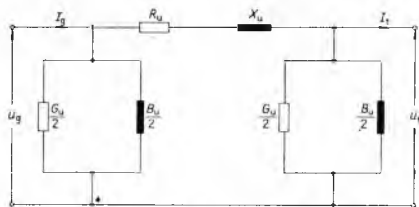
Električni vodovi imaju i na generatorskoj strani i na strani tereta priključene uređaje koje treba uzeti u obzir pri određivanju stanja. Zato se vod mora prikazati četveropolom (v. *Električni krugovi*, str. 62), te se tako može pribrajati ostalim četveropolima koji prikazuju uređaje priključene na vod. Na taj se način dobiju i odnosi na dugom vodu iz odnosa na kratkom vodu. Dugi vod se rastavi na dovoljan broj kratkih vodova koji se prikazuju četveropolom kao na sl. 5. Niz jednakih, simetričnih četveropola sačinjava »lančanik«. Dugi se vod prikazuje kao lančanik. Takav način prikazivanja ima prednost ako se u vod uključuju različiti uređaji zbog poboljšanja prijenosa kao što je to npr. pri pupinizaciji telekomunikacionih vodova (v. str. 248).



Sl. 6. Raspored relativnih napona (U_{ms}/U_{zm}) na vodu bez gubitaka za različite terete Z_t/Z_v

Jednadžbe voda, sa zadanim naponom i strujom tereta, već su pisane u izrazima (12) i (13) kao što se pišu jednadžbe za če-

tveropol. Nadomjesni četveropol za dugi vod prikazan je na sl. 7. To je simetrični četveropol jer se radi o homogenomvodu.



Sl. 7. Nadomjesni četveropol za dugi vod

Jednadžba za uzdužnu impedanciju i poprečnu admitanciju glase:

$$Z_u = Z_v \sinh \gamma z_0,$$

$$\frac{1}{2} Y_u = \frac{1}{Z_v} \frac{\cosh \gamma z_0 - 1}{\sinh \gamma z_0}.$$

Uzdužna impedancija Z_u može se rastaviti na otpor i reaktanciju, a poprečna admitancija Y_u na odvod i susceptanciju, kao što je to prikazano na sl. 7.

$$\frac{R_u}{Z_v} = \sinh \alpha z_0 \cos \left(2\pi \frac{z_0}{\lambda} \right), \quad (14)$$

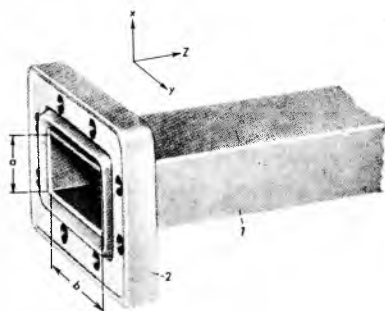
$$\frac{X_u}{Z_v} = \cosh \alpha z_0 \sin \left(2\pi \frac{z_0}{\lambda} \right), \quad (15)$$

$$\frac{G_u}{Y_v} = \frac{2 \sinh \alpha z_0}{\cosh \alpha z_0 + \cos \left(2\pi \frac{z_0}{\lambda} \right)}, \quad \frac{B_u}{Y_v} = \frac{2 \sin \left(2\pi \frac{z_0}{\lambda} \right)}{\cosh \alpha z_0 + \cos \left(2\pi \frac{z_0}{\lambda} \right)}.$$

Ovdje su Z_v i Y_v valna impedancija i admitancija predviđene za vod malih gubitaka. Iste jednadžbe su valjane i za vod većih gubitaka, samo se ukupni iznosi elemenata četveropola nešto mijenjaju. Jednadžbe (14) i (15) ujedno pokazuju da četveropol ne nadomješta vod suštinski ili fizikalno, nego samo računski, jer prema njima postoji mogućnost da uzdužni otpor R_u poprimi negativni iznos, što nema fizikalnog smisla. Navedene jednadžbe za elemente četveropola prelaze u elemente za kratki vod prema sl. 6 ako je duljina voda z_0 dovoljno malena.

Trofazni dalekovod 220 kV, 50 Hz, malo prije zadan, ima ukupno prigušenje $\alpha z_0 = 0,0326$ Np i ukupni pomak faze $\beta z_0 = 2\pi z_0/\lambda = 19,2^\circ$. Zato su elementi četveropola $R_u = 11,6 \Omega$, $X_u = 124 \Omega$, $G_u = 0,089$ mS, $B_u = -0,893$ mS.

Valovod je poseban oblik električnog voda kojemu nisu osnova vodiči kroz koje protječe struja tereta ili generatora, već vođenju i zasljanjanju elektromagnetskog polja služe njegove vodljive stijenke. Električna se energija prenosi u valovodima elektromagnetskim poljem, kao i u prenosnim vodovima, ali ne vodičem. Metalne stijenke valovoda (cijevi presjeka, najčešće,



Sl. 8. Valovod pravokutnog oblika (1) prirubnicom (2)

pravokutnog ili kružnog) sprečavaju elektromagnetsko polje da prođe u vanjski prostor i prisiljavaju elektromagnetski val da se rasprostire uzduž osi valovoda u cik-cak liniji, reflektirajući se od stijenke do stijenke. Stijenke moraju biti glatke i dobro vodljive, kako bi refleksija vala bila što bliža idealnoj. Budući

da stijenke nisu idealno vodljive, u njima se javljaju gubici, koji su uzrokom prigušenja vala. Prigušenje je u valovodu znatno manje nego u običnim vodovima, što mu je velika prednost. Ipak se valovodi ne mogu široko primjenjivati, jer je duljina vodenog elektromagnetskog vala vezana za dimenzije valovoda. Oni se primjenjuju samo za valne duljine od ~ 20 cm do nekoliko milimetara.

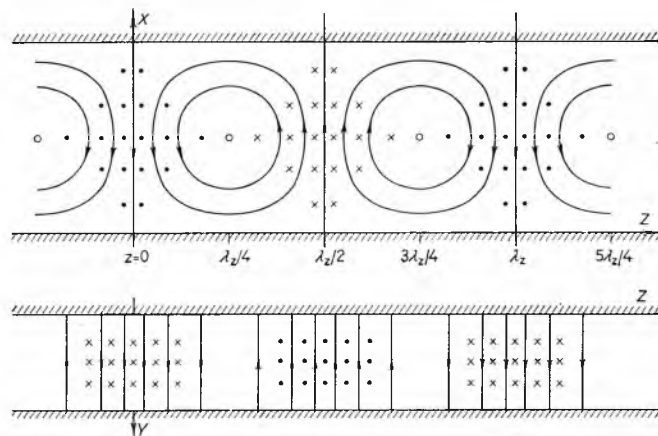
Na sl. 8. prikazan je valovod pravokutnog presjeka. Presjek se nalazi u ravnini $X-Y$ pravokutnog koordinatnog sistema, a os cijevi se podudara s osi Z . Val se rasprostire u pozitivnom smjeru osi Z . Elektromagnetski valovi mogu u valovodima imati vrlo mnogo različitih oblika. Oblici valova sistematizirani su radi olakšanja analize procesa prijenosa energije valovodom, a svode se uglavnom na dvije grupe. Ako električno polje vala nema uzdužne komponente, tj. nema Z -komponente, kaže se da je taj val »transverzalan električni val«, TE-val. Obrnuto, kad magnetsko polje vala nema uzdužne komponente, govori se o »transverzalom magnetskom valu«, TM-valu.

Slika polja ponavlja se periodički duž valovoda u razmacima λ_z , koji se zovu duljina vala u valovodu u smjeru osi Z . Ta je duljina vala zadana odnosom

$$\lambda_z = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - K_{mn}^2}}. \quad (16)$$

Tu je f radna frekvencija, f_c granična propusna frekvencija, λ duljina vala u slobodnom prostoru ($\lambda = \frac{c}{f}$, sa $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s,

brzina svjetla u uzduhu), $K_{mn} = \left(m \frac{\lambda}{2a}\right)^2 + \left(n \frac{\lambda}{2b}\right)^2$, konstanta oblika vala za pravokutni valovod ($m = 0, 1, 2, 3, \dots$ i $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ su bilo koji prirodni brojevi), a a i b visina i širina pravokutnog valovoda. Budući da je konstanta oblika vala K_{mn} uvijek različita od nule, a manja od jedinice, duljina vala u valovodu λ_z uvijek je veća od duljine vala λ u slobodnom prostoru. To je ujedno i uvjet da se val rasprostire duž valovoda. Čim bi konstanta K_{mn} postala veća od jedinice, ne bi bilo više moguće rasprostiranje toga oblika vala. K_{mn} raste s cijelim brojevima m i n , a ima npr. za pravokutni valovod najmanji iznos $(\lambda/2a)^2$ ili $(\lambda/2b)^2$ za $m = 1, n = 0$, odnosno za $m = 0, n = 1$. Pravokutnim valovodom može se dakle prenositi energija samo ako je duljina vala u slobodnom prostoru manja od dvostrukog iznosa najmanje jedne stranice presjeka valovoda. Valovodi se primjenjuju u prijenosu valova praktički do 10 cm duljine. Takve se frekvencije primjenjuju u radarskoj i telekomunikacionoj tehnici.



Sl. 9. Silnice magnetskog i električnog polja vala vrste TE_{10} u pravokutnom valovodu

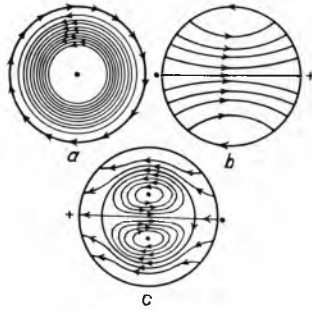
Zbog značaja prirodnih brojeva m i n , i oblici valova imaju te brojeve u svojim oznakama, te se označavaju sa TE_{mn} i TM_{mn} . Najčešći je oblik prijenosa TE_{10} ili TE_{01} , jer se tada najbolje iskorištava valovod. Na sl. 9 prikazane su magnetske silnice u ravnini $X-Z$ za val oblika TE_{10} . Silnice električnog polja okomite su na tu ravninu. Ta se slika polja giblje duž valovoda faz-

nom brzinom

$$v_z = \lambda_z f = c / \sqrt{1 - K_{mn}}$$

koja je veća od brzine svjetla. Na sl. 10 prikazane su neke vrste valova u okruglom valovodu.

Vodovi za prijenos energije imaju nezgodnu raspodjelu polja u svojoj okolini. Najjače polje se nalazi na površini vodiča, a dalje naglo opada na male iznose. Jakost električnog polja ograničena je probojnom čvrstoćom izolatora (plina u valovodu). Kad bi maksimalno električno polje bilo u uzduhu oko 2 kilovolta po milimetru, mogla bi se prenositi snaga ~ 500 kilovata po kvadratnom centimetru elektromagnetskim poljem. Ova je gustoća prenesene energije daleko veća nego što se postiže u vodovima drugih vrsta energije (npr. naftovodima).

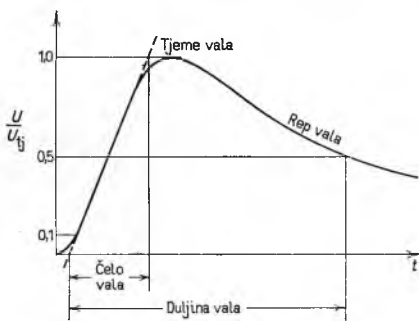


Sl. 10. Električne silnice za neke vrste valova u okruglom valovodu: a val TE_{10} , b val TE_{11} , c val TE_{12} .

Valovi na vodu

Dosadašnji prikaz stanja na vodu odnosi se na stacionarno stanje. Ovo je poglavlje posvećeno prikazu fizičkog rasprostiranja pojava po vodu kakvo nastupa u prelaznim stanjima ili promjenama stacionarnog stanja. Ovim je pojavama ugrožena sigurnost upotrebe vodova, te je to zato važna oblast proučavanja. Prelazna (prolazna) stanja na vodovima stalan su oblik pogona pri prenosu signala u telekomunikacijama, a u energetskim postrojenjima vrlo se često pojavljuju. Naročit oblik prelaznog stanja nastaje prilikom atmosferskih pražnjenja, kad se oslobađaju znatne količine energije te su zato mogući i značajni efekti. Energetsko stanje sistema ima bitnu ulogu u postizanju efekata kad nastaje promjena stanja. Zato u komunikacionim uređajima sigurnost nije ugrožena (već eventualno kvalitet prenosa informacija) jer pri tome sudjeluju male energije. Pri svakoj prelaznoj pojavi dolazi na vodu do kompliciranih događaja. Čim nastupi prelazna pojava, npr. pri priključku napona na vod, pojavi se elektromagnetski val, koji se s mjesta na kome je pojava nastala širi duž voda otprilike brzinom svjetla sve dok je vod homogen. Čim val naiđe na mjesto gdje vod više nije homogen, dolazi do lomljenja i refleksije.

Oblici valova koji se pojavljuju pri prelaznim pojavama mogu biti vrlo različiti. Oni su često vrlo slični tzv. *standardnom valu* koji je prikazan na sl. 11 i koji se primjenjuje pri visokonaponskim ispitivanjima. Za takve udarne valove uvedeni

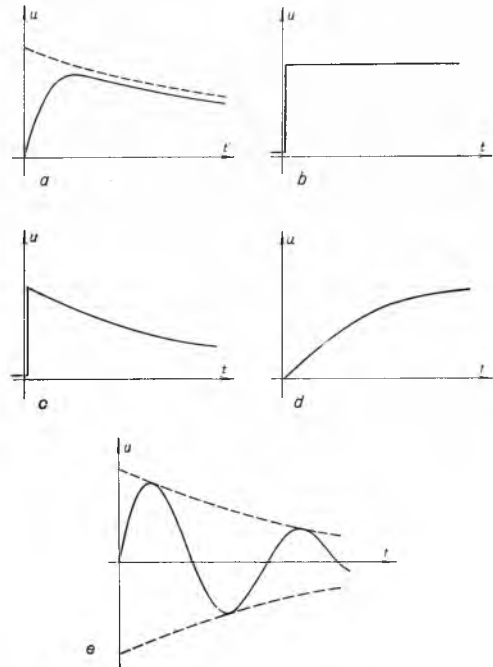


Sl. 11. Standardni val, ovisnost napona U/U_{tj} (ili struje) o vremenu t

su standardni pojmovi *čelo*, *tjeme* i *rep* vala. Trajanje čela vala i duljine vala mjere se kao što je označeno na sl. 11. Iznos tjemnog napona U , te trajanje čela i duljina vala tri su karakteristične veličine vala. Iznos tjemnog napona daje se u kilovoltima (kV), a trajanje čela i duljina vala u mikrosekundama (μs). Jednoj mikrosekundi u gibanju vala odgovara ~ 300 m prevaljenog puta u uzduhu. Tako, primjerice, val 800/1,5/35 ima tjeme 800 kV, trajanje čela 1,5 μs i duljinu 35 μs . *Strmina čela* definirana je omjerom tjemnog napona i trajanja čela.

Na sl. 12 prikazano je nekoliko oblika valova koji se najčešće pojavljuju. *Složeni eksponencijalni val* (sl. 12 a) najbliži je po obliku standardnom valu, te je on nadomjestak za njega. Najopasniji valovi za postrojenja jesu *odrezani val* (sl. 12 b) i *odrezani eksponencijalni val* (sl. 12 c). Oni ulaze u kategoriju vala vrlo strmog čela, a velike duljine. Trajanje njihova čela mjeri se dijelovima mikrosekunde. *Jednoliko rastući val* (sl. 12 d) praktički nije opasan za postrojenja. *Val u obliku prigušenog titraja* (sl. 12 e) može u postrojenjima koja su u blizini pogođenog sistema izazvati neželjene posljedice kapacitivnom ili induktivnom spregom. Tako se iz energetske mreže prenose promjene u telefonsku mrežu.

Kako val napreduje po vodu, gubi svoju energiju te mijenja svoj oblik, a naročito amplitudu. Početak čela napreduje u vodu brzinom svjetla koja odgovara okolnom izolatoru. Ostali dijelovi vala giblju se sporije zbog gubitaka, te se pojavljuje razvlačenje vala. Val poprima postepeno jednoliko rastući oblik, iako je počeo kao odrezani val. Izvori gubitaka su različiti. Čelo vala emitira



Sl. 12. Razni oblici putujućih valova. a Složeni eksponencijalni val, b odrezani val, c odrezani eksponencijalni val, d jednoliko rastući val, e val u obliku prigušenog titraja

energiju u prostor, ako nema zapreka. Skin-efekt je naročito izražen, a samo zbog njega čelo gubi vrlo brzo svoju strminu. Dalji su izvori gubitaka u vodičima u okolišu, dielektrički gubici i gubici korone. Gubici bitno mijenjaju oblik vala, te se moraju uzeti u obzir. Oni su toliko složeni da se ne mogu izraziti matematički, nego treba provesti ispitivanje na modelima, a matematička analiza se vrši samo kvalitativno.

Analiza vala. Da bi se mogla provesti kvalitativna analiza vala, primjenjuje se vod malih gubitaka. Valna impedancija je jednaka valnom otporu, konstanta prigušenja α i brzina faze v neovisne su od frekvencije: $\alpha = R/(2Z_v) + GZ_v/2$, $v = 1/\sqrt{L_v C}$. Na taj način val zadržava svoj oblik, a smanjuje mu se samo amplituda. Naponski i strujni val imaju jednaki oblik, jer su napon i struja u međusobnom odnosu, a povezuje ih valni otpor Z_v . Val koji se širi u pozitivnom smjeru zove se i *direktni val* ($u_d = Z_v i_d$), a val u suprotnom, tj. negativnom smjeru zove se *reflektirani val* ($u_r = -Z_v i_r$). Na mjestima diskontinuiteta pojavljuje se još *prolazni val* ($u_p = Z_v i_p$). Prolazni val u jednoj tački diskontinuiteta postaje direktni val u slijedećoj tački diskontinuiteta. Stanje napona i struje na vodu uvijek je zadano zbrojem direktnog i reflektiranog vala, tj.

$$u = u_d + u_r, \quad i = i_d + i_r = \frac{u_d}{Z_v} - \frac{u_r}{Z_v}.$$

Val u čvorištu jednim dijelom se reflektira, a drugim dijelom prolazi kroz njega. Čvorište je svako mjesto diskontinuiteta na vodu. U njemu se sastaju različiti vodovi ili se ukrštavaju vodovi (v. *Dalekovodi*, TE 3, str. 160), završava ili počinje vod, uključen je neki uređaj kome se elementi smatraju koncentriranim, te im se dimenzije zanemaruju. U analizi se primjenjuje odrezani val. U slijedećem izlaganju navedeno je nekoliko slučajeva najkarakterističnijih čvorišta.

Prazni hod voda (sl. 13 a),

$$u_r = u_d, \quad i_r = -i_d.$$

Ukupni napon nakon refleksije iznosi

$$u = u_d + u_r = 2u_d.$$

Kratki spoj voda (sl. 13 b),

$$u_r = -u_d, \quad i_r = i_d.$$

Ukupna struja nakon refleksije iznosi

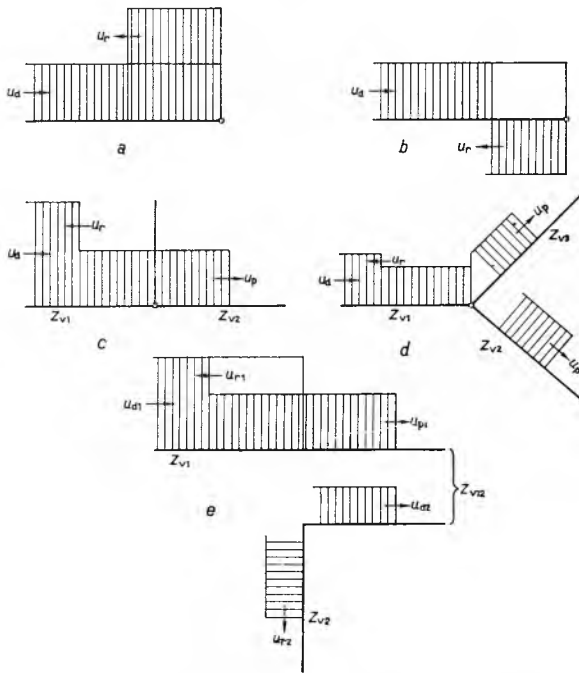
$$i = i_d + i_r = 2i_d.$$

Spoj dvaju vodova (sl. 13 c),

$$u_r = \frac{Z_{v2} - Z_{v1}}{Z_{v2} + Z_{v1}} u_d,$$

$$u_p = \frac{2Z_{v2}}{Z_{v2} + Z_{v1}} u_d.$$

Ako drugi vod ima manji valni otpor, reflektirani val je negativni, što je povoljno u sistemu.



Sl. 13. Val u čvorištu. a Kraj voda pri praznom hodu, b kraj voda pri kratkom spoju, c spoj dvaju vodova, d razgranište triju vodova, e spreaga pri susretu dvaju vodova

Račvanje vodova (sl. 13 d),

$$u_r = \frac{Z_{v0} - Z_{v1}}{Z_{v0} + Z_{v1}} u_d,$$

$$u_0 = \frac{2Z_{v0}}{Z_{v0} + Z_{v1}} u_d,$$

$$\frac{1}{Z_{v0}} = \frac{1}{Z_{v2}} + \frac{1}{Z_{v3}}.$$

Valni otpor Z_{v0} dobiva se kao otpor paralelne kombinacije svih vodova koji odlaze iz čvorišta izuzev vod kojim dolazi val.

Sprega pri susretu dvaju vodova (sl. 13 e),

$$u_{r1} = -\frac{Z_{v12}^2}{4Z_{v1}Z_{v2} - Z_{v12}^2} u_{d1},$$

$$u_{p1} = 2 \cdot \frac{2Z_{v1}Z_{v2} - Z_{v12}^2}{4Z_{v1}Z_{v2} - Z_{v12}^2} u_{d1},$$

$$u_{d2} = u_{r2} = \frac{2Z_{v2}Z_{v12}}{4Z_{v1}Z_{v2} - Z_{v12}^2} u_{d1}.$$

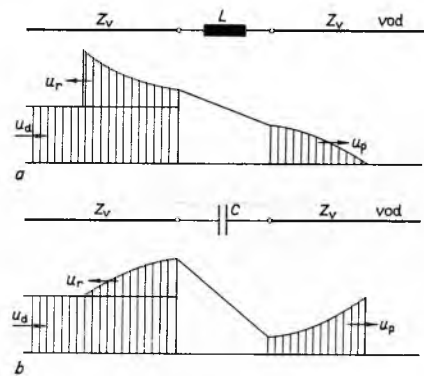
Valni otpor sprege Z_{v12} uzima u obzir međukapacitet i međuinuktivitet između vodova $Z_{v12} = \sqrt{L'_{12}/C'_{12}}$.

Kao primjer neka posluži spreaga vodova otpora $Z_{v1} = 400 \Omega$, $Z_{v2} = 300 \Omega$, $Z_{v12} = 120 \Omega$. Valovi reflektiranog, prolaznog i direktnog napona iznose: $u_{r1} = -0,031 u_{d1}$, $u_{p1} = 0,969 u_{d1}$, $u_{d2} = u_{r2} = 0,155 u_{d1}$.

Induktivitet u vodu (sl. 14 a),

$$u_r = u_d e^{-t/T}, \quad u_p = u_d (1 - e^{-t/T}), \quad T = \frac{L'}{2Z_v},$$

gdje T znači vremensku konstantu. Prolazni val ima postepeno rastuće čelo. Induktivitet u vodu sprečava prolaz odrezanog vala.



Sl. 14. Ponašanja vala na induktivitetu (a) i na kapacitetu (b) uključenom u vod

Kapacitet u vodu (sl. 14 b),

$$u_r = u_d (1 - e^{-t/T}), \quad u_p = u_d e^{-t/T}, \quad T = 2Z_v C',$$

gdje T znači vremensku konstantu.

To su najkarakterističniji slučajevi čvorišta. Induktivitet, odn. kapacitet uključen u vod zamišljeni su bez dimenzija.

Shema refleksije olakšava rješavanje zadaća rasprostiranja vala između dviju tačaka diskontinuiteta ili dvaju čvorišta. Val se reflektira od svake tačke diskontinuiteta. Refleksije između takvih tačaka nastavljale bi se do beskonačnosti da nema gubitaka.

Amplituda vala prigušuje se s faktorom gušenja $g = e^{-\alpha z_0}$ kad val stigne do drugog čvorišta udaljenog za z_0 . Da bi amplituda vala pala na 1% iznosa početne vrijednosti, val treba da prođe kroz vod između dva čvorišta n puta, pri čemu je n ovisno o faktoru gušenja g . Nekoliko iznosa n navedeno je u tabl. 2.

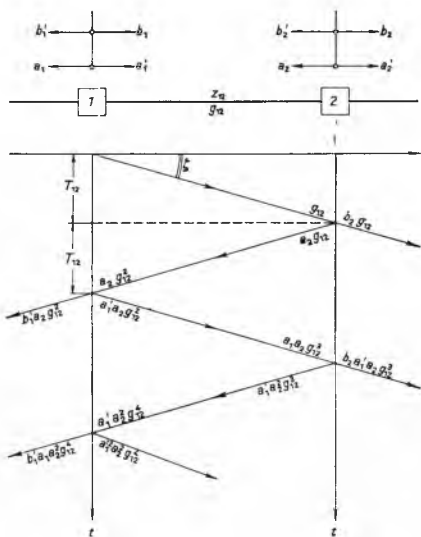
Tablica 2
BROJ REFLEKSIJA n U OVISNOSTI O FAKTORU GUŠENJA g

g	0,99	0,98	0,97	0,95	0,9	0,8
n	460	230	150	90	40	20

Čelo vala prevale za to vrijeme put $n z_0$. Taj je put obrnuto razmjerni prigušnoj konstanti α , a približno je jednak $5/\alpha$. Tako se može procijeniti vrijeme potrebno da se proces stabilizira.

Da bi se mogao pratiti proces, uvedena je shema refleksije kako je prikazana na sl. 15 za dva čvorišta. Za nju su potrebne prethodne pripreme. Potrebno je poznavati faktor refleksije $a = u_r/u_d$ i faktor prolaza vala $b = u_p/u_d$. Ti su faktori poznati za neka čvorišta iz navedenih primjera. U čvorištu 2 faktor refleksije je a_2 za val s lijeve strane, a a'_2 za val s desne strane. U

istom čvorištu faktor prolaza vala je b_2 za val slijeva, a b_2' za val zdesna. To je princip označavanja faktora. Na vertikalnim osima sheme prikazano je vrijeme, a na horizontalnoj osi udaljenost z između tačaka refleksije. Pravac širenja vala nagnut je prema



Sl. 15. Shema refleksije između dva čvorišta

osi z pod kutom ζ čiji je kotangens ($\cot \zeta = z_{12}/T_{12}$) jednak brzini vala na tome sektoru voda. Svi su pravci nagnuti prema osi z pod istim kutom ζ bez obzira na broj čvorišta. Da bi to bilo moguće, reducira se udaljenost među čvorištima tako da brzina gibanja vala i potrebno vrijeme prolaza vala odgovaraju stvarnom stanju. Pravci u cik-caku predstavljaju gibanje vala između dva čvorišta. Sada je moguće znati iznos napona na bilo kome mjestu na vodu i u bilo koje vrijeme. Ako se početni iznos napona, tj. napona u čvorištu 1, uzme kao jedinični, napon na kraju voda kod čvorišta 2 iznosi

$$g_{12} + a_2 g_{12} + a_1' a_2 g_{12}^2 + a_1' a_2^2 g_{12}^3 + \dots$$

Kao primjer može poslužiti priključivanje voda u praznom hodu na izvor jednosmjerne struje. Vod ima faktor gušenja $g = 0,75$. Faktori refleksije za napon iznose $a_2 = +1$ na kraju voda i $a_1 = -1$ na početku voda kod izvora. Ako je napon na početku u_d , konačni napon na kraju voda iznosi

$$u_2 = u_d (2g - 2g^3 + 2g^5 - \dots) = \frac{2g}{1 + g^2} u_d.$$

To je u ovom slučaju $u_2 = 0,96 u_d$. Napon na kraju voda u praznom hodu u stacionarnom stanju iznosi 96% napona izvora, iako je vod dobro izoliran, te iz izvora ne teče nikakva struja. Iako je posrijedi istosmjerni napon, postoji pad napona zahvaljujući dinamici procesa.

Nehomogeni vod

Nehomogen vod ponaša se slično kao homogen, te za njega vrijede isti fizikalni odnosi. On ima jednako definirane konstante voda R', L', C', G' po jedinici dužine. Razlikuje se od homogenog voda po tome što konstante voda nisu na svim mjestima voda jednake nego se mijenjaju duž voda. Vrijede iste diferencijalne jednadžbe kao za dugi homogeni vod, samo treba uzeti u obzir da su R', L', C', G' ovisni o mjestu na vodu. Kvalitativni pregled se dobiva ako se promatra vod bez gubitaka, tj. ako se ispuštaju iz promatranja otpor i odvod.

Najjednostavniji odnosi dobivaju se u slučaju *eksponencijalnog voda*, kad se induktivitet i kapacitet mijenjaju po eksponencijalnom zakonu. Nadalje vrijedi da je $L' C' = 1/c^2$, gdje je c brzina svjetla. Eksponencijalna promjena induktiviteta i kapaciteta iznosi

$$L' = L'_0 e^{\xi z}, \quad C' = C'_0 e^{-\xi z}.$$

Konstanta ξ određuje se iz posebnih uvjeta voda. Neka je ta konstanta mnogo manja od fazne konstante $\beta = 2\pi/\lambda$. Oblici vala napona i struje slični su kao u homogenom dugom vodu, samo uz dodatni faktor, što, pisano u kompleksnom obliku, daje

$$U = e^{\xi z/2} (U_1 e^{j\beta z} + U_2 e^{-j\beta z}),$$

$$I = e^{-\xi z/2} \left(-\frac{U_1}{Z_v} e^{j\beta z} + \frac{U_2}{Z_v} e^{-j\beta z} \right).$$

Tu je $Z_v = \sqrt{L'_0/C'_0}$ valni otpor voda. Takav vod opterećen otporom $Z_t = Z_v e^{\xi z_0}$ na svome kraju, ako mu je dužina z_0 , nema refleksije, a na početku kod generatora ima otpor $Z_g = Z_v$.

Eksponencijalnim vodom postiže se transformacija impedancije tereta za faktor $e^{\xi z_0}$. To pokazuje put kako se može postepeno prijeći od jednog tipa voda na drugi tip, a da nema refleksije. Uvjet je da je konstanta ξ što manja, a to ovisi o iznosu fazne konstante.

Kao primjer neka posluži koaksijalni vod koji ima valni otpor 110 Ω . On treba da prođe kroz jedno suženje i nastavlja se kao koaksijalni vod manjeg vanjskog promjera, te mu valni otpor padne na iznos 70 Ω . Vodom se prenosi energija pri duljini vala od 30 m u uzduhu. Prijelaz treba da je bez refleksije. Fazna konstanta iznosi 0,21, a konstanta ξ neka iznosi 0,02. Omjer valnih otpora iznosi 1,57, što daje $\xi z_0 = 0,45$ ili duljinu prijelaza $z_0 = 22,5$ m. Pri takvoj izvedbi prijelaz se vrši bez refleksije.

T. Bosanac

MATERIJALI ZA IZRADU ELEKTRIČNIH VODOVA

Osnovni elementi električnih vodova jesu: vodiči, izolacija, slojevi za zaštitu vodiča od vlage, toplinskih i kemijskih utjecaja i pribor za spajanje, završavanje, nošenje te mehanički i električnu zaštitu voda. Pojam električnog voda, u širem smislu, obuhvaća, pored samog voda u užem smislu, također sav pribor, naprave i uređaje koji služe za trajno nošenje i polaganje voda.

Vodič (provodnik) je žica ili skup žica od električki dobro vodljivog materijala (najčešće bakra ili aluminijuma). Masivan ili pun vodič sastoji se od jedne jedine žice, a uža ili užica je vodič napravljen od više žica.

Kao *izolacija* upotrebljavaju se: zrak (na golim vodičima); stakleni, keramički ili plastični izolatori za zavješanje; papir, tekstil, lakovi, elastomeri (gume), termoplastici, slojevi na vodiču nanoseni galvanskim putem (npr. oksidi), azbesti. Upotrebljavaju se i smjese navedenih izolacionih materijala.

Slojevi za zaštitu vodiča i izolacije od vlage, mehaničkih, toplinskih i kemijskih utjecaja izrađuju se od metala, guma, termoplastika, impregniranih tekstila i sl.

U *pribor* za spajanje, završavanje, nošenje, mehaničku i električnu zaštitu voda ubrajaju se: kabelske spojnice i glave, stupovi s izolatorima za zavješanje i instalacioni materijal (instalacione cijevi, pribor, osigurači itd.).

Materijali za izradu vodiča praktično su ograničeni na bakar i aluminijum, jer su to jedini tehnički metali s dovoljno velikom električnom vodljivošću.

Suvremena tehnika izrade vodova učinila je bakar i aluminijum jednako pouzdanima za izradu vodiča. Jedinu argument koji mora odlučiti o izboru materijala vodiča je ukupna cijena voda.

Dosadašnje tendencije cijena vodova s bakrenim i aluminijumskim vodičima, cijena sirovog bakra i aluminijuma kao i ukupne raspoložive svjetske rezerve tih metala daju naslutiti da će aluminijum konačno preuzeti primat koji danas u izradi vodiča u mnogim zemljama još ima bakar.

Mada je zamisao da se izrade kabeli s vodičem od natrijuma stara (1901, 1930), ona se tek u posljednje vrijeme češće spominje. Čisti natrijum (99,95%) stiska se u žicu ili traku koja se izolira i zaštićuje omotačem od polietilena. Izvjesne poteškoće stvara spajanje kabela s trošilom jer se spojna mjesta moraju izolirati od zraka i vlage. Ovi kabeli u određenim slučajevima mogu biti jeftiniji od bakrenih i aluminijumskih, ali zbog svojih karakteristika dolaze u obzir samo za primjenu u primarnim i sekundarnim distributivnim mrežama.

U pogledu ostalih karakteristika materijala za izradu vodiča v. članak *Elektrotehnički materijali*.

Materijali za izradu izolacije služe za električno izoliranje vodiča pod naponom. Oni se nanose na vodič na način opisan u poglavlju Proizvodnja vodova i kabela u ovom članku. Među naj-

značajnije izolacione materijale idu: elastomeri (gume), termoplastici (polistiren, polietilen, polivinilklorid, najlon, teflon i dr.), papir suh ili natopljen uljem, kabelsko ulje, kabelske mase i zrak.

Detaljni podaci o materijalima koji se u elektrotehnici primjenjuju za izolaciju vodiča dani su u članku *Elektrotehnički materijali*.

Materijali za zaštitu vodiča i izolacije od vanjskih utjecaja. Vanjski utjecaji mogu se podijeliti na mehanička oštećenja, mehanička opterećenja, kemijske (korozione) utjecaje, temperaturne utjecaje, prodor stranih tijela i/ili vlage do izolacije voda. Prema materijalu od kojeg su načinjeni, zaštitni slojevi mogu se podijeliti na metalne, nemetalne i kombinirane.

Nadzemni i izolirani vodovi često su bez zaštitnih slojeva, ili im izolacija služi i kao zaštita vodiča. Ako se kod ovih vrsta vodova i upotrebljavaju zaštitni slojevi, oni su nemetalni i uglavnom načinjeni od posebnih vrsta gume i, termoplasta, a rjeđe od tekstila.

Zaštitni slojevi igraju značajnu ulogu u konstrukciji kabela. Za zaštitu kabela upotrebljavaju se uglavnom kombinacije metala i nemetala. Od metala upotrebljavaju se: olovo, aluminijum, čelik i bakar, a od nemetala tekstil, gume, termoplastici i azbesti.

OZNAČAVANJE I OBILJEŽAVANJE ELEKTRIČNIH VODOVA

Vodovi se razlikuju po obliku njihovih elemenata i materijalu od kojeg su ovi napravljeni, po konstrukciji i izvedbi, po području primjene, po nazivnom naponu. Da bi se različite vrste vodova kratko karakterizirale u pogledu tih razlika, standardi i propisi pridružuju svakoj vrsti vodova jednoznačnu oznaku, koja se upotrebljava kao njezino ime kad je o njoj riječ. Da bi se olakšala montaža vodova i spajanje njihovih vodiča, površina pojedinih vodova izrađuje se u propisanim bojama, a njihovim se vodiči obilježavaju bojama ili brojkama na način koji je također standardima i propisima određen.

Označavanje energetskih vodova i kabela. Nacionalni standardi ili tehnički propisi većine zemalja propisuju način označavanja vodova. Ovdje će biti opisano označavanje vodova po važećim jugoslavenskim standardima i tehničkim propisima.

Nadzemni vodovi označavaju se tako da se slovima i brojkama navedu broj i presjek vodiča, materijal vodiča, nazivni napon i, kad to treba naročito naglasiti, raspon.

Jugoslavenski standard JUS N. C0.006/61 propisuje sistem označavanja energetskih izoliranih vodova i kabela.

Izolirani vodovi označavaju se prema njemu ovako: a) grupom slovnih simbola označava se posebno područje primjene, vrste izolacije i plašta; b) grupom slovnih simbola označavaju se izvedbene osobine značajne za primjenu; c) grupe slovnih simbola služe za označavanje vrste materijala i oblika presjeka vodiča; d) brojem žila i nazivnim presjekom vodiča; e) nazivnim naponom voda.

Broj slovnih simbola u oznaci nije određen. Ako su vodovi za opću upotrebu ili za niski napon (do 1 kV) simboli se za te osobine ne navode. Simboli se uvijek navode propisanim redom. Prva i druga grupa slovnih simbola razdvajaju se kosom crtom, a druga i treća crticom (povlakom).

Kabeli se označavaju: a) grupom slovnih simbola za vrstu materijala izolacije i plašta; b) brojnim simbolom za izvjesne konstruktivne osobine kabela; c) grupom slovnih simbola za vrstu materijala i oblik presjeka vodiča; d) brojem žila i nazivnim presjekom vodiča i e) nazivnim naponom kabela.

Za posebna područja primjene (za izolirane vodove) upotrebljavaju se slovni simboli: A za automobile, D za dizalice, S za svjetiljke i Z za zavarivanje.

Za vrste materijala izolacije i plašta (izoliranih vodova i kabela) predviđeni su ovi slovni simboli: P za polivinilklorid, G za gumu, E za polietilen, T za tekstil, N za neopren (polikloropren), IP za impregnirani papir, NP za naročito impregnirani papir, B za butilnu gumu, S za silikonsku gumu, L za lakiranu tkaninu, F za izolacionu foliju, A za aluminijumski plašt, O za olovni plašt, ZO za poseban olovni plašt za svaku žilu, MT za metalnu cijev od čelične trake s uzdužnim šavom, AT za metalnu cijev od aluminijumske trake s uzdužnim šavom i CT za metalnu cijev od cinkane trake s uzdužnim šavom.

Za izvedbene osobine značajne za primjenu (samo izoliranih vodova) primjenjuju se ovi slovni simboli: A znači otporan prema

atmosferilijama, F finožičan, J jača konstrukcija, K pokositren (samo tamo gdje kositrenje vodiča nije obavezno), L lakša konstrukcija, M mnogožičan, N nezapaljiv, O ojačan elementom za nošenje, P pouzdan, R s razmaknutim žilama, S naročito savitljiv, T viša tvornička klasa, U s usporednim žilama, V visokonaponski i Z s električnom zaštitom.

Konstruktivne osobine kabela označavaju se brojčanim simbolima

- 00 kabeli bez posebnog obilježja konstrukcije,
- od 01 do 09 zaštita od korozije preko plašta,
- od 10 do 19 mehanička zaštita od čeličnih traka sa zaštitom od korozije ili bez nje,
- od 20 do 29 mehanička zaštita od pocinčanih okruglih čeličnih žica sa zaštitom od korozije ili bez nje,
- od 30 do 39 mehanička zaštita od pocinčane plosnate čelične žice sa zaštitom od korozije ili bez nje,
- od 40 do 49 elementi zaštite ispod plašta od termoplastičnog materijala,
- od 50 do 59 elementi zaštite plašta od prirodne ili sintetičke gume,
- od 60 do 69 elementi zaštite ispod plašta od prirodne ili sintetičke gume s ugrađenim zaštitnim, komandnim ili telefonskim vodičima,
- od 70 do 79 elementi zaštite ispod pojačanog plašta od prirodne ili sintetičke gume.

Vrsta materijala i oblik presjeka vodiča označava se za izolirane vodove i kabele grupom slovnih simbola. Prvo se označuje materijal vodiča, a zatim oblik. Za vodiče od bakra oznaka se izostavlja, za vodiče od aluminijuma stavlja se simbol A, a za vodiče okruglog presjeka oznaka se izostavlja, za vodiče sektorskog presjeka stavlja se simbol S.

Broj žila i nazivni presjek vodiča za izolirane vodove i kabele označava se umnoškom dvaju brojeva: broj žila $\times$ nazivni presjek vodiča u kvadratnim milimetrima (oznaka mm² stavlja se samo ako se navodi i nazivni napon).

Nazivni napon (za sve kabele i za izolirane vodove preko 1 kV) označava se brojem i izražava u kV. Ova oznaka u trofaznom sistemu odnosi se na linijski napon.

Primjeri potpune oznake kabela prema propisima JUS i VDE.

Primjer 1: IPO 13 — AS 3 $\times$ 120 mm² 10 kV — kabel s papirnom izolacijom i olovnom plaštem, armiran dvostrukom čeličnom trakom i ovijen ovojem impregniranim kompaund-masom protiv korozije, s aluminijumskim žilama sektorskog oblika, presjeka 3 $\times$ 120 mm², za nazivni (linijski) napon 10 kV.

Primjer 2: PP 41 — 3 $\times$ 25 + 16 mm² 1 kV — kabel s izolacijom i plaštem od polivinilkloridne mase, s omotom od dvije čelične trake ispod plašta s bakrenim žilama okruglog oblika, presjeka 3 $\times$ 25 + 16 mm², za nazivni (linijski) napon 1 kV.

Prema propisima VDE, koji se u nas također često primjenjuju, vrsta materijala izolacije i plašta kabela, njegove konstruktivne osobine, vrsta materijala i oblik presjeka vodiča kabela označuju se samim slovnim simbolima. Slovo G, npr., znači izolaciju ili zaštitni sloj od gume, H vodljiv sloj od metaliziranog papira, K olovni plašt, E zaštitni sloj od elastične ili plastične folije, Y zaštitni sloj od PVC, B armiranje čeličnom trakom, R armiranje zaštićeno od korozije, A zaštitni sloj od vlaknastog materijala, r okrugli, s sektorski presjek vodiča. Prvo slovo svih oznaka za kabele je N. Primjer: Kabel s gumenom izolacijom, s olovnom plaštem, armiran čeličnom trakom, s vanjskim zaštitnim slojem od vlaknastog materijala, ima oznaku NGKBA. (Dalje primjere v. tabl. 9 i 10.)

Označavanje telekomunikacionih vodova. Prema JUS N. C0.005/1955 oznaka telekomunikacionih vodova sastoji se od četiri znaka, i to od po dva slova i dva brojna simbola.

Prvi slovni simbol je »T« (telekomunikacije) i jednak je za sve telekomunikacione vodove.

Drugi slovni simbol označava uže područje primjene. Tako znači: N vodiče za nadzemne vodove, M izolirane vodiče za montažne vodove, G gajtan ili vrpca, I izolirane vodiče za instalacione vodove, C montažne kabele za centrale, R razvodne instalacione kabele, K telefonske kabele za mjesne mreže, D telefonske kabele za međumjesne mreže, S signalne i mjerne kabele i P kabele za posebne svrhe.

Prvi brojni simbol detaljnije označava vod u pogledu načina izrade, izolacionog materijala i zaštite. Drugi brojni simbol tačno specificira vod. Konstrukcija tako specificiranog voda određuje se posebnim standardom. Između grupe slovnih i brojnih simbola ostavlja se razmak. Npr. TI — 20 — telekomunikacioni izolirani vodič za instalacione vodove, izoliran PVC izolacijom. Konstrukcija određena standardom JUS N. C2.420/1961.

Obilježavanje vodiča u vodu bojama ili brojkama. Pojedini vodiči u vodu upotrebljavaju se s elektrotehničkog staništa u različite svrhe i zbog toga se različito nazivaju. *Glavni* (ili *fazni*) vodiči izoliranih vodova za prijenos snage povezuje izvor električne energije i trošilo. Taj se vodič ne spaja na nultu tačku ili zvjezdište. *Neutralni vodič* priključen je u trofaznom sistemu na nultu tačku ili zvjezdište, a u istosmjernom sistemu na srednju tačku. *Nul-vodič* je direktno uzemljeni neutralni vodič u slučajevima kada se kao zaštita od previsokog napona dodira primjenjuje nulovanje. *Zaštitni vodič* ne spada u strujni krug trošila. Spaja vodljive dijelove uređaja koji normalno nisu pod naponom i povezuje ih sa zaštitnim sistemom (uzemljenjem, nulovanjem itd.).

Radi lakše montaže i izbjegavanja problema koji mogu nastati eventualnom zamjenom vodiča kod njihova spajanja, vodiči se obilježavaju bojama ili brojkama.

Prema jugoslavenskom standardu JUS N. C0.010/70, koji u potpunosti odgovara preporukama Međunarodne elektrotehničke komisije (IEC), kombinacijom žute i zelene boje obilježava se samo vodič sa zaštitom funkcijom, tj. nul-vodič ili zaštitni vodič. Svijetloplava boja upotrebljava se za obilježavanje neutralnog vodiča, ali se može upotrijebiti i za glavni vodič ako u vodu nema neutralnog vodiča.

Brojkama se obilježavaju krajevi vodiča i stezaljke da se omogućujući lakša montaža i izbjegnju greške. To je uobičajeno u instalacijama motornih pogona, signalizacije i daljinske komande.

Grafički simboli. Za označavanje pojedinih vrsta vodova priključnih mjesta, odvojaka, križanja itd. predviđeni su prema standardima JUS i drugim propisima i preporukama posebni grafički simboli koji se mogu naći u članku *Elektrotehnički simboli*.

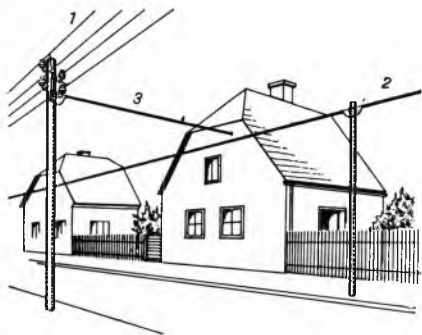
ELEKTRIČNI VODOVI ZA PRIENOS SNAGE

U vodove za prijenos snage, ili energetske vodove, ubrajaju se svi nadzemni, izolirani i kabelski vodovi koji služe prijenosu električne energije, njezinoj distribuciji i napajanju trošila u instalacijama. Energetski vodovi razlikuju se prema naponu i snazi koju mogu provoditi. U skladu s Jugoslavenskim standardima (JUS N. A2.001/1957) energetski se vodovi izvođe za nazivne napone (kojima su označeni i kojima odgovaraju njihove radne karakteristike): do 1 kV, 10, 35, 110, 220 i 380 kV. Ako je ekonomski opravdano, mogu se upotrebljavati i naponi 3, 6, 20, 30 i 60 kV, ali se naponi 3 i 6 kV ne smiju upotrebljavati za javnu elektrifikaciju.

Nadzemni vodovi

Pod nadzemnim vodom razumijeva se skup vodiča koji provode električnu energiju nad zemljom, sa svim dijelovima koji služe za sigurno nadzemno postavljanje vodiča. Dijelovi nadzemnog voda jesu prema tome: vodiči, zaštitna užad, zemljovodi, uzemljivači, izolatori, nosači, stupovi i temelji.

U nadzemne se vodove ne ubrajaju kontakti vodovi za električnu vuču, nadzemni kabeli i vodovi za instalacije na otvorenom s rasponima ispod 20 m.



Sl. 16. Niskonaponski nadzemni vodovi. 1 Goli vod, 2 kabelski vod, 3 kućni priključak s nadzemnim kabelom

Nadzemni vodovi mogu se podijeliti prema građi vodiča na gole i izolirane, prema namjeni na elektroenergetske i telekomu-

nikacione (vodove za prijenos informacija); na dalekovode i nadzemne vodove distributivnih mreža i na kućne priključke (sl. 16), a prema naponu na: niskonaponske (s nazivnim naponom do 1000 V) i visokonaponske (s nazivnim naponom preko 1000 V).

Nadzemni se vodovi upotrebljavaju za dalekovode i vodove niskonaponskih mreža. Za dalekovode oni se danas redovito primjenjuju u prenosnim mrežama, a nešto rjeđe u distributivnim mrežama. Za vodove niskonaponskih mreža nadzemni se vodovi upotrebljavaju danas uglavnom samo još u prigradskim i seoskim mrežama. Konstrukcija nadzemnih vodova za prenosne i distributivne mreže opisana je u članku *Dalekovodi*, TE 3, str. 136. Ovdje će biti ukratko obrađeni samo nadzemni vodovi niskonaponskih mreža.

Definicije važnijih pojmova koji se odnose na nadzemne vodove: *vodiči* služe za provođenje električne struje; *zaštitno uže* je uzemljena žica ili uže koje služi za zaštitu od atmosferskih prenapona; *sigurnosno uže* je uzemljeno uže koje služi za zaštitu od dodira s drugim vodom; *stup* je konstrukcija koja služi za nošenje izolatora, vodiča i zaštitne užadi, a *uzemljenje* je vodljivo spajanje pojedinih dijelova voda sa zemljom.

Raspon je horizontalni razmak između dva susjedna stupa; *provjes* (ugib) vodiča ili zaštitnog užeta je okomiti razmak od pravca koji spaja tačke zavješanja vodiča od vodiča ili zaštitnog užeta, i to mjeren u sredini raspona; *zatezno polje* je dio voda koji se nalazi između dva susjedna zatezna stupa; *sigurnosni razmak* je najmanji dozvoljeni razmak između dijelova pod naponom i uzemljenih dijelova voda; *sigurnosna udaljenost* je najmanja dozvoljena udaljenost dijelova pod naponom od zemlje ili nekog objekta na zemlji pri provjesu na $+40^{\circ}\text{C}$ i opterećenju od vjetra do punog iznosa; *ispitano opterećenje* žice ili užeta je sila zatezanja koju žica odnosno uže može izdržati jednu minutu.

Vodiči i zaštitna užad proračunavaju se prema Tehničkim propisima za gradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova (Sl. list FNRJ 24/67) pod pretpostavkom da je minimalna temperatura -20°C , maksimalna temperatura $+40^{\circ}\text{C}$ i najviša temperatura kod koje još ima dodatnog opterećenja na vodu odinja, leda ili snijega -5°C .

Dodatno opterećenje voda izazivaju inje, led, snijeg i vjetar. Navedenim tehničkim propisima tačno je određeno kako se izračunavaju dodatna opterećenja.

Tablica 3

NAJMANJI DOZVOLJENI PRESJECI VODIČA ZA NADZEMNE VODOVE (u mm²)

Trasa voda	Materijal vodiča				
	bakar i bronza	aluminijum	aldrj	čelik	alučel 6 : 1
Vodovi visokog i niskog napona na normalnoj trasi	10	25	16	10	16
Vodovi niskog napona do 45 m raspona	6	16	10	6	16
Vodovi na mjestima križanja sa željezničkim prugama	16	35	25	16	25
Vodovi visokog napona na mjestima križanja sa PTT-vodovima	16	25	25	25	25
Vodovi do 250 V prema zemlji na mjestima križanja s PTT-vodovima	10	25	16	10	16

Napomena: Mogu se upotrebljavati i drugi materijali pod uvjetom da ispitno opterećenje bude: za vodove niskog napona i raspona do 45 m veće od 180 kp; za ostale vodove veće od 380 kp

Vodiči i zaštitna užad izrađuju se od bakra ili bronze, aluminijuma ili aluminijumskih legura, od kombinacija aluminijumskih i čeličnih žica (alu-čelična užad) ili samo od čelika. Za izradu nadzemnih vodova danas se u našoj zemlji umjesto užadi od tvrdo vučenog bakra upotrebljava samo užad na bazi aluminijuma, jer su ti vodovi znatno jeftiniji i jer su uz primjenu prikladnog spojnog i ovjesnog materijala i uz odgovarajući postupak pri montaži sigurni u eksploataciji. Bakar i aluminijum moraju biti tvrdo vučeni, a čelik mora biti pouzdano zaštićen od korozije. Za visokonaponske vodove upotrebljavaju se samo goli vodiči, a za niskonaponske

goli i izolirani. Ako se primjenjuju izolirani vodiči, tehnički propisi stavljaju iste sigurnosne zahtjeve kao i za gole vodiče. Za vodiče od aluminijuma ili njegovih legura ne smije se upotrijebiti samo jedna masivna žica za cijeli presjek, već uže sukano od više tanjih žica. U obliku pune žice mogu se izraditi vodiči od ostalih materijala, ali samo do presjeka od 16 mm² i za raspone manje od 80 m.

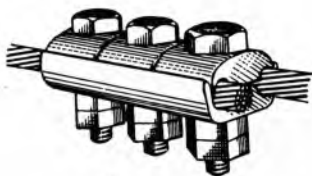
Presjek vodiča određuje se prema dozvoljenom strujnom opterećenju (zagrijavanju), padu napona i gubitku snage. Presjek žica i užadi mora biti takav da temperatura vodiča nikada ne prekorači +80 °C, uz pretpostavku da je temperatura okoline +40 °C. Najmanji dozvoljeni presjeci vodiča za nadzemne vodove dati su u tabl. 3.

Mehaničko naprezanje vodiča i zaštitne užadi nadzemnog voda mora biti manje od maksimalno dozvoljenog za određeni materijal. Mehaničko naprezanje vodiča ovisi o vlastitoj težini vodiča, dodatnim opterećenjima, temperaturi vodiča i visinskim razlikama među mjestima završetka.

Vodiči se nastavljaju *spojnicama* (sl. 17). Spojnica po pravilu mora biti od istog materijala kao i vodič. Ako se nastavljaju vodiči različitih materijala, upotrijebljene spojnice moraju biti takve konstrukcije da ne može doći do elektrolitskog razaranja.

Mjesto na kome se nalazi spojica mora izdržati najmanje 90% od ispitnog opterećenja vodiča.

Sigurnosni razmaci su najmanje dozvoljene udaljenosti između raznih dijelova pod naponom te između tih dijelova i uzemljenih dijelova i dijelova stupova. Sigurnosni razmaci iznijeti su u tabl. 4; oni moraju biti održani u svim pogonskim uvjetima.

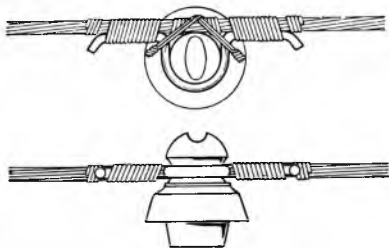


Sl. 17. Spojnica za spajanje užadi dvaju vodiča

Tablica 4
SIGURNOSNI RAZMACI
(u cm)

Mogući položaj vodiča	Nazivni napon, kV					
	≤1	≤20	35	60	110	220
neotklonjen	20	20	25	40	75	150
otklonjen	20	20	20	30	55	110

Izolatori za nadzemne vodove izrađuju se od porculana ili stakla. Za niskonaponske vodove upotrebljavaju se redovito potporni izolatori različitih oblika. Oni su učvršćeni na stup s pomoću čeličnih kukastih nosača (v. sl. 19). Učvršćenje vodiča na izolator prikazano je za bakrene vodiče na sl. 18.



Sl. 18. Učvršćenje bakrenog vodiča na izolator

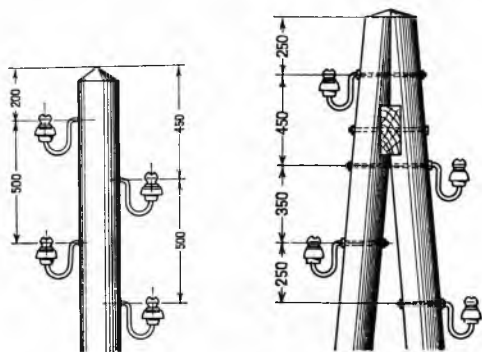
Kućni priključci služe za priključak kućne instalacije na niskonaponsku nadzemnu mrežu (v. *Električne instalacije*, str. 11).

Stupovi mogu biti nosivi, linijski i zatezni. Nosivi stupovi postavljaju se na pravocrtnoj trasi. Na njima vodiči i zaštitna užad nisu čvrsto spojeni, tako da se na stup prenosi samo rezultanta sila zatezanja, koja je okomita kad su rasponi i vodiči s obje strane stupa jednaki.

Zatezni stupovi preuzimaju silu koja nastaje uslijed težine vodiča. Oni se postavljaju kad su rasponi nejednaki, kad se mijenja pravac trase itd.

Neki stupovi mogu biti istovremeno i nosivi i zatezni, npr. kad se vod odvaja.

Za nadzemne vodove upotrebljavaju se drveni (sl. 19), betonski ili čelični (cijevni i rešetkasti) stupovi. Drveni stupovi su



a Jednostupni stup, b dvostruki stup A-oblika
Sl. 19. Drveni stupovi za niskonaponske nadzemne vodove s kukastim nosačima i izolatorima

radi zaštite od truljenja impregnirani, a u vlažnom zemljištu učvršćeni su na betonske nogare. Radi pojačanja primjenjuju se ponekad (npr. kao zatezni stupovi) dvostruki stupovi, obično u obliku slova A. U eksploataciji najjeftiniji su betonski, a najskuplji čelični stupovi.

Izolirani vodovi

Izolirani vodovi upotrebljavaju se najčešće u električnim instalacijama (instalacioni vodovi i kabeli). Izolirani instalacioni vod u širem smislu obuhvaća pored vodiča i sav pribor za zaštitu od vanjskih mehaničkih, kemijskih i toplinskih utjecaja, te pribor za nošenje i spajanje vodiča. U pribor se ubrajaju instalacione cijevi, instalacione kutije, stezaljke i pribor za instalacione cijevi (lule, krajnice, objumice, kolčaci itd.).

Prema vrsti električne energije koju provode, izolirani se vodovi dijele na elektroenergetske izolirane vodove i telekomunikacione izolirane vodove.

Prema načinu polaganja izolacioni se vodovi dijele na vodove za polaganje u cijevi, vodove za polaganje na odstoje objumice, vodove za polaganje u žbuku i pod nju, vodove za pokretna trošila (gajtane).

Prema mjestu upotrebe izolirani se vodovi dijele na vodove za suhe prostorije, vodove za vlažne prostorije, specijalne vodove za vozila, za svjetiljke, za razvodne uređaje, nezapaljive, za svjetleće cijevi, za dizala itd.

Prema izvedbi specijalne izolacije kojom se izoliraju vodovi namijenjeni upotrebi pod agresivnim klimatskim uslovima, izolirani se vodovi za takve namjene dijele na izolirane vodove za upotrebu u tropima, u polarnim oblastima, na brodovima, i dr.

Instalacioni vodovi služe za čvrsto položene elektroenergetske instalacije u zgradama, a polažu se u cijevi, ispod žbuke, na izolaciona tijela i sl. u suhim ili vlažnim prostorijama, već prema tipu proizvoda. Primjenjuju se za radne napone do 1000 V, a iznimno, u instalacijama svjetlećih cijevi, i za više napone. Dozvoljena je radna temperatura do 70 °C.

Instalacionim kabelima nazivaju se ponekad instalacioni vodovi sa dvije i više žila koji su građeni nalik na kabele (npr. sa zajedničkim plaštom oko svih vodiča). Oni se upotrebljavaju za čvrsto položene energetske instalacije u zgradama i na uređajima, a polažu se izravno (bez cijevi) iznad žbuke, u njoj ili ispod nje, već prema tipu kabela. Radni im je napon do 380 V, a u nekih tipova do 500 V. Dozvoljena je temperatura do 70 °C.

Savijljivi priključni vodovi ili *gajtani* služe za priključak manjih prenosnih trošila kao što su stolne svjetiljke, televizori, strojevi za pranje rublja, manja termička trošila i sl. Upotrebljavaju se za radne napone do 380 V i radne temperature do 70 °C.

Vodovi za prijenos informacija služe za unutrašnje veze, za shemiranje dojavnih i telekomunikacionih slabostrujnih uređaja i za njihovo međusobno povezivanje, za kućne telefonske instalacije u cijevima, po zidu itd. (V. *Električne instalacije*.)

Kabeli

Kabeli su izolirani i protiv vanjskih utjecaja zaštićeni električni vodovi namijenjeni za polaganje u zemlju, u kabelske kanale sa zidanim stijenama, na konstrukciju od metalnih profila ili u kabelsku kanalizaciju. U posebnim slučajevima kabel se polaže i u vodu, nad zemljom (samonosivi kabel), koso ili okomito (npr. u rudnicima), na brodovima, u sredinama s jakim korozionim djelovanjem, na mjestima s mogućnosti velikih mehaničkih oštećenja i na mjestima gdje postoji utjecaj viših temperatura i mogućnost pojave plamena.

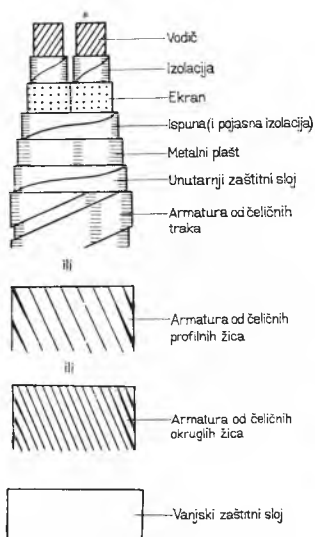
Kako je već rečeno, pri konstrukciji kabela poklonjena je velika pažnja izradi izolacionih zaštitnih slojeva.

Prema vrsti izolacije kabeli se dijele na kabele izolirane elastomerima, kabele izolirane termoplastima, kabele izolirane papirom koji je impregniran uljem, kabele izolirane papirom i uljem pod pritiskom, kabele izolirane papirom i plinom pod pritiskom. Najčešće se upotrebljava kao izolacija papir natopljen izolacionim kabelskim uljem. Energetski kabeli izolirani elastomerima i termoplastima upotrebljavaju se za napone do 110 kV, a kabeli izolirani papirom koji je impregniran uljem, za napone do 110 kV. Za najviše napone upotrebljavaju se kabeli s uljem ili plinom pod pritiskom.

Kabeli se mogu na različite načine podijeliti također prema konstrukciji vodiča i zaštitnih plašteva.

Konstrukcija energetskih kabela. Kabeli se načelno sastoje od vodiča, njegove izolacije, zaslona ili ekrana, ispune, plašta i armature (sl. 20). U pojedinim vrstama kabela mogu neki od tih sastavnih dijelova i izostati, npr. armatura, zaslon ili ispuna.

Vodiči energetskih kabela izrađuju se od bakra ili aluminijuma. Bakreni vodiči koji su izolirani gumom prevlače se slojem kositra. To nije potrebno kad kao izolacija služi papir ili neki termoplastik.

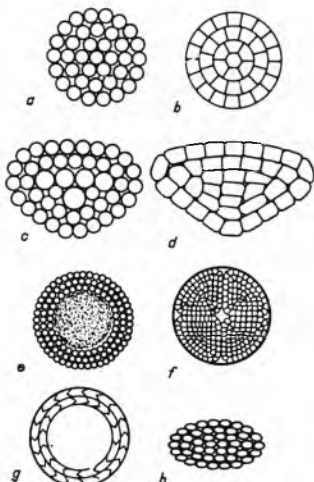


Sl. 20. Shematski prikaz sastavnih dijelova kabela

Na vodiče od aluminijuma ne postavljaju se nikakve galvanke prevlake. Vodiči do presjeka 10 mm² izrađuju se najčešće kao puni (kao jedna žica), za presjeke od 10 do 35 mm² upotrebljavaju se i puni vodiči i vodiči od više žica, vodiči presjeka većeg od 35 mm² izvođe se redovito od više žica. Iznimku čine aluminijumski vodiči tzv. solidal-kabelâ, koji se izrađuju kao puni i do 300 mm² (sl. 21). Oblik presjeka vodiča može biti npr. okrugli, sektorski ili šuplji (sl. 22). Sektorski presjek omogućava ekonomičniji raspored i manji vanjski promjer, a cijevni oblik tvori kanal za prolaz ulja. U energetskim kabelima upotrebljavaju se prema



Sl. 21. Solidal kabel koji se izrađuje s punim žilama od aluminijuma



Sl. 22. Presjeci vodiča. a) Troslojno koncentrično uže, b) kompaktno koncentrično troslojno uže, c) uže sektorskog presjeka, d) kompaktno uže sektorskog presjeka, e) prstenasti vodič (s kućinom u sredini), f) kompaktni segmentni vodič, g) šuplji vodič, h) ovalni vodič

jugoslavenskim standardima vodiči presjeka od 1,5 do 1000 mm². Radi poboljšanja faktora punjenja mogu se višezični vodiči još i posebno kompaktirati (v. str. 255 i sl. 22 b, d, f).

Izolacija služi za električno izoliranje vodiča. Ona se u kabelima za niže napone postavlja izravno na vodiče, a u kabelima za srednje i visoke napone tek preko vodljivog sloja za izravnjanje i izgladivanje površine vodiča (v. str. 260). Kao izolacija vodiča najčešće se upotrebljavaju u kabelima papir impregniran izolacionom masom ili natopljen izolacionim uljem (za sve napone do najviših), termoplastične mase (za napone do ~110 kV) i (danas rjeđe) elastomeri (umjetne i prirodne gume, za napone do 30 kV). Udio termoplastičnih masa stalno raste. Tabl. 5 pokazuje udio termoplastičnih masa i papira u kabelima različitih nazivnih napona proizvedenih u SR Njemačkoj 1966. g.

U tzv. pojasnim kabelima (v. str. 240) postavlja se preko već izoliranih vodiča još i dodatni pojasni sloj izolacije kao zajednička izolacija použenih žila prema zemlji.

Broj izoliranih žila kreće se u energetskim kabelima od 1 do 5. U kabelima za nazivne napone od 1 kV može biti i do 5 vodiča, pri čemu četvrti i peti vodič imaju ponekad smanjen presjek. Za napone od 3 do 35 kV primjenjuju se obično kabeli sa svega tri vodiča, a kabeli za najviše napone zbog velike debljine izolacije i velikog promjera izrađuju se najčešće samo s jednim vodičem. Signalni kabeli, koji također idu u energetske kabele, imaju i do 40 vodiča, ali presjek pojedinih vodiča ne prelazi 10 mm².

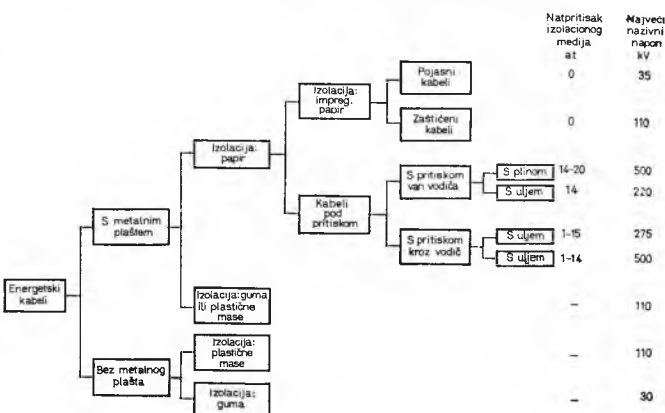
Zaslon ili ekran postavlja se u višezilnim kabelima za srednje i visoke nazivne napone preko izolacije pojedinih žila. To su trake od metaliziranog papira, vodljivih tkanina ili drugih vodljivih slojeva na potencijalu zemlje, koji imaju zadatak da oko vodiča stvore radijalno električno polje (v. str. 260) i time smanje mogućnost tinjanja. To su vrlo tanki slojevi, često od slabo vodljivih materijala koji ne mogu da odvedu struju greške u slučaju proboja, stoga su oni po cijeloj svojoj duljini spojeni s olovnom ili aluminijumskom plaštem koji preuzima taj zadatak. U kabelima s termoplastičnim plaštem mora se radi toga ispod plašta postaviti posebna bakarna traka.

Ispuna ispunjava u višezilnim kabelima žlijebove između pojedinih použenih izoliranih vodiča. Iznad izoliranih žila i ispune postavlja se još jedan ili više slojeva (plašt, armatura) koji služe zaštiti vodiča od vlage, kemijskih i mehaničkih utjecaja.

Plašt (omotač) je bečavna cijev, izrađena od olova, aluminijuma ili nekog termoplastičnog materijala, koja se postavlja preko izolirane žile ili skupa žila i ispune (u višezilnim kabelima) radi njihove zaštite od vanjskih utjecaja.

Armatura ili oklop kabela sačinjavaju metalne žice ili trake koje se mogu na više načina postaviti na plašt radi zaštite uglavnom od mehaničkih oštećenja (npr. pri polaganju kabela u zemlju). Da armatura ne bi oštetila plašt, između njih postavlja se unutarnji zaštitni sloj (posteljica). Iznad armature postavlja se još i vanjski zaštitni sloj koji služi kao antikorozijska zaštita armature.

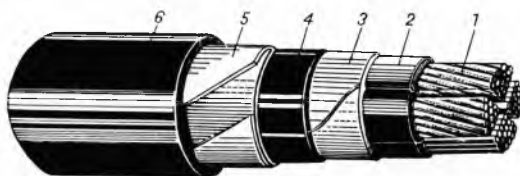
Izvedba nekih vrsta energetskih kabela. Energetski kabeli izrađuju se danas u velikom broju izvedaba koje zavise od nazivnog napona, uvjeta rada, smještajnih mogućnosti kabela i o ekonomskim okolnostima. Pregled kabela prema gradi daje sl. 23.



Sl. 23. Podjela energetskih kabela

Građa vodiča i njihove izolacije ovisi uglavnom o naponu za koji se kabel gradi, a konstrukcija zaštitnih slojeva o vanjskim utjecajima (mehaničkim, kemijskim, itd.) kojima će kabel biti izložen nakon polaganja. Ovdje će biti opisane samo neke najuobičajenije i najznačajnije izvedbe kabela.

Kabeli za napone do 1 kV izolirani termoplastičima izrađuju se obično s izolacijom od polivinilklorida, ispunom od gume ili polivinilklorida i plaštem od polivinilklorida. Po potrebi mogu se ti kabeli izvana još i armirati radi bolje mehaničke zaštite. U tom se slučaju radi zaštite od korozije postavlja još i vanjski plašt od polivinilklorida (sl. 24).



Sl. 24. Niskonaponski (do 1 kV) armirani PVC-kabel. 1 Vodiči, 2 izolacija od PVC-mase, 3 ispun, 4 PVC-plašt, 5 armatura od dvije hladno valjane čelične trake, 6 vanjski zaštitni PVC-plašt

Brodski kabeli služe za napone do 1 kV i prilagođeni su brodskim uvjetima. Vodiči se izrađuju i za najmanje presjeke kao uže od više žica, kako zbog vibracija ne bi na mjestima priključaka došlo do njihova loma. Kao izolacija i danas se upotrebljava pretežno gumena mješavina od koje se ponekad traži postojanost i na višim temperaturama. Samo rijetko je zamjenjuje polivinilklorid. Plašt se obično izrađuje od polikloroprena (Neoprena) ili specijalno teško zapaljive i prema ulju otporne gume. Radi mehaničke zaštite brodski se kabeli po potrebi oplicu tankim čeličnim pocinčanim žicama koje su premazane teško zapaljivim lakom.

Papirom izolirani kabeli za niske i srednje napone grade se na klasičan način. Zbog uvođenja kabela s izolacijom i plaštem od termoplastičnih materijala njihova se primjena u mrežama niskog napona znatno smanjila (v. tablicu 5). Međutim, oni se još uvijek pretežno primjenjuju u mrežama srednjih napona. Ovi se kabeli izrađuju u nekoliko izvedaba.

Tablica 5
IZOLACIONI MATERIJAL KABELA
PROIZVEDENIH U SR NJEMAČKOJ (1966)

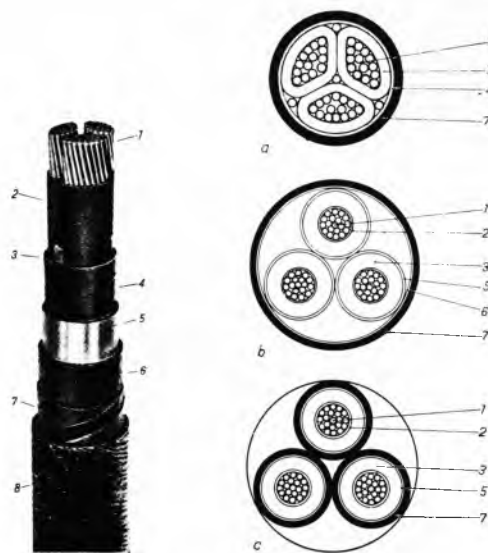
Izolacioni materijal	Udio u kabelima nazivnog napona, kV				
	0,6/1	3,5/6	5,8/10	8,7/15	17,3/30
Papir	5%	57%	87%	93%	93%
Termoplastične mase	95%	43%	13%	7%	7%

Pojasni kabeli su višezilni kabeli u kojima su pojedini vodiči izolirani impregniranim papirom, a oko svih použenih žila postavljena je zajednička pojasna izolacija od impregniranog papira radi izolacije žila prema metalnom plaštu i zemlji (sl. 25 i 26 a). U kabelima koji su predviđeni za nazivni napon 5,8/10 kV i viši prevlači se površina vodiča slabo vodljivim slojem (v. str. 260). Oblik električnog polja u ovakvim kabelima nije radijalan (v. sl. 85), što ograničuje njihovu primjenu, zbog pojave tinjanja, na nazivne napone do 35 kV.

H-kabeli su višezilni kabeli u kojima su vodiči nakon prevlačenja površine vodljivim slojem izolirani impregniranim papirom. Preko te izolacije postavljen je slabo vodljiv sloj (npr. od vodljivog papira) radi postizanja električnog polja radijalnog oblika, čime se sprečavaju prevelike jakosti polja, ionizacija, tinjavo izbijanje, karbonizacija izolacije i, konačno, proboj. Radi dobrog kontakta između tog zaslonkog sloja i metalnog plašta postavlja se oko použenih žila kontaktna traka protkana metalnim nitima (sl. 26 b). Ovi se kabeli zovu i hehšteterski ili H-kabeli, prema svom izumitelju M. Höchstädteru (1914).

Ako se oko svake izolirane žile višezilnog kabela postavi poseban metalni plašt, on djeluje kao zaslon pa se time postiže također radijalni oblik polja (sl. 26 c).

Obje vrste naprijed opisanih kabela po svojim su svojstvima otprilike jednake. Za brdovit teren prikladniji su kabeli s metalnim plaštevima jer je u njima otežano curenje ulja kojim je impregniran papir. Objе vrste kabela izrađuju se za napone od 10 do 110 kV.



Sl. 25. Pojasni kabel. 1 Vodiči, 2 papična izolacija, 3 ispun, 4 pojasna izolacija, 5 metalni plašt, 6 unutarnji zaštitni sloj, 7 armatura, 8 vanjski zaštitni sloj

Sl. 26. Shematski prikaz presjeka pojasnog kabela (a), H-kabela (b) i kabela s metalnim plaštem oko svake žile (c). 1 Vodiči, 2 izravnanje površine vodiča, 3 izolacija vodiča, 4 pojasna izolacija, 5 zaslonki (ekran), 6 kontaktna traka, 7 metalni plašt

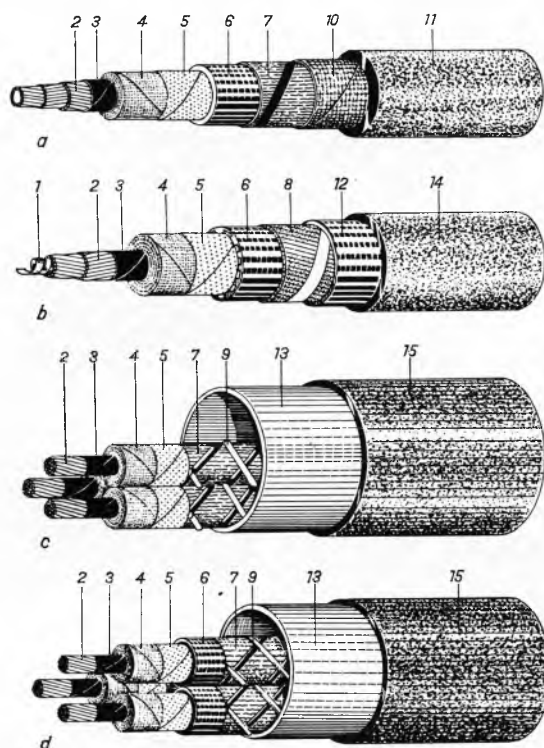
Papirom izolirani kabeli za visoke i najviše napone. Pri proizvodnji papirom izoliranih kabela ne može se ni uz najveću pažnju spriječiti stvaranje sitnih šupljina u slojevima papirne izolacije. Ulje kojim se izolacija natapa često ne ispunjava ove šupljine. Zbog širenja i stezanja vodiča i izolacije pri povećanju i smanjenju opterećenja, papirna se izolacija i olabavljuje, pa se time postojeće šupljine još povećavaju. U tim tzv. vakuolama nalazi se obično plin pod smanjenim pritiskom, pa zbog jakih električnih polja dolazi u njima do ionizacije i tinjavog izbijanja (v. *Električna pražnjenja u plinovima*, TE 3, str. 683). Tinjanjem se postepeno razara izolacija, pa može konačno doći i do njezina proboja. Stoga se u visokonaponskim kabelima tinjanje nastoji spriječiti.

Tinjanje je ovisno o jakosti polja i o pritisku plina. Ono je pri istoj jakosti polja najjače pod malim pritiskom; s povišenjem pritiska postepeno se smanjuje, a pri određenom višem pritisku potpuno nestaje. Tinjanje se može dakle spriječiti smanjenjem jakosti polja ili povećanjem pritiska plina u šupljinama. S obzirom na to da je prvo rješenje neekonomično jer zahtijeva znatno povećanje dimenzija kabela, pribjegava se u proizvodnji kabela drugom rješenju. Povećanje pritiska u izolaciji kabela postiže se bilo s pomoću ulja bilo s pomoću plina pod pritiskom. Ako se pritisak izvodi kroz samu srž kabela, govori se o kabelima s unutarnjim pritiskom, ako se, pak, pritisak prenosi na plaštevе pojedinih vodiča izvana, to su kabeli s pritiskom van vodiča ili membranski kabeli.

Neki podaci za papirom izolirane kabele dati su u tabl. 6. Uljni visokonaponski kabeli izrađuju se u više varijanata. U uljnim niskopritisnim kabelima primjenjuje se kao sredstvo za prijem pritiska izolaciono ulje malog viskoziteta. Oni rade s pogonskim natpritisnom 0,3...6 at, koji se održava na stalnoj vrijednosti s pomoću pritisnih ekspanzionih posuda, bocama i eventualno kompresorima koji se postavljaju na oba kraja jednog kabelskog odsjeka duljine do 4 km. One preuzimaju u sebe ulje kad se ono širi pri povišenju vanjske temperature ili zbog opterećenja.

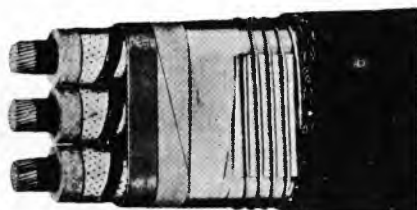
U jednožilnim uljnim niskopritisnim kabelima služi šuplji vodič (sl. 27 a) kao kanal za prolaz ulja. Da bi olovni plašt mogao izdržati stalni natpritisak, on se izvana pojačava žičanom banda-

žom od tvrdog bakra ili nemagnetskog čelika. Ovi kabeli grade se za nazivne napone do 220/380 kV.



Sl. 27. Uljni kabeli. *a* Jednožilni uljni kabel za niski pritisak, *b* jednožilni uljni kabel za visoki pritisak, *c* uljni kabel za visoki pritisak u čeličnoj cijevi, *d* uljni kabel za vanjski pritisak u čeličnoj cijevi; 1 potporna spirala vodiča, 2 vodič, 3 sloj za izravnivanje površine, 4 izolacija od papira, 5 zaslon, 6 plašt od olova, 7 bandža od očađavljenog papira i bakarna traka za preuzimanje pritiska, 8 armatura od bronz, 9 klizna žica, 10 bitumenom impregnirani papir, 11 vanjski PVC-plašt, 12 drugi plašt od olova, 13 čelična cijev, 14 vanjski zaštitni sloj od PVC, 15 zaštita protiv korozije

Trožilni niskopritisni uljni kabeli slični su po konstrukciji zaštićenim ili H-kabelima. Ulje u njima cirkulira u kanalima između žila. Ako je plašt od olova, on mora imati dodatnu bandžu da izdrži natpritisak, ako je od aluminijuma, on ne treba bandže, a nisu mu potrebni ni kanali za ulje jer je plašt izrađen valovito. Ovi kabeli izrađuju se za napone do 64/110 kV. Posebnu vrstu uljnih kabela predstavljaju tzv. Møllerhøj-kabeli, koji su plosni (sl. 28) i vrlo prikladni za polaganje u more. Oni se izrađuju za nazivne napone do 64/110 kV.



Sl. 28. Møllerhøjev plosni uljni kabel

Uljni visokopritisni kabeli rade pri natpritisaku od 10...25 at, a izvede se kao jedno- i trožilni kabeli. Po konstrukciji oni su slični niskopritisnim kabelima, samo je plašt od olova ili aluminijuma prilagođen višem pritisku. Olovni se plaševi pojačavaju obično dvjema bandžama od nemagnetskog čelika ili armaturom od bronz (sl. 27 b). Ovi se kabeli izrađuju za nazivne napone do 220/380 kV.

Visokopritisni uljni kabeli u čeličnoj cijevi sigurniji su u pogonu. Nepoužene žile okružene kliznom žicom uvlače se naknadno u već položene čelične cijevi duljine i do 800 m koje su varenjem sastavljene od komada dugih svega 12 m. Ovakvi kabeli

Tablica 6

VANJSKI PROMJERI I MASE ARMIRANIH KABELA IZOLIRANIH PAPIROM

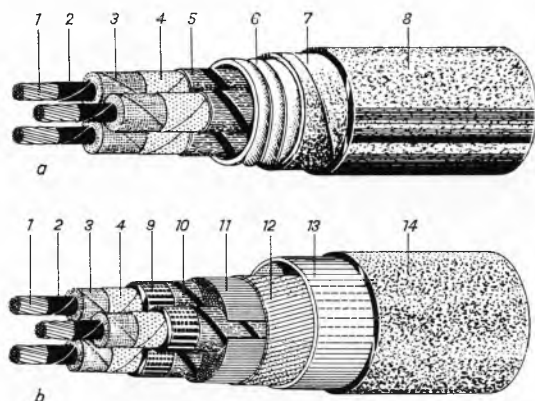
Presjek mm ²	Kabel IPO 13 za 1 kV (pojasni kabel)							
	Jednožilni		Dvožilni		Trožilni		Četverožilni	
	mm	kg/m	mm	kg/m	mm	kg/m	mm	kg/m
1,5	14	0,51	17	0,76	18	0,88	19	0,96
2,5	14	0,55	18	0,85	19	0,98	19	1,08
4	15	0,61	19	0,95	19	1,11	21	1,24
5	15	0,66	20	1,05	20	1,26	22	1,40
10	16	0,75	21	1,25	22	1,50	24	1,75
16	17	0,88	23	1,60	24	1,80	26	2,20
25	20	1,25	25	1,85	27	2,40	29	2,80
35	21	1,40	26	2,20	29	2,80	32	3,50
50	23	1,70	29	2,70	31	3,60	35	4,40
70	25	2,05	30	3,20	34	4,40	39	5,50
95	27	2,50	33	3,90	38	5,50	44	7,40
120	28	2,80	36	4,80	42	6,90	47	8,75
150	30	3,20	40	5,80	46	8,40	52	10,70
185	33	3,90	45	7,60	51	9,80	56	12,70
240	35	4,70	49	9,30	57	12,30	64	16,30
300	38	5,50	54	11,40	61	15,10	71	20,20

Presjek mm ²	Trožilni kabel IPO 13 s olovnim plaštem (pojasni kabel)				Trožilni kabel IPZO 13 s tri olovna plašta (zaštićeni kabel)			
	6 kV		10 kV		30 kV		35 kV	
	mm	kg/m	mm	kg/m	mm	kg/m	mm	kg/m
6	29	2,2	—	—	—	—	—	—
10	31	2,5	33	2,9	—	—	—	—
16	33	3,0	35	3,3	—	—	—	—
25	34	3,4	38	3,9	—	—	—	—
35	37	4,0	40	4,7	67	9,8	74	10,7
50	40	5,1	43	5,6	73	11,2	77	12,3
70	44	6,2	46	6,6	77	12,8	80	13,5
95	47	7,3	50	8,0	81	14,2	84	15,4
120	50	8,5	52	9,2	84	15,6	87	17,4
150	53	9,9	56	10,5	88	17,5	95	19,0
185	56	11,5	59	12,0	92	19,2	96	20,8
240	62	14,0	64	14,7	98	22,3	102	25,0
300	68	17,3	70	18,2	103	25,0	109	28,7

s unutarnjim pritiskom oko izolacije nemaju plašt (sl. 27 c), pune se uljem većeg viskoziteta, a rade s natpritisakom od ~15 at. Oni se izrađuju za nazivne napone do 220/380 kV.

U uljnim kabelima s vanjskim pritiskom postavljen je preko izolacije (obično ovalnih) žila olovni plašt koji djeluje kao membrana (sl. 27 d) na koju izvana pritišće tlačno ulje.

Plinski kabeli. Kao sredstvo za prijenos pritiska služi u njima neki neutralan plin, obično dušik. Ovi kabeli rade s unutarnjim pritiskom od ~15 at koji se ostvaruje s pomoću boca. Duljine pojedinih dionica takvih kabela mogu biti znatno veće. Izolacija



Sl. 29. Plinski kabeli. *a* Kabel s unutarnjim pritiskom, *b* kabel u čeličnoj cijevi s vanjskim pritiskom; 1 vodič, 2 sloj za izravnivanje površine, 3 izolacija od papira, 4 zaslon od metaliziranog papira, 5 očađavljeni papir i bakrena traka, 6 valoviti aluminijumski plašt, 7 zaštitni sloj protiv korozije, 8 vanjski zaštitni sloj od PVC, 9 plašt od olova, 10 bandža za preuzimanje pritiska, 11 ispuna, 12 armatura od čelične žice, 13 čelična cijev, 14 zaštita protiv korozije od staklenog tkiva natopljenog bitumenom

natopljena im je masom koja je slična masi običnih kabela. Okrugli ili, još češće, ovalni vodiči okruženi su slojem za izravnjanje površine, a izolirani su papirom na kome se nalazi zaslon od metaliziranog papira. Oko vodiča, koji su smješteni u zajednički plašt od olova ili aluminijuma, postavljena je spirala radi bolje cirkulacije plina (sl. 29 a).

Plinski kabeli u čeličnoj cijevi izrađeni su slično kao i uljni kabeli u čeličnoj cijevi (sl. 29 b). U plinskim kabelima s vanjskim pritiskom pojedine žile prevučene su olovnom plaštem; plin koji se nalazi između tih prevlaka i vanjskog plašta izvodi pritiskom na plašteve oko žila, pa oni djeluju kao fleksibilne membrane.

Odabiranje kabela. Pod odabiranjem kabela razumijeva se izbor tipa kabela i određivanje presjeka njegovih vodiča.

Izbor tipa kabela. Tip kabela treba odabrati prema namjeni mreže i uvjetima pod kojima će kabel raditi. Konstrukcije pojedinih tipova kabela prilagođene su načinu njegove eksploatacije. Tako postoje kabeli koji su predviđeni za polaganje u zemlju i vodu ili za postavljanje na otvorenom prostoru, nadalje za primjenu pod posebnim klimatskim i temperaturnim uvjetima (npr. na brodovima, u tropskoj klimi, itd.) i koji su posebno pojačani za dodatna mehanička opterećenja (npr. u rudnicima pri kosom ili vertikalnom postavljanju i sl.). Na izbor tipa kabela ima utjecaja i izbor tipa mreže, sigurnost rada, tehničko-ekonomski razlozi, a eventualno i neki estetski i slični momenti. Odabrani tip kabela mora biti najjeftiniji, a da pri tome još odgovara uvjetima koji vladaju na trasi.

Sl. 30 pokazuje koji se tipovi kabela mogu primjenjivati za pojedine pogonske napone.

Nazivni napon	1	3	6	10	15	20	30	45	60	110	220	380	kV
Kabel izoliran gumom													
Pojasni kabel													
Kabel izoliran PVC-om													
plastičnim masama. PE-om													
H-kabel (ekraniziran)													
Kabel s metalnim plaštom oko svake žile													
Kabel spinom pod pritiskom													
Uljni kabel													
Kabel za visoki istosmjerni napon													

Sl. 30. Tipovi kabela u ovisnosti o pogonskom naponu

U tablicama 7 i 8 dati su tipovi nekih kabela koji mogu doći u obzir za distributivne mreže, za industrijske pogone, elektrane i sl.

Izbor presjeka vodiča kabela. Pri tom izboru treba poznavati nazivnu snagu, napon i $\cos \varphi$ trošila. Ako se grupa trošila napaja zajedničkim kabelom, treba izračunati vršno opterećenje te grupe. Presjek se određuje na osnovi dozvoljenog opterećenja vodiča, koje ovisi o utjecaju okoline i vrste opterećenja, o dozvoljenom padu napona (koji je propisan za pojedine primjene) i o graničnom zagrijavanju kabela pri dozvoljenom trajanju struje kratkog spoja koja se može pojaviti u slučaju kvara. Za duge kabele i kabele za prijenos velike snage treba uzeti u obzir i gubitak energije u samom kabelu i utvrditi ekonomični presjek vodiča.

Dozvoljeno strujno opterećenje. Dio električne energije koja se kabelom prenosi u samom se kabelu pretvara u toplinsku energiju. Na izvjesnoj temperaturi uspostavlja se pri određenju struji toplinska ravnoteža između razvijene i odvođene topline. Do odvođenja topline dolazi jer je kabel smješten u mediju kojemu je temperatura niža od temperature vodiča u pogonu. Odvođenje topline ovisi o dimenziji i konstrukciji kabela, o temperaturi medija u koji je kabel položen i o toplinskom otporu (recipročnoj vrijednosti toplinske vodljivosti) tog medija.

U toku normalnog pogona kabela, toplina se razvija u vodičima i u izolaciji, a pri izmjeničnoj struji zbog djelovanja elektromagnetskog polja još i u vodljivim slojevima (ekranima), metalnom plaštu i armaturi. Količina razvijene topline ovisi dakle o konstrukciji kabela, o jakosti i vrsti električne struje i o naponu.

Tablica 7
TIPOVI KABELA ZA JAVNE DISTRIBUTIVNE MREŽE

Za linijski napon	Oznaka		Namjena
	JUS	VDE	
do 1 kV	PP 40 PP 00 IPO 13 —	NYCY NYY NKBA NKL/Y/Y/PR	za kabelsku mrežu
	PP40 IPO 13 PP 00/0	NYCY NKBA YTY	za kućne priključke samonosivi kabel
	PP 00 PP 40 PP 00/0	NYY NYCY YMT	za javnu rasvjetu
10 kV	IPO 13	NKBA	za kabelsku mrežu
35 kV	IPZO 13 IPO 4	NHEKBA NHKY	za kabelsku mrežu

Tablica 8
TIPOVI KABELA ZA ELEKTRANE, RASKLOPNA POSTROJENJA I INDUSTRIJSKE POGONE

Za linijski napon	Oznaka		Namjena
	JUS	VDE	
do 1 kV	PP 00 IPO 10 IPO 20 (IPO 13)	NYY NKB NKB (NKBA)	Naročito pogodan za kemijsku industriju za polaganje u zrak za polaganje u zrak za polaganje u zemlju
10 kV	PP 45 PP 47 IPO 10 (IPO 13)	NYFGbY NYCY NKB (NKBA)	za polaganje u zrak za polaganje u zemlju
35 kV	IPZO 10 IPZO 20 IPO 04 (IPZ 13) (IPZO 23)	NHEKB NHEKR NHKY (NHEKBA) (NHKRA)	za polaganje u zemlju za polaganje u zemlju

Najveća struja kojom se smije trajno opteretiti kabel a da ne dođe do prevelikog ugrijavanja iznosi:

$$I_t = C_n \cdot I_n,$$

gdje znači C_n faktor utjecaja okoline i vrste opterećenja kabela, a I_n dozvoljeno strujno opterećenje za odgovarajući tip, presjek i napon kabela. Podaci za dozvoljeno strujno opterećenje mogu se naći u tablicama koje sadrže elektrotehnički priručnici. Grafički prikaz najvećih dozvoljenih struja za nekoliko tipova kabela dati su na sl. 31 a do c. U tim tablicama uzima se kao temperatura okoline obično 20 ili 30 °C, kao specifični toplinski otpor izolacije i zaštitnih slojeva 550–600 °C cm/W, a dozvoljene se nadtemperature kreću za razne tipove kabela između 35 i 50 °C.

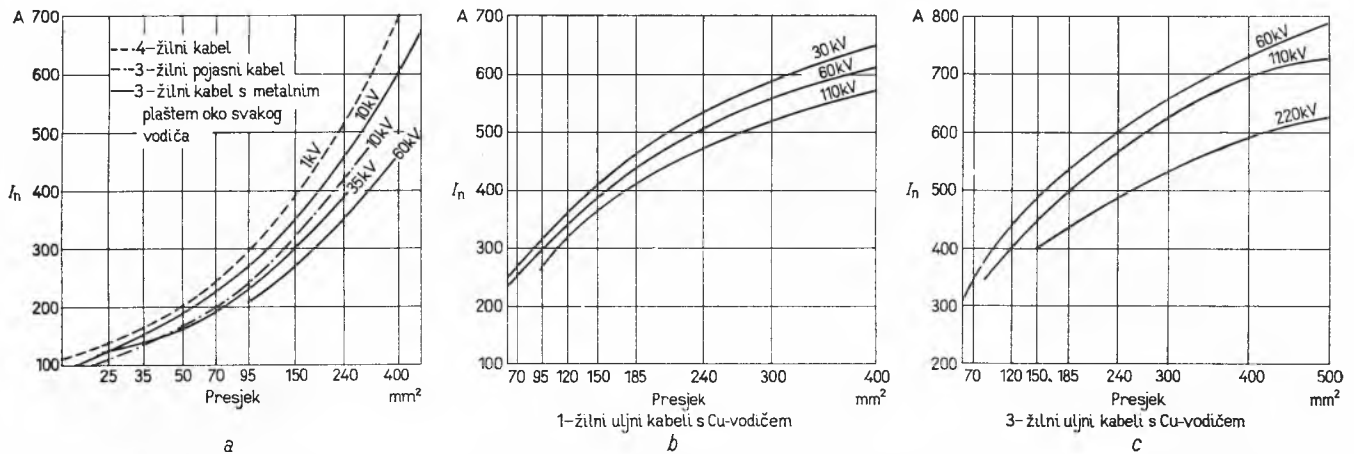
Faktor utjecaja okoline C_n umnožak je više faktora:

$$C_n = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4,$$

gdje znači C_1 utjecaj temperature okoline, C_2 utjecaj drugih paralelno položenih kabela, C_3 utjecaj toplinskog otpora medija u koji je kabel položen i C_4 utjecaj trajanja i veličine opterećenja.

Ako je temperatura zemlje ili zraka različita od 20 °C, primjenjuju se za iznos C_1 korekcionni faktori iz tabl. 9. Najviše trajne temperature u dubini 0,7–0,8 m iznose npr. u Evropi prosječno 20 °C, u Africi 25 °C, u Sj. Americi 20 °C, u Moskvi 14,4 °C, u Indiji 25–35 °C.

Paralelno položeni kabeli djeluju jedni na druge tako da se smanjuje mogućnost odvođenja topline. Zbog toga mora najveća struja kojom se smije trajno opteretiti kabel položen paralelno s drugim kabelom biti manja od dozvoljenog strujnog opterećenja pojedinačno položenog kabela. Ova se činjenica uzima u obzir



Sl. 31. Dozvoljeno strujno opterećenje nekih vrsta kabela: a niskonaponskih, pojasnih i kabela s više metalnih plaštova; b jednožilnog uljnog kabela, c trožilnog uljnog kabela

primjenom korekturnog faktora C_2 . Iznos tog faktora ovisi o broju kabela, o njihovom razmaku i o mjestu polaganja (u rovu, u kanalu, na zraku). Faktor C_2 može se naći u preporukama, propisima i priručnicima. On se obično kreće između 1 i 0,8, a u ekstremnim slučajevima može iznositi 0,5.

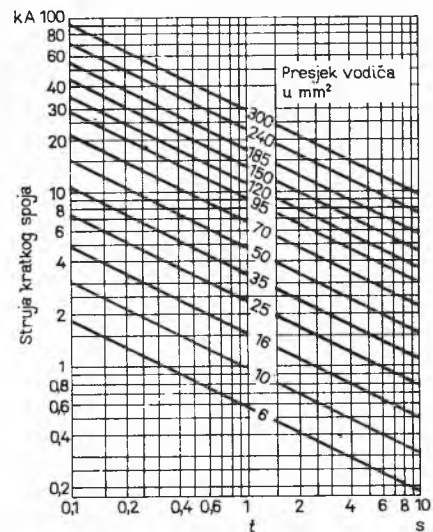
Ako specifični toplinski otpor medija u kome je položen kabel odstupa od 70°C cm/W treba to uzeti u obzir primjenom korekcionog faktora C_3 (tabl. 10).

Za kabele položene u kanale vrijede drugi faktori.

Ako opterećenje kabela varira u toku rada, ugrijavanje vodiča u svakom trenutku ovisit će o iznosu opterećenja. Prema tome, ako je kabel trajno opterećen strujom manjom od dozvoljene ili je neko vrijeme bio izvan pogona, moći će izdržati kroz određeno vrijeme i veća opterećenja od dozvoljenih, bez opasnosti da temperatura vodiča naraste na vrijednost višu od propisane. Dozvoljeno povećanje opterećenja pri kratkotrajnom ili isprekidanom pogonu uzima se u obzir primjenom faktora C_4 .

Struja kratkog spoja koja protječe vodičem kabela mahom je znatno veća od dozvoljenog strujnog opterećenja. Velika struja prouzrokuje naglo povišenje temperature vodiča, što može izazvati kvar ili probij izolacije kabela. Temperatura do koje se smiju ugrijati vodiči strujom kratkog spoja određena je standardima i propisima, ili podacima proizvođača. Ona je redovito znatno viša od temperature dozvoljene pri trajnom radu. Za kabele do

3 kV dozvoljava se maksimalna temperatura vodiča 160°C , za kabele do 10 kV 120°C , a za kabele do 35 kV 100°C , itd. Struja kratkog spoja mora se prekinuti prije nego što temperatura dostigne najveću dozvoljenu vrijednost. To se postiže izborom prikladne zaštite. Vrijeme do prekida očitava se za pojedine vrste kabela u dijagramima koji su izračunati uz pretpostavku da je vodič već zagrijan nazivnom strujom, npr., do 65°C (sl. 32).



Sl. 32. Dopušteno trajanje (t) struje kratkog spoja za kabele 6...10 kV (prema podacima tvornice FKS)

Tablica 9
KOREKCIONI FAKTOR C_1 ZA KABELE POLOŽENE U ZEMLJU

Temperatura okolice $^\circ\text{C}$	Papirom izolirani kabele			Kabele izolirani plastičnom masom	
	≤ 6 kV	10...20 kV	30...60 kV	≤ 6 kV	10...20 kV
5	1,15	1,20	1,26	1,14	1,17
10	1,10	1,13	1,18	1,09	1,12
15	1,05	1,07	1,10	1,05	1,06
20	1	1	1	1	1
25	0,94	0,93	0,90	0,95	0,93
30	0,88	0,85	0,78	0,89	0,86
35	0,82	0,76	0,63	0,84	0,79
40	0,75	0,65	0,45	0,77	0,71
45	0,67	0,54	—	0,77	0,61
50	0,58	0,38	—	0,63	0,50

Tablica 10
KOREKCIONI FAKTOR C_3 ZA KABELE POLOŽENE U ROV

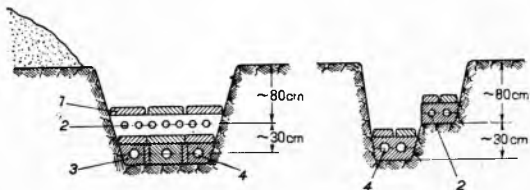
Medij	Specifični toplinski otpor $^\circ\text{C cm}$ W	Korekcionni faktor	
		≤ 10 kV	15...35 kV
Šljaka, suha	550	0,43	0,50
Pijesak, suh	310	0,57	0,63
Pijesak, vlažan	55	1,07	1,05
Zemlja, pjeskovita suha	95	0,90	0,93
Zemlja, vlažna	40	1,70	1,11
Stijena, kamen (granit)	35	1,22	1,13
Krečnjak	60	1,05	1,03

Polaganje, spajanje i završavanje kabela. Energetski i telekomunikacioni kabele mogu se položiti izravno u zemlju (u iskopani rov), uvući u prethodno izgrađene kabelske cijevi, postaviti u prostorijama, kabelskim kanalima i na otvorenom na police ili nosače, ili razapeti u zraku između ovjesišta na zgradama ili stupovima. Radi prelaza preko mora ili jezera kabele se polažu u vodu izravno na dno uz povećanu zaštitu na obali.

Prilikom polaganja ne smiju se oštetiti izolacioni i zaštitni slojevi. Prejako savijanje kabela (do vrlo malih polumjera zakrivljenosti) može izazvati oštećenje kabela. Polumjeri zakrivljenosti propisani su za pojedine vrste kabela, a kreću se između 8 i 35 vanjskih polumjera kabela. Pri polaganju treba, nadalje, voditi računa o temperaturi okoline. Najniža temperatura na kojoj se još smije kabel odmatati s bubnja i savijati propisana je za svaku vrstu kabela, a kreće se između $+5^\circ\text{C}$ i -20°C . Ako se kabel mora polagati pri temperaturama nižim od dozvoljene, treba ga prethodno ugrijati u toploj prostoriji ili električnim opterećenjem vodiča.

Polaganje kabela u iskopani rov primjenjuje se najčešće. Dubina rova ovisi o vrsti kabela, a širina o broju kabela. Energetski kabele

niskog napona polažu se na dubini od 70 do 80 cm, kabeli srednjih napona na ~90 cm, a kabeli visokih i najviših napona na nešto preko 1 m (sl. 33). Telekomunikacioni kabeli polažu se na dubinama od 40 do 80 cm. Što je kabel zakopan dublje to je manja vjerojatnost njegova oštećenja. Razmaci položenih energetskih



Sl. 33. Kabelski rov sa slojnim i stepenastim rasporedom kabela u njemu. 1 Opeke, 2 niskonaponski kabel, 3 pijesak ili zemlja bez kamenja, 4 visokonaponski kabeli

kabela propisani su i treba, već prema vrsti kabela, da iznose 7...30 cm. Telekomunikacioni kabeli mogu se polagati neposredno jedan do drugog, a razmaci između signalnih, energetskih i telekomunikacionih kabela treba, već prema vrsti energetskog kabela, da iznose 5...100 cm, gdje se najveći razmak odnosi na kabel nazivnog napona 10 kV i većeg.

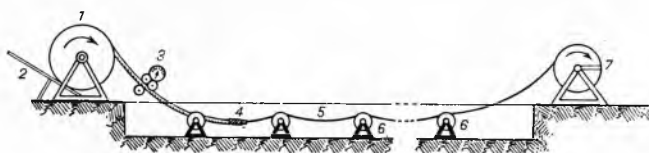
Za kopanje rovova primjenjuju se danas obično mehanizirana sredstva kao hidraulički bageri, samohodni lančani kopači i specijalni plugovi. Ako pri kopanju treba rušiti slojeve betona, asfalta ili kamena, mogu se primijeniti ručni vibratori i kružne motorne pile s pločom od silicijum-karbida (karborunduma). Iz rova treba



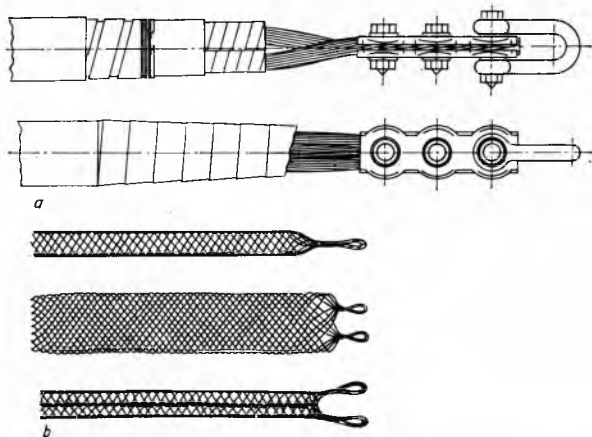
Sl. 34. Različni načini prekrivanja kabela u rovu

odstraniti oštro kamenje i dno poravnati, a zatim nasipati oko 10 cm debeli sloj pijeska na koji se polaže kabel. Položeni se kabel obično prekriva slojem od ~10 cm pijeska, preko kojega se stavlja opeka ili poseban pokrov kao zaštita od mehaničkih oštećenja. Različite mogućnosti prekrivanja položenog kabela pokazuje sl. 34. Pijesak koji okružuje kabel ublažuje eventualne udarce i služi za odvođenje topline. Po završenom polaganju i prekrivanju kabela preostali se otvor rova popunjava zemljom i ona se nabija nabijačima.

Polaganje kabela u rov provodi se obično s bubnja koji je okretljivo smješten na posebnim nogarima ili specijalnom vozilu.

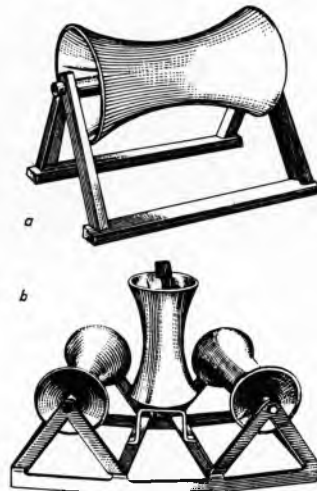


Sl. 35. Shematski prikaz polaganja kabela u rov. 1 Kabelski bubanj, 2 kočnica, 3 dinamometar, 4 stremen ili natezna čarapa, 5 čelično uže, 6 koturi, 7 vitlo



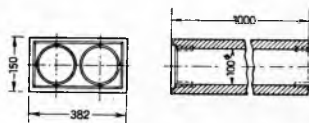
Sl. 36. Streman (a) i natezne čarapice (b) za vučenje kabela

Kabel se s bubnja povlači ručno, s pomoću vitla ili s pomoću traktora (sl. 35). Početak kabela na kome je postavljen stremen ili natezna čarapica (sl. 36) spoji se za čelično uže koje se vodi duž rova do (ručnog ili motornog) vitla ili do traktora. Duž rova, na oštrim rubovima i na zavojima, postavljaju se koturi (valjci) po kojima klizi kabel. Oni mogu biti ravni (sl. 37a) ili kutni (sl. 37b). Sila vuče F ne smije preći određenu vrijednost koja ovisi o vrsti kabela i njegovom vanjskom promjeru D . Ona iznosi $F = 0,33 \dots 1,3 D^2$, gdje je F u kp, a D u mm². U toku polaganja sila se kontrolira dinamometrom. Kad je cijela fabrikaciona duljina položena, u produžetku polaže se druga, a oba se komada kabela spajaju.

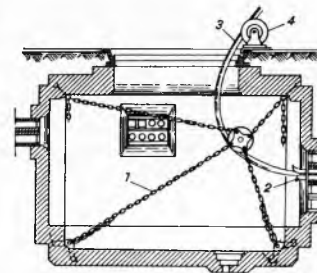


Sl. 37. Koturi za vođenje kabela: a ravni, b kutni

Polaganje kabela u cijevi. Ponekad se kabeli uvlače u prethodno izgrađene kanale promjera 40...100 mm. Ovi kanali sastoje se obično od betonskih blokova sa 1...4 otvora (sl. 38).



Sl. 38. Betonski blokovi za kabelsku kanalizaciju



Sl. 39. Kabelski zdenac. 1 Lanci za držanje kotura, 2 štitnik, 3 kabel, 4 ravni kotur

Kanali su dugački obično 100...200 m i završavaju u kabelskim zdcima (sl. 39) u kojima se nalaze i kabelske spojnice. Prednost je ovog načina polaganja što je lakša izmjena kabela i opravka grešaka, nedostatak što su veći troškovi prve izgradnje i što je odvod topline slabiji, pa je dozvoljeno opterećenje kabela manje. Ovaj se način često primjenjuje za polaganje telefonskih kabela u gradovima, gdje se kabeli često mijenjaju, a kopanje je rovova otežano i skupo. Kabeli koji se polažu u cijevi ne treba da budu armirani. Oni se uvlače na sličan način kao što je to opisano pri polaganju u rovovima (v. sl. 35).

U cijevi se polažu kabeli i tamo gdje treba kabelima proći npr. ispod saobraćajnica na kojima nije moguće zaustaviti saobraćaj (autostrade, željeznica i sl.). U tom se slučaju rupe do duljine od 80 m mogu izdubiti s pomoću hidrauličke preše. Čelični trn gura se s pomoću čelične cijevi, koja se sastavlja od komada duljine 1 m, kroz zemljište ispod saobraćajnica. Kad je na taj način predbušenje završeno, učvrsti se na drugoj strani na početak cijevi veći trn za dubenje u obratnom smjeru i proširenje već izdubene rupe. Na trn se učvrsti i čelična kabelska zaštitna cijev. Sada se cijeli skup cijevi vuče natrag sve dok zaštitna cijev (promjera i do 200 mm) nije uvučena ispod saobraćajnice. U zaštitnu cijev stavlja se čelično uvlačno uže, a može se istovremeno s njome uvlačiti i kabel. Nedostatak je tih cijevi slabo hlađenje. Stoga se one ponekad pune uljem ili pijeskom koji se u njih ubrizgava.

Preporuke i propisi u pojedinim zemljama tačno propisuju kako treba zaštititi energetske kabele kad se oni križaju ili paralelno polažu s telekomunikacionim kabelima ili kad su položeni uz električne pruge ili autoputeve. Kao primjer slijedi propis VDE 0100/1965, u kome EK znači energetski kabel a TK telekomunikacioni kabel.

Na križanju EK s TK mora EK biti u svakom slučaju zaštićen prekrivalom u obliku poklopca ili ploče, odnosno uvučen u cijev od nezapaljivog materijala. Ako je EK položen iznad TK na udaljenosti manjoj od 0,3 m od TK, EK mora u pravcu prema TK biti zaštićen uvlačenjem u cijev ili pločama od nezapaljivog materijala. Zaštita mora sezati 0,5 m od križanja na svaku stranu.

Pri paralelnom polaganju treba nastojati da se postigne što veći razmak između EK i TK. EK, ako se polažu pored TK na udaljenosti manjoj od 0,3 m, moraju se na strani prema TK zaštititi pločama, poklopcima ili cijevima od nezapaljivog materijala. TK moraju se zaštititi pločama, poklopcima ili cijevima kada se polažu do 0,3 m iznad EK. Zaštita mora sezati 0,5 m od početka odnosno kraja paralelnog polaganja.

EK mora biti položen najmanje 0,3 m od dijelova nadzemnih TT uređaja postavljenih pod zemljom. Kad je razmak manji od 0,8 m, mora se EK zaštititi pločama, poklopcima ili uvlačenjem u cijev.

Ako EK prolazi kroz dijelove uzemljenja konstrukcija i sl. nadzemnih TT uređaja ili između njih, kabel se mora zaštititi pločama, poklopcima ili uvlačenjem u cijev. Tom prilikom ne smije se narušiti statička stabilnost. TK uvučen u kabelski kanal smatra se dovoljno zaštićenim.

Prilikom križanja EK sa kabelima za vuču ili signalizaciju uz željezničke pruge ili autoputeve EK mora biti uvučen u cijev ili kanal koji će sezati najmanje 0,5 m preko donjeg stroja pruge ili ceste. EK mora biti najmanje 0,3 m ispod ili iznad kabela koji služe za upravljanje saobraćajem ili za vuču, i uvučen u cijev od nezapaljivog materijala. Zaštita mora sezati 0,5 m na svaku stranu.

Pri paralelnom polaganju EK koji se polaže na udaljenosti manjoj od 0,3 m prema kabelima za upravljanje saobraćajem ili vuču moraju se zaštititi polaganjem u kanale ili cijevi od nezapaljivog materijala. EK mora biti položen najmanje 0,3 m od dijelova uređaja za upravljanje saobraćajem ili za vuču koji leže pod zemljom. Ako je razmak manji od 0,8 m, mora se EK zaštititi pločama, poklopcima ili uvlačenjem u cijev. Zaštita mora sezati 0,5 m od početka odnosno kraja paralelnog polaganja.

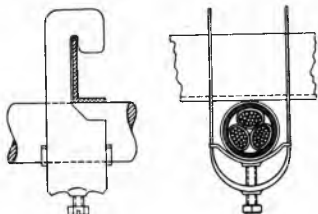
Općenito se ispod pruge i ceste svi kabeli moraju položiti tako da se mogu izvući bez kopanja ispod površine pruge i ceste. Gornji rub cijevi u koju se uvlači kabel mora biti udaljen najmanje 1 m od donjeg ruba tračnica ili ceste. Položaj energetskog kabela mora biti trajno obilježen.

Otvoreno polaganje kabela izvodi se u elektranama, tvornicama, uz željeznicu, u željezničkim tunelima, u zgradama telefonskih centrala i na sličnim mjestima. Za polaganje kabela služe u tom slučaju npr. podrumske prostorije, kabelski hodnici i kanali te pod, zidovi i strop prostorija, npr. tvorničkih hala. Za nošenje



Sl. 40. Kabelske police

kabela služe posebne police (sl. 40) ili nosači i držači različitih oblika (sl. 41). Jednožilni energetski kabeli polažu se na nosače od nemagnetskog materijala (drveta, bronzne itd.). Plašt kabela

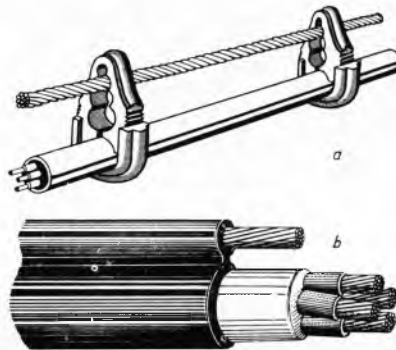


Sl. 41. Kabelske obujmice za učvršćenje kabela na metalnu konstrukciju

ne smije biti u izravnom dodiru s nosačima. Razmak između nosača, police i držača ne smije biti prevelik, da ne bi došlo do suviše velikog provjesa, a niti premali, da zbog trenja prilikom dilatacije kabela ne dođe do prevelikih napreznja. Optimum razmaka

ovisi o vrsti i krutosti (armaturi) kabela, a iznosi 18 do 24 promjera. Obično se kreće između 60 i 80 cm.

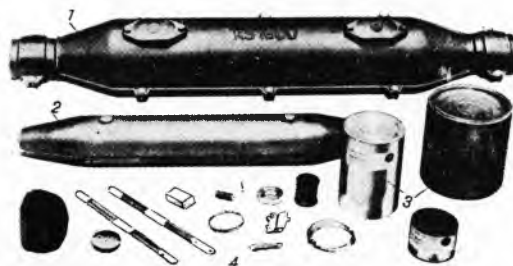
Kabeli mogu se postaviti i nad zemljom razapeti između stupova ili zgrada. Kabeli obične konstrukcije vješaju se s pomoću kuka ili držača (sl. 42 a) na razapeto čelično uže. Tzv. samo-



Sl. 42. Postavljanje kabela nad zemljom: a ovješnje kabela na čelično uže s pomoću držača, b samonoseći kabel s ugrađenim čeličnim užetom

nosivi kabeli imaju već ugrađeno uže (sl. 42 b) i izravno se razapinju između ovjesišta. Taj se način polaganja kabela upotrebljava u predgrađima i malim mjestima za telefonske i energetske kabele manje snage.

Spajanje kabela. Za spajanje dvaju energetskih kabela (npr. dviju tvorničkih duljina) služe ravne kabelske spojnice (sl. 43), a za odvajanje od kabelskog voda, odvojne (račvaste, dvostruke) spojnice. Vrsta upotrijebljene kabelske spojnice ovisi o vrsti izolacije i zaštite kabela. Za specijalne visokonaponske kabele (kabele s uljem i plinom pod pritiskom) potrebne su posebne spojnice. Vanjski oklop kabelske spojnice izrađen je obično od lijevanog željeza, a njegove dimenzije unificirane su standardima.



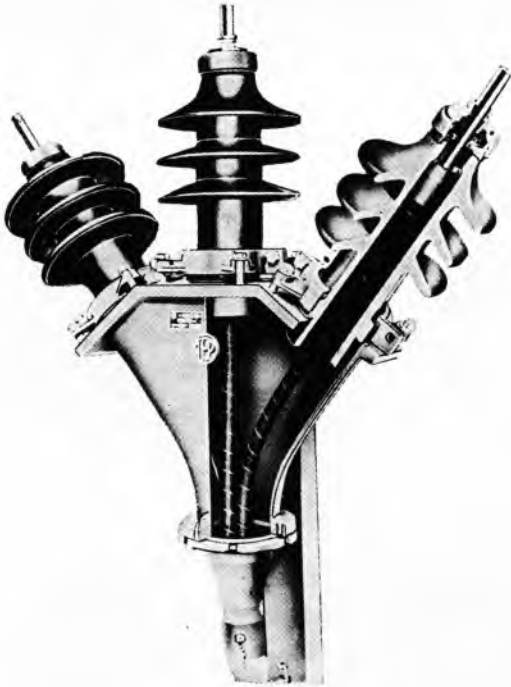
Sl. 43. Ravna kabelska spojnica s priborom. 1 Vanjska spojnica, 2 unutarnja spojnica, 3 zalivna masa, 4 sitni pribor

Kabele izolirane plastičnom masom, sa plaštom ili bez njega, povoljnije je spajati posebnom vrstom plastičnih kabelskih spojnice koje se formiraju na samom mjestu spajanja posebnom tehnikom. Kad se pristupi spajanju dvaju kabela, treba krajeve najprije pripremiti. Nakon stavljanja žičanog poveza skida se armatura, zatim se skinu stepenasto pojedini slojevi (plašt, ekran, izolacija, itd.). Očišćeni vodiči jednog i drugog kabela spajaju se zatim radi postizanja besprijekornog električnog spoja, npr. s pomoću čahura koje se gnječe (za niže napone), s pomoću stezaljki s vijcima (za niske napone, npr. pri odvajanju), lemljenjem (za bakrene i aluminijske vodiče) ili varenjem (za aluminijske vodiče). Pojedine se žile zatim izoliraju trakom od izolacionog papira. Tako izolirane žile stavljaju se u unutarnju kutiju spojnice i zaliju kabelskom izolacionom masom. Prilikom spajanja treba spojiti i plašteve, odnosno uloženu bakrenu traku, ako plašt nije od metala. Obične spojnice za uljne kabele izrađene su tako da ulje može kroz njih slobodno cirkulirati. Zaprečne spojnice primjenjuju se na mjestu gdje se jedna sekcija visokopritisnog uljnog kabela želi odvojiti od druge. Plaštevi jednožilnih visokonaponskih kabela koji pripadaju istom trofaznom vodu a položeni su jedan do drugog spajaju se naizmjenice i s plaštevima susjednih

kabela, kako bi se tim križanjem postiglo ukidanje induciranih napona i smanjenje struja u plaštevima.

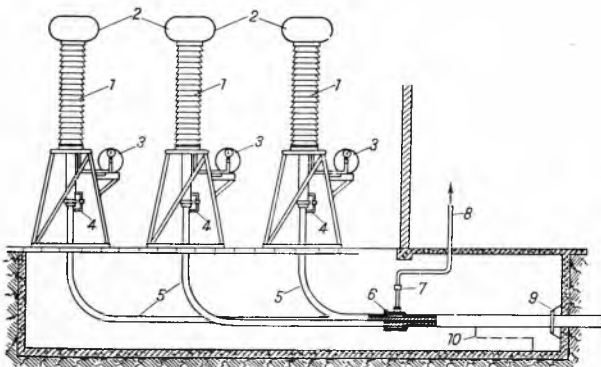
Spajanje telefonskih kabela. Nakon što se kabelski zdenac osuši (grijanjem) i iznad otvora postavi šator, skine se olovni plašt kabela na duljini 20...50 cm od kraja. Žice pojedinih žila se uvijaju i na kraju zaleme ili spoje s pomoću čahure uz gnječenje. Spojna mjesta izoliraju se s pomoću prethodno navučenih papirnih ili plastičnih čahura. Sve spojene žile povezuju se trakama i stavljaju u olovnu spojnicu koja se lemljenjem zatvara i spoji sa oba olovna plašta. Ako se radi o spajanju armiranih telefonskih kabela u rovu, olovna se spojnice stavljaju u vanjsku željeznu spojnicu, a prostor između vanjske i unutarnje spojnice ispunjava se zagrijanom kabelskom masom.

Završavanje kabela provodi se s pomoću kabelskih glava. One svojom konstrukcijom omogućavaju povezivanje kabelskih vodiča s električnom mrežom, zaštitu izolacije kabela od sušenja



Sl. 44. Kabelska glava za trožilni kabel

i ulaza vlage, toplinsku dilataciju kabelskih vodiča i izolacionog ulja u kabelu, zaštitu kabela od prenapona i mehaničko učvršćenje i zaštitu armature kabela. Kabelske glave dijele se prema mjestu montaže na glave za vanjsku i glave za unutarnju montažu. Izvedba kabelskih glava ovisi o visini nazivnog napona. Za papirom izolirane kabele primjenjuju se glave koje se sastoje od ljevenog željeznog kućišta i izolatorâ koji su na njega učvršćeni. Izgled



Sl. 45. Kabelske glave visokonaponskih uljnih kabela. 1 Jednopolne kabelske glave, 2 metalni ekran, 3 posude za izravnjanje pritiska, 4 uređaj za grijanje ulja u prostoru niskog pritiska, 5 fazni vodiči, 6 razvodište ulja, 7 električni ventil, 8 priključak na uređaj za održavanje pritiska ulja, 9 graničnik toplinskih dilatacija, 10 uzemljivač

kabelske glave pokazuje sl. 44. Priprema kabela, spajanje vodiča s izlaznim priključcima i zalivanje glave kabelskom izolacionom masom obavlja se na sličan način kao u kabelskim spojnicama. Komplikiranije su glave visokonaponskih uljnih i plinskih kabela jer one služe ujedno kao priključak na ulje, odnosno plin pod pritiskom (sl. 45).

V. Srb

VODOVI ZA PRIJENOS INFORMACIJA

Pod prijenosom informacija razumijevaju se sve vrste analognih i digitalnih signala; u njih idu telegrafski, telefonski i televizijski signali, a u najnovije vrijeme i signali za obradu i prijenos svih vrsta podataka.

Električki se vijesti mogu prenositi praznim prostorom (bežično, npr. s pomoću radio-prijenosa), s pomoću materijalnih vodiča (žičnim putem) ili valovodima.

Električna energija što je proizvodi generator signala radi prijenosa informacija prenosi se duž vodova uz pomoć elektromagnetskih svojstava materije i uz koncentraciju toka električne energije u vodičima. Umjesto da se znatan dio prostora oko izvora ispunja energijom, kao što je to npr. pri radio-prijenosu, pri žičnom se prijenosu energija koncentrira u cjevolikom prostoru čiji je promjer mnogo manji od njegove duljine. Prostiranje elektromagnetske energije duž vodova odvija se na isti način kao i u praznom prostoru, samo se mora uzeti u obzir i utjecaj električki nabijenih čestica, koje to prostiranje s jedne strane pomažu, a s druge strane mu smetaju. Te su čestice slobodni elektroni u metalnim vodičima te dipoli i ioni u izolacionim tvarima oko vodiča. Prema tome se signali koji služe prijenosu informacija prostiru u vodovima kao elektromagnetski valovi konačnom brzinom, a prigušuju se u toku širenja uslijed gubitaka u vodičima i dielektriku.

Kako su se u prošlosti razvijale pojedine vrste signala, izradivane su za njih i posebne vrste vodova, te su ranije uporedo postojali posebni telegrafski, pa telefonski i signalni vodovi. Danas se teži unifikaciji i vrste se vodova za prijenos informacija uglavnom svode samo na one oblike vodova koji su opisani u nastavku ovog članka, tj. na nadzemne (zračne) vodove, kabele i valovode.

Teorija telekomunikacionih vodova

Parametri vodova. Uslijed prigušenja koje se javlja na vodovima nastaju i promjene u obliku signala. Te promjene određuje konstanta prostiranja γ . Za homogene vodove ova je konstanta svagdje duž smjera prostiranja z jednaka. Tok prijenosa signala određen je izmjeničnim naponom u između vodiča i strujom i u vodičima. Promatranja ograničit će se ovdje samo na utitrani val s kružnom frekvencijom ω i amplitudama U i I ; svi ostali oblici signala mogu se predložiti kao zbrojevi odnosno integrirani takvih dionih valova.

Rješenje diferencijalnih jednadžbi

$$\frac{dU}{dz} = -\gamma U \quad \text{ i } \quad \frac{dI}{dz} = -\gamma I \quad (17)$$

glasi:

$$U(z) = U(0) e^{\gamma z} + U(1) e^{-\gamma z}, \\ I(z) = I(0) e^{\gamma z} + I(1) e^{-\gamma z}.$$

$U(z)$ i $I(z)$ su napon i struja na bilo kom mjestu voda. Jednadžbe pokazuju da uvijek postoji jedan val u smjeru prostiranja (negativni predznak eksponenta) i drugi suprotnog smjera (pozitivni predznak eksponenta), od kojih je samo napredujući val poželjan.

Napon i struju povezuje jednadžba $U(z) = Z_v I(z)$, gdje je Z_v valna otpornost (impedancija) voda. Ona je za homogene vodove svagdje jednaka. Konstanta prostiranja γ sadrži prema izrazima (7) i (9) konstantu prigušenja α i faznu konstantu β :

$$\gamma = \alpha + j\beta.$$

Grupna brzina prostiranja data je izrazom

$$v = \frac{\omega}{\beta}.$$

Svaki vod definiran je četirima parametrima, koji se određuju prema građi i konstantama materijala, tj. prema njihovoj vodljivosti.

vosti, permeabilnosti i dielektričnosti. Ti su parametri: otpor(nost) R' , induktivnost L' , kapacitivnost C' , vodljivost G' , svi izraženi po jedinici duljine voda. Njihovim se uvrštavanjem navedene diferencijalne jednadžbe (17) proširuju i glase:

$$\frac{dU(z)}{dz} = -(R' + j\omega L') I(z) = -\gamma Z_v I(z), \text{ odnosno}$$

$$\frac{dI(z)}{dz} = -(G' + j\omega C') U(z) = -\frac{\gamma}{Z_v} U(z).$$

$(R' + j\omega L')$ jednak je impedanciji cijelog kratko spojenog voda podijeljenog duljinom voda Z/l , a $(G' + j\omega C')$ admitanciji otvorenog voda podijeljenog duljinom voda: l/Z .

S pomoću tih parametara može se izraziti također valna otpornost:

$$Z_v = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} = Z_1 + jZ_2$$

i konstanta prostiranja:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')}$$

Vodljivost G' može se u praktičnoj primjeni zanemariti, a naročito u homogenim kabelima. Ako se to provede u prednjim izrazima, dobije se nakon rastavljanja na realne i imaginarne dijelove:

$$\begin{aligned} Z_1 &= \sqrt{\frac{L'}{C'}} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{R'}{\omega L'}\right)^2}}, \\ Z_2 &= -\frac{R'}{2\omega L' C'} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{R'}{\omega L'}\right)^2}}, \\ \alpha &= \frac{R'}{2\sqrt{\frac{L'}{C'}}} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{R'}{\omega L'}\right)^2}}, \\ \beta &= \omega \sqrt{\frac{L' C'}{2}} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{R'}{\omega L'}\right)^2}}. \end{aligned} \quad (18)$$

Iz ovih izraza slijedi:

$$\begin{aligned} Z_1 Z_2 &= -\frac{R'}{2\omega C'}; \quad \alpha \beta = \frac{R' \omega C'}{2}; \\ \frac{\beta}{\alpha} &= -\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{\omega L'}{R'} \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{R'}{\omega L'}\right)^2} \right]; \quad \alpha Z_1 = \frac{R'}{2}; \\ \beta Z_2 &= -\frac{R'}{2}; \quad \frac{\alpha}{Z_2} = -\omega C'; \quad \frac{\beta}{Z_1} = \omega C' \text{ i } \gamma = j\omega C' Z. \end{aligned}$$

Ako se pretpostavi da $\omega \rightarrow \infty$ ili $R' \rightarrow 0$, slijedi:

$$\begin{aligned} Z_1 &\rightarrow \sqrt{\frac{L'}{C'}}; \quad Z_2 \rightarrow -\frac{R'}{2\omega \sqrt{L' C'}}; \quad \alpha \rightarrow \frac{R'}{2\sqrt{\frac{L'}{C'}}}; \quad \beta \rightarrow \omega \sqrt{\frac{L' C'}{2}}; \\ \frac{Z_2}{Z_1} &\rightarrow -\frac{R'}{2\omega L'}; \quad \frac{\alpha}{\beta} \rightarrow \frac{R'}{2\omega L'}. \end{aligned}$$

Ako pak $\omega \rightarrow 0$, bit će:

$$\begin{aligned} Z_1 &\rightarrow \sqrt{\frac{R'}{2\omega C'}}; \quad Z_2 \rightarrow -\sqrt{\frac{R'}{2\omega C'}}; \quad \alpha \rightarrow \sqrt{\frac{R' \omega C'}{2}}; \\ \beta &\rightarrow \sqrt{\frac{R' \omega C'}{2}}; \quad \frac{Z_2}{Z_1} \rightarrow -1; \quad \frac{\alpha}{\beta} \rightarrow 1 \end{aligned}$$

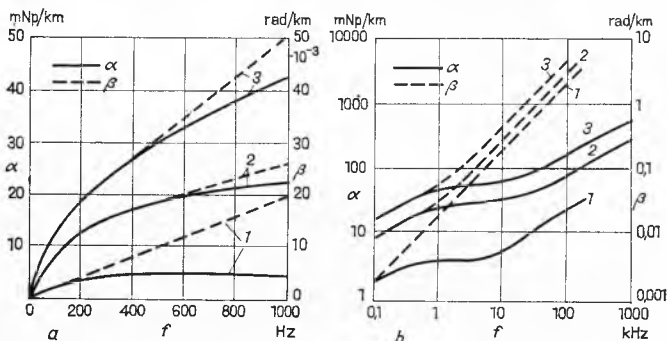
Pretpostavka je da $\omega \rightarrow \infty$ ili $R' \rightarrow 0$ i izvedene formule pružaju karakteristične vrijednosti za gradnju vodova s realnom o frekvenciji neovisnom valnom otpornosti Z_e , i o frekvenciji neovisnom brzinom prostiranja v_e . Pri tome valja uzeti u obzir da induktivnost L' može biti ovisna o frekvenciji; u tom slučaju ona se označuje simbolom L'_∞ , tako da vrijede jednadžbe

$$\begin{aligned} Z_e &= \sqrt{\frac{L'_\infty}{C'}} \\ \text{i} \quad v_e &= \frac{\omega}{\beta_e} = \sqrt{\frac{1}{L'_\infty C'}}. \end{aligned}$$

Otpornost R' je u tom slučaju također ovisna o frekvenciji i raste za $\omega \rightarrow \infty$ proporcionalno sa $\sqrt{\omega}$, tako da je konstanta prigušenja α u tom području također proporcionalna s korijenom iz frekvencije, a Z_2 opada na isti način, tj. $Z_2 \sim \frac{1}{\sqrt{\omega}}$.

U području $\omega \rightarrow 0$ konstanta prigušenja α i fazna konstanta β proporcionalne su $\sqrt{\omega}$, a valna otpornost Z_v proporcionalna je $1/\sqrt{\omega}$.

Ovisnost konstante prigušenja α i fazne konstante β o frekvenciji prikazuju sl. 46 a, b i to za vodove u praktičnoj primjeni.



Sl. 46. Ovisnost konstante prigušenja α i fazne konstante β o frekvenciji. Krivulje se odnose: a) na niske frekvencije, b) na visoke frekvencije; 1 bakreni zračni vod s vodičima promjera 3 mm, 2 koaksijalni vod 2,6/9,5 mm, 3 zvjezdasta četvorka — temeljni vod, promjer vodiča 1,3 mm

Krivulja 1 odnosi se na nadzemni vod s bakrenim vodičima promjera 3 mm, krivulja 2 na koaksijalnu tubu 2,6/9,5 mm, a krivulja 3 na temeljni vod zvjezdaste četvorka koji ima promjer vodiča 1,3 mm. Vidi se da je tok krivulje ovisan o korijenu iz frekvencije pri niskim i visokim frekvencijama, a sreanje je područje manje ovisno o frekvenciji.

Za prijenos informacija poželjno je konstantno prigušenje i proporcionalna faza, jer je tada promjena oblika signala najmanja. To se postiže samo u uskom pojasu frekvencija. Stoga je pri prijenosu širokih pojasa potrebno izvršiti korekture tih karakteristika.

Refleksije valova na vodovima. Neizbježne nejednakosti u gradnji, konstrukcioni zahtjevi i mjesta spajanja duž voda prouzrokuju nehomogenosti. Naide li napredujući val na takva mjesta, reflektirat će se dio njegove energije i prouzročiti dioni val suprotna smjera čija amplituda ovisi o veličini smetnje. Ako je srednja otpornost Z_0 , a vrijednost koja odstupa na tom mjestu $Z(z)$, faktor refleksije izražen je jednadžbom

$$r(z) = \frac{Z(z) - Z_0}{Z(z) + Z_0}.$$

Ovaj faktor određuje amplitudu povratnog vala na mjestu refleksije u odnosu prema amplitudi napredujućeg vala. Faktor refleksije sveden na početak voda ($Z = 0$) bit će

$$r(0) = \frac{U_r}{U_n} = r(z) e^{-2\gamma z},$$

gdje U_r znači amplitudu napona reflektiranog, a U_n amplitudu napona napredujućeg vala.

Amplituda napona povratnog vala superponira se na početku voda valu koji je izvorno prisutan i mijenja ulaznu otpornost $W(0)$ određenu odnosom $W(0) = U(0)/I(0)$ na

$$W(0) = Z_0 \frac{1 + r e^{-2\gamma z}}{1 - r e^{-2\gamma z}}.$$

Kako se faza povratnog vala mijenja s frekvencijom, kolebat će se i ulazna otpornost $W(0)$ s frekvencijom, pa nastaje valovitost koja iznosi:

$$\frac{W(0) - Z_0}{W(0) + Z_0} = 2 r e^{-2\gamma z}.$$

Daljnje napredovanje vala prigušeno je refleksijama, pa nastaje dodatno prigušenje uslijed nehomogenosti. Ako su one

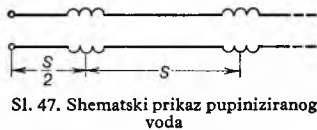
periodičke, postoji granična frekvencija iznad koje vod potpuno prigušuje valove. Tako je to npr. u Pupinovom vodu ili u koaksijalnom vodu s nehomogenim dielektrikom.

Refleksije na mnogim malim nehomogenostima duž voda proizvode smetnje koje su naročito neugodne pri prijenosu impulsa (npr. televizijskih signala). Zbroj svih povratnih dionih valova čini povratni tok koji prouzrokuje na izvoru vijesti nepoželjni odjek. Povratni val opet se reflektira na početku voda ili na nehomogenostima pri svom vraćanju, pa jedan njegov dio napreduje kao *prateći tok* iza izvornog signala i prouzrokuje dodatne smetnje.

Pupiniziranje vodova. Ako se u jednadžbi (18) za konstantu prigušenja α ne zanemari vodljivost, $G' \neq 0$, bit će u području $\frac{R'}{\omega L'} \gg 1$:

$$\alpha = \frac{R'}{2\sqrt{L'}} + \frac{G'}{2\sqrt{L'}} \quad (19)$$

Prvi sumand, prigušenje uslijed otpornosti, bit će to manji što je veći odnos L'/C' . Prema tome, dok to prigušenje prevladava može se ukupno prigušenje umanjiti ako se L' poveća. To se postiže time što se u vod na pravičnim razmacima umeću svici s korisnom induktivnošću. Tako nastaje Pupinov nehomogeni



Sl. 47. Shematski prikaz pupiniziranog voda

vod ili pupinizirani vod (sl. 47). Iz jednadžbe (19) vidi se također da prigušenje uslijed vodljivosti raste po istoj zakonitosti po kojoj prigušenje uslijed otpornosti opada; prema tome postoji određena granica pri kojoj je ukupno prigušenje najmanje, tj. kad su oba sumanda jednaka. Dodavanjem induktiviteta nastoji se postići rad na toj točki.

Praktično se pupinizacija može prikazati poljem duljine s (sl. 48) kao kvazi-homogeni vod. Njegova impedancija iznositi će pri kratkom spoju

$$R' + j\omega L' = R'_0 + \frac{R_{sv}}{s} + j\omega \left(L'_0 + \frac{R_{sv}}{s} \right)$$

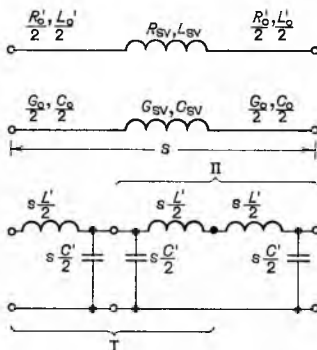
i pri otvorenom vodu

$$G' + j\omega C' = G'_0 + \frac{G_{sv}}{s} + j\omega \left(C'_0 + \frac{G_{sv}}{s} \right).$$

Indeks 0 dodat konstantama odnosi se na svojstva voda, a indeks sv na svitak. U prikazu voda kao lančani sklop Π -članova ili T-članova može se odrediti granična kružna frekvencija ω_g pri kojoj pupinizirani vod potpuno prigušuje ili brtvi, tj. $\omega_g =$

$\frac{2}{s\sqrt{LC}}$, a za ukupno prigušenje jednog polja voda vrijedi:

$$\alpha = s\alpha \approx \frac{1}{\sqrt{1-\eta^2}} \left[\frac{sR_0(1-\frac{3}{2}\eta^2) + R_{sv}}{2\sqrt{\frac{L}{C}}} + \frac{sG}{2\sqrt{\frac{L}{C}}} \right],$$



Sl. 48. Nadomjesna shema jednog polja duljine pupiniziranog voda

gdje je $\eta = \frac{\omega}{\omega_g}$, tj. kružna frekvencija ω normirana graničnom kružnom frekvencijom ω_g .

Danas je u primjeni pupinizacija samo na niskofrekventnim kabelima ($f < 4$ kHz), i to s razmakom svitaka $s = 1,7$ km i s induktivnosti svitka 80 mH.

Izvedena prijenosna svojstva pupiniziranih vodova postižu se uz tačan razmak svitaka i jednaka električna svojstva voda. Stoga su tolerancije veoma uske, a jednolikost polja postiže se dodatnim izjednačenjem.

Preslušavanje. Kako u kabelima tako i na stupovlju zračnih linija obično se više vodova, koji teku paralelno, nalazi veoma blizu. Prijenos vijesti koji se odvija na jednom od tih vodova ne smije se čuti na bilo kojem drugom susjednom vodu, a ni signali s drugih vodova ne smiju smetati prijenosu vijesti. Međusobni utjecaj paralelnih vodova zove se preslušavanje; ono treba da je što manje, jer omogućuje prisluškivanje ili unosi smetnje.

U snopu od n vodova sadrže naponi i struje jednog voda r i udjele koji nastaju utjecajem napona i struja drugih vodova s .

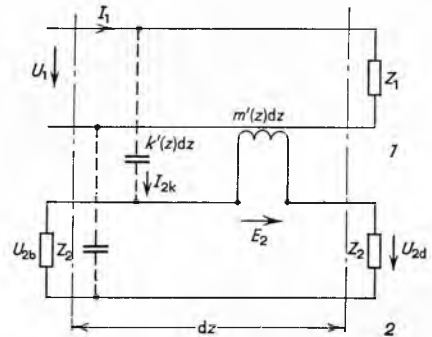
Diferencijalne jednadžbe vodova (17) valja proširiti za te udjele:

$$\begin{aligned} -\frac{dU_r}{dz} &= \gamma_r Z_r I_r + \sum_{s=1}^n m_{rs}(z) I_s, \\ -\frac{dI_r}{dz} &= \frac{\gamma_r}{Z_r} U_r + \sum_{s=1}^n k_{rs}(z) U_s, \end{aligned} \quad (20)$$

gdje $\sum'$ znači da je izostavljen sumand $r = s$, a $r = 1, 2, \dots, n$. Za snop od n vodova postoji n pari jednadžbi opisanih u izrazima (20) s magnetskim »spregama« $m_{rs}(z)$ induciranih napona i s električnim spregama $k_{rs}(z)$ influenciranih naboja.

Na pretpostavljenom vodu duljine l , gdje je sa 0 označen početak promatrane dionice, bit će zbog međusobnog utjecaja dvaju vodova 1 i 2 moguće preslušavanje na bližem kraju, tj. za $z = 0$, ili na daljem kraju, tj. za $z = l$.

Na elementarnom dijelu dz između dva voda 1 i 2 (sl. 49) nastaju električne sprege $k'(z)dz$ i magnetske sprege $m'(z)dz$;



Sl. 49. Shematski prikaz električne i magnetske sprege između dva voda

one u smetanom vodu prouzrokuju napone i struje koji se prostiru u obje strane i na otporima na kraju djeluju kao napon preslušavanja U_{sb} i U_{2d} . Na bližem se kraju zbrajaju djelovanja električne i magnetske sprege, a na daljem se kraju oduzimaju, tako da uz pretpostavku dvaju vodova istih karakteristika, tj. ako je $\gamma_1 = \gamma_2$ i $Z_1 = Z_2$, izlazi za preslušavanje na bližem kraju:

$$\frac{U_2(0)}{U_1(0)} = \frac{1}{4} j \frac{\omega}{\gamma} \left(k' Z + \frac{m'}{Z} \right) (1 - e^{-2\gamma l}),$$

ili ako se uvrsti za $j \frac{\omega}{\gamma} \approx \frac{\omega}{\beta} = v$, izraz glasi:

$$\frac{U_2(0)}{U_1(0)} = \frac{1}{4} v \left(k' Z + \frac{m'}{Z} \right) (1 - e^{-2\gamma l}).$$

Preslušavanje na daljem kraju iznosi:

$$\frac{U_2(l)}{U_1(l)} = \frac{1}{2} j \omega \left(k' Z - \frac{m'}{Z} \right) l.$$

Preslušavanje izražava se odnosom snage N_2 inducirane u smeta-

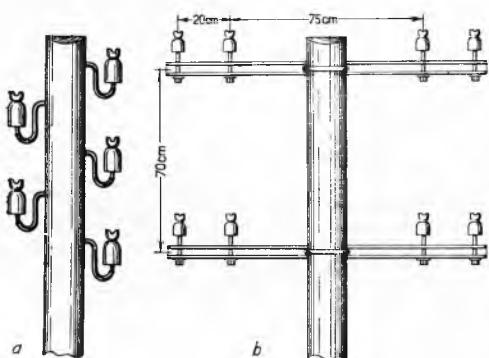
nom vodu i snage N_1 u vodu koji smeta. Prigušenje preslušavanja iznosi:

$$b_p = \frac{1}{2} \ln \frac{N_1}{N_2}$$

Prigušenje preslušavanja mora u telefonskim vodovima biti veće od 7,5 Np.

Telekomunikacioni nadzemni (zračni) vodovi

Nadzemni vodovi sastoje se od golih (neizoliranih) žica promjera 1,5 ... 5 mm izrađenih od tvrdog bakra, bronzne ili pocinčanog čelika. Vodiči nadzemnih vodova učvršćeni su veznom žicom na čašaste porculanske ili staklene izolatore koji su nasadeni bilo na čelične podupirače bilo na nosače s držačima za više izolatora.



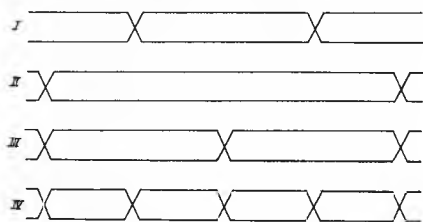
Sl. 50. Stupovi za nadzemne (zračne) telefonske vodove: a za običan (pretplatnički) vod, b za prijenos telefonije s pomoću prijenosnih frekvencija

Već prema broju žica podupirači i držači učvršćuju se na jedan ili dva u zemlju usađena stupa od impregniranog drveta duljine 7 ... 10 m (sl. 50). Nadzemne gole vodove zamijenili su danas kabeli i samonosivi nadzemni kabeli koji se također vode po stupovima. Nadzemni goli vodovi danas su još u primjeni samo kao vodovi za priključak telefonskih pretplatnika u selima i predgrađima, a kao daleki vodovi oni se upotrebljavaju samo za slabi promet (mali broj razgovora na velikim udaljenostima i za telefonske vodove s prijenosnim frekvencijama za povezivanje manjih mjesta s centrima).

Prednosti i mane nadzemnih vodova. Uz zadani promjer vodiča zračni vod ima najmanje prigušenje, a time i najveći domet. Potreban materijal i cijena gradnje najniži su u usporedbi s drugim vodovima, ali je broj vodova na istom stupovlju ograničen. Nadzemni su vodovi, nadalje, izloženi svim utjecajima okoline. Oni nisu zaštićeni od temperature, atmosferilija, leda, snijega i inja, koje ima naročito jak utjecaj na prijenosna svojstva. Oluje i drugi utjecaji mogu oštetiti i razoriti linije pa su i troškovi održavanja veoma visoki.

Pri 20 °C iznosi prigušenje za $f = 800$ Hz 4,3 mNp/km, a za $f = 150$ kHz, 23 mNp/km.

Vodovi istog stupovlja izloženi su jakom međusobnom utjecaju. Preslušavanje se očituje na bližem kraju, dok je preslušavanje na daljem kraju moguće samo kao utjecaj preko trećeg voda. Sprege se mogu kompenzirati ukrštanjem.



Sl. 51. Plan ukrštanja vodova

Ako se vodovi upotrebljavaju za višestruki (multipleksni) prijenos, preslušavanje je na bližem kraju prisutno samo kao odjek, a preslušavanje na daljem kraju preko trećeg voda je kri-

tično, pa je ukrštanje takvih vodova poseban problem i vrši se prema utvrđenim planovima za cijeli profil određenog stupovlja (sl. 51).

Nadzemni vodovi izloženi su i smetnjama stranih elektromagnetskih polja jakih radio-odašiljača; zbog toga im je i područje iskorištavanja ograničeno na pojas frekvencija do 150 kHz.

Nadzemni vodovi elektroprijenosa (dalekovodi) mogu se upotrijebiti i za prijenos vijesti, jer im je konstanta prigušenja kod $f = 100$ kHz za 2 užeta po 120 mm² promjera svega $a = 3,5$ mNp/km, čime je prijenos vijesti bez međupojajala moguć i na daljine od više stotina kilometara.

Telekomunikacioni kabeli

U kabelima su vodovi zaštićeni od mehaničkih i električnih utjecaja okoline plaštom (omotačem).

Kabeli se nakon fabrikacije namataju na bubnjeve i tako namotani transportiraju, a na mjestu upotrebe se postavljaju iznad zemlje (vješaju na stupove) ili polažu u zemlju ili u vodu (npr. more). Pri tome se pojedine fabrikacione duljine sklapaju u kabelske dionice.

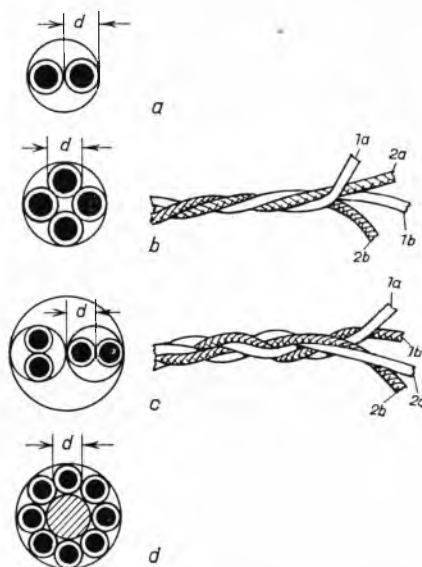
Plaštevci su od olova, aluminijuma, čelika ili polietilena. Kabeli koji su izloženi utjecaju stranih struja i atmosferskim pražnjenjima moraju se posebno zaštititi.

Promjer kabela ne smije prijeći 100 mm jer su veći promjeri neekonomični i neugodni za transport.

Srž kabela sastavljena je od više vodova. Elemente konstrukcije današnjih telefonskih kabela čine simetrični i koaksijalni vodovi.

Simetrični vodovi kabela sastoje se od dva jednaka međusobno upredena izolirana vodiča koji su unutar jedne grupe upredena postavljeni simetrično.

Izolacija vodiča određuje njihov razmak a time je određena i njezina dielektrična konstanta. Izolacija može biti šuplja ili čvrsta. Za šuplju izolaciju primjenjuju se najčešće trake od papira ili polistirena (trgovački naziv: Stirofleks). Kao čvrsta izolacija služi i papir, ali najčešće umjetni materijali (npr. polietilen).



Sl. 52. Različiti načini upredanja izoliranih vodiča u telefonskim kabelskim vodovima. a Parica, b zvjezdasta četvorka, c DM-četvorka, d osmerac

Upredanjem dvaju izoliranih vodiča dobiva se *parica* (sl. 52 a), koja je i najjednostavnija grupa upredanja. Upredanjem četiri ili osam vodiča na određeni način dobivaju se tzv. četvorke i osmerci. Upredanjem vodiča ili parica na određen način u različite više grupe upredanja postiže se bolje iskorišćenje presjeka srži kabela (u konstrukcijskom smislu) i postiže veći broj govornih krugova jer se osim osnovnih govornih krugova mogu primijeniti i tzv. dodatni fantomni govorni krugovi.

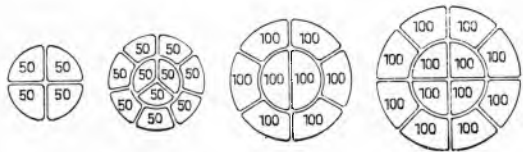
Zvezdaste četvorke (sl. 52 b) dobiju se upredanjem četiri vodiča uz isti korak upredanja. Četiri žile jedne četvorke služe za dva osnovna govorna kruga, koje čine žile 1 a i 1 b, odnosno žile 2 a i 2 b i jednog fantomnog kruga, koji čine paralelno žile

1 a i 1 b kao polazni vodič, a žile 2 a i 2 b paralelno kao povratni vodič. Krugovi su međusobno raspregnuti (v. Preslušavanje, str. 248) geometrijom rasporeda vodiča. *Dieselhorst-Martinove* (skraćeno DM) četvorke (sl. 52 c) nastaju upređanjem dvaju parica koje su radi raspreganja upređene različitim korakom. *Osmerac* je slijedeća viša grupa upređanja (sl. 52 d). U osmercu upređeno je osam vodiča s istim korakom upređanja oko jedne jezgre. U tom elementu nisu raspregnuti susjedni elementi, pa ih treba na mjestima sklapanja fabričkih duljina ukrštavati prema potrebi. U osmercu postoje četiri osnovna govorna kruga. S pomoću njih mogu se ostvariti još tri dodatna fantomna govorna kruga (2 fantomne četvorke i 1 fantomna osmica).



Sl. 53. Telefonski kabel sa slojnim razmještajem vodova. 1 Papirom izolirani vodiči upređeni u zvjezdaste četvorke smješteni u slojevima, 2 papirna traka, 3 olovni plašt, 4 antikoroziivna zaštita

Srž kabela nastaje ili iz grupa upređanja (parica, četvorke, osmeraca) u koncentričnim slojevima (sl. 53) ili iz snopova s jednakim brojem grupa (sl. 54).



Sl. 54. Shematski prikaz presjeka telefonskog kabela s grupnim razmještajem vodova. 50 do 100 vodova sačinjava snopove od kojih je sastavljena srž kabela

Prijenosne veličine (konstante) telefonskih kabela određuje kapacitivnost, a ona je naročito ovisna o geometriji rasporeda vodiča. Vrijednosti za kapacitivnost C' navedene su u tabl. 11, a kreću se u granicama od 20 do 60 nF/km. Induktivnost L' kreće se u granicama od 0,6 do 0,8 mH/km.

Tablica 11
SVOJSTVA MJESNIH KABELSKIH VODOVA

Promjer vodiča mm	Vrsta upređanja	Izolacija	R' pri 20 °C Ω/km	C' nF/km	α pri $f = 800 \text{ Hz}$ mNp/km	$ Z $ pri $f = 800 \text{ Hz}$ Ω
0,4	parica	papir	290	50	190	1070
	zvjezdasta četvorka	papir	290	50	190	1070
	zvjezdasta četvorka	papirno-zračna puna-PE	290	34	160	1300
0,6	parica	papir	126	46,5	122	730
	zvjezdasta četvorka	papir	126	46,5	122	730
	zvjezdasta četvorka	papirno-zračna puna-PE	126	36	107	835
0,8	zvjezdasta četvorka	papirno-zračna PE	71	36	80	630
	zvjezdasta četvorka	PE	71	36	80	630

PE = polietilen

Karakteristične vrijednosti valne otpornosti Z_v nepupiniziranih simetričnih vodova leže između 120 i 190 Ω , a brzina prostiranja v između 200 i 260 Mm/s.

Preslušavanje bi u kabelima zbog velike blizine paralelnih vodiča bilo veoma veliko, ali je samom konstrukcijom kabela i grupa upređanja svedeno na tako male vrijednosti da se mogu postići sva zahtijevana prigušenja prema internacionalnim preporukama.

Kabeli sa simetričnim vodičima upotrebljavaju se u mjesnim mrežama i mrežama bliskog i dalekog saobraćaja. U mjesnim telefonskim mrežama to su obično tzv. pretplatnički vodovi, kojima teku struje napajanja pretplatničkog mikrofona, signali biranja, signali signaliziranja i govorne struje. Za čimet odlučna je prvenstveno otpornost voda, a tek na drugom mjestu kapacitivnost. Vodiči promjera 0,4 ... 0,8 mm upređaju se u parice ili zvjezdaste četvorke. Svojstva mjesnih kabelskih vodova prikazana su u tabl. 11.

Za visokofrekventni prijenos govora i specijalne službe kao i radioprijenos upotrebljavaju se pupinizirani vodovi, u kojima su svojstva određena otpornošću, kapacitivnošću i induktivnošću i razmakom svitaka. Svojstva pupiniziranih vodova prikazana su u tabl. 12.

Za multipleksni (višestruki) prijenos na kabelskim simetričnim vodovima primjenjuju se najčešće zvjezdaste četvorke. Prijenosna svojstva određuju otpornost, kapacitivnost i induktivnost voda i njihove promjene ovisne o frekvenciji. I vodljivost na gornjoj granici frekvencijskog pojasa od osjetnog je utjecaja, pa se stoga vrlo često umjesto papirno-zračne izolacije primjenjuje polistirensko (stirofleksno-)zračna izolacija. Svojstva simetričnih kabelskih vodova za višestruki prijenos prikazana su u tabl. 13.

Tablica 12
SVOJSTVA PUPINIZIRANIH VODOVA
(Razmak svitaka 1,7 mm)

Promjer vodiča mm	Vrsta upređanja	Vod	Induktivnost svitka mH	α pri $f = 1,5 \text{ kHz}$ mNp/km	$ Z $ Ω	Granična frekvencija kHz
0,8	zvjezdasta četvorka DM-četvorka osmerac	osnovni	80	34,5	1120	4,4
		osnovni fantomni	80	32	1160	4,5
		osnovni fantomni	40	28,4	655	5,2
		osnovni fantomni	80	32	1160	4,5
0,9	zvjezdasta četvorka zvjezdasta četvorka DM-četvorka	osnovni	140	20	1520	3,4
		osnovni fantomni	83	21	728	2,77
		osnovni	80	24	1170	4,6
		osnovni fantomni	80	24,3	1170	4,6
1,4	zvjezdasta četvorka DM-četvorka DM-četvorka	osnovni	80	11	1140	4,5
		osnovni	80	12	1145	4,5
		osnovni fantomni	40	11	640	5,0

Tablica 13
SVOJSTVA SIMETRIČNIH KABELSKIH VODOVA ZA VIŠESTRUKI PRIJENOS

Promjer vodiča mm	Izolacija	Kapacitivnost C' nF/km	Frekvencija f kHz	Prigušenje kod +10 °C mNp/km	Realni udio Z_1 valne otpornosti Ω
0,9 1,2 1,3	papirna papirna polistiren (Stirofleks)	34	108	350	140
		26,5	252	340	172
		22	552	340	188

Koaksijalni vodovi (ili tube) sastoje se od unutarnjeg vodiča, potpuno zakriljenog od vanjskog vodiča koji ima oblik cijevi. Oba su dakle vodiča kako po građi tako i po svojstvima različiti. Prostor između vodiča ispunjen je potpuno ili djelomično dielektrikom koji fiksira unutarnji vodič u koaksijalnom položaju i daje kabeu posebnu stalnost oblika i čvrstoću.

Vrsta i količina materijala izolacije određuju dielektričnost, gubitke zbog vodljivosti i mehanička svojstva. Kabeli se moraju savijati i motati na bubnjeve. U posebnim uvjetima upotrebe oni moraju biti i fleksibilni, tj. ako se savijaju i mnogo puta, oni ne smiju promijeniti svoja električna i mehanička svojstva. Unutarnji vodič može biti pun bakarni vodič, višeznačno užice ili cijev.

Izolacija koaksijalnih kabela izvodi se na tri načina: kao homogena, uzdužno nehomogena i poprečno nehomogena izolacija.

Homogena izolacija ispunja potpuno prostor između unutarnjeg i vanjskog vodiča (v. sl. 90 a). Ona se naročito primjenjuje

radi postizanja naponske i/ili mehaničke čvrstoće. Za izolaciju upotrebljava se polietilen ili politetrafluoretilen (trgovački naziv: Teflon). Uzdužno nehomogena izolacija izrađuje se s kolutima (v. sl. 90 b) na određenom razmaku ili kao tzv. balonska izolacija od izolacionih cijevi navučenih na unutarnji vodič i fiksiranih utorima vanjskog vodiča na određenim razmacima. Kao izolacija upotrebljava se polistiren, polietilen ili polivinilkarbazol (Luvican). Poprečno nehomogena izolacija ima oblik spirale, te je od svakog presjeka dielektrikom ispunjen samo dio, i to u svim presjecima isti dio (v. sl. 91).

Vanjski vodič koaksijalnih kabela može biti samonosive izvedbe, konstrukcije sa potporom i konstrukcije bez vlastite stabilnosti. Samonosiva izvedba sastoji se od cijevi s valovitim utorima koji im daju veliku stabilnost i dobru savitljivost. Cijevi bez šava ili od trake s otvorenim šavom moraju se pri savijanju poduprijeti (aluminijumska cijev). Vanjski vodiči od žičnog opleta i traka nemaju vlastite stabilnosti.

Prijenosna svojstva koaksijalnog kabela određena su unutarnjim i vanjskim polumjerom r_u i r_v obaju vodiča i izabranim dielektrikom.

Valna otpornost iznosi:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_\infty}{C}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_{rez}}} \ln \frac{r_v}{r_u}, \quad (21)$$

gdje je ϵ_{rez} rezultirajuća relativna dielektričnost.

Za karakterističnu konstantu prigušenja $\alpha_c = \frac{R}{2Z_0}$ uz isti materijal unutarnjeg i vanjskog vodiča vrijedi:

$$\alpha_c = \frac{\sqrt{\epsilon_{rez}}}{2r_v \vartheta \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}}} \frac{1 + \vartheta}{\ln \vartheta},$$

gdje je $\vartheta = r_v/r_u$, ϑ ekvivalentna debljina vodljivog sloja i $\propto$ vodljivost materijala vodiča.

Postoji, dakle, odnos q_0 za koji je prigušenje uz određeno r_v minimalno, a to je $q_0 = 3,6$.

Ako se u jedn. (21) uvrste brojne vrijednosti od π , od $\mu_0 = 0,4 \pi \cdot 10^{-6}$ H/m, od $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m i za $r_v/r_u = 3,6$, dobiva se da valna otpornost kabela s minimalnim prigušenjem iznosi $Z_0 = 77/\sqrt{\epsilon_{rez}} \Omega$. Iz te se formule vidi kojeg je reda veličine taj važni parametar koaksijalnog kabela.

Karakteristična fazna konstanta iznosi

$$\beta = \omega \sqrt{L_\infty C} = \omega \sqrt{\mu \epsilon_0 \epsilon_{rez}}.$$

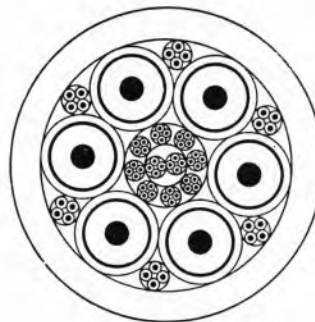
Ravnomjerna prijenosna svojstva, naročito valne otpornosti, osnovni su uvjet za ograničenje pratećeg toka korisnog signala. To vrijedi kako za pojedine fabrikacione duljine tako i za kabelske dionice sastavljene od duljina namotanih na pojedinim bubnjevima. Zbog toga je potrebna naročita preciznost pri konstrukciji, fabrikaciji, a i pažnja pri polaganju kabela. Kao mjerilo unutarnje ravnomjernosti pri ispitivanju impulsa oblika $\sin^2 x$, odnosno $\cos^2 x$, vrijedi maksimalni faktor refleksije unutar kabelske duljine ili ekvivalentni faktor refleksije, jednak onom odstupanju valne otpornosti na početku voda koje daje istu reflektiranu snagu kao i zbroj svih razdijeljenih refleksija na kablovoj duljini.

Naponska čvrstoća zahtijeva se pri prijenosu signala visokih pogonskih napona i snage, npr. u antenskim koaksijalnim kablama ili pri daljinskom napajanju međupojачala koja su ugrađena duž kablovske linije. Pri određenom polumjeru vanjskog vodiča i određenom naponu postoji optimalni polumjer unutarnjeg vodiča pri kome je jakost polja na unutarnjem vodiču minimalna.

Koaksijalni kabeli za telefonski saobraćaj. Za telefonski saobraćaj na velike udaljenosti normirani su i preporučeni ovi tipovi koaksijalnih vodova: normalna koaksijalna tuba s promjerom unutarnjeg vodiča 2,6 mm i unutarnjim promjerom vanjskog vodiča 9,5 mm (oznaka 2,6/9,5 mm) i mala koaksijalna tuba 1,2/4,4 mm. Izolacija normalne tube izvedena je od natisnutih polietilenskih koluta. Vanjski vodič je bakrena traka 0,25 mm debljine čiji su rubovi nazubljeni i tupo sastavljeni. Kao mehanička potpora i ujedno magnetsko zakriljavanje služe dvije namotane željezne trake. Nominalna vrijednost valne otpornosti pri 1 MHz je 75 Ω . Prigušenje iznosi za 4 MHz 0,55 Np/km, a brzina prostiranja 286 Mm/s. Za prijenos informacija u oba smjera potrebne su dvije koaksijalne tube, koje mogu biti u istom kabelu jer je prigušenje preslušavanja dovoljno veliko.

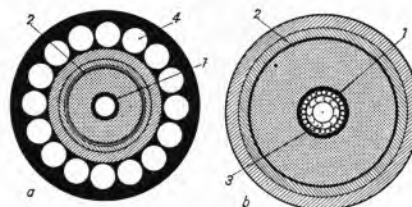
Za kraće udaljenosti i za manji broj potrebnih govornih krugova preporuča se koaksijalna tuba manjih dimenzija, tj. 1,2/4,4 mm s ovim karakteristikama: prigušenje pri 1 MHz 0,61 Np/km, valna otpornost 75 Ω .

Koaksijalni vodovi upredaju se često zajedno s telefonskim vodovima (paricama i četvorkama) u srž istog kabela (sl. 55).



Sl. 55. Shematski presjek telekomunikacionog kabela u kome su koaksijalne cijevi (tube) upletene zajedno sa zvjezdastim četvorkama

Podmorski koaksijalni kabeli s homogenom izolacijom upotrebljavaju se za veze između kontinenata ili između kopna i otoka. Pri polaganju takvih kabela potrebna je velika čvrstoća na vlak i tlak. Danas postoje dvije konstrukcije. Starija ima unutarnji vodič, punu polietilensku izolaciju i vanjski vodič od bakrenih traka koji čine električki dio, a radi mehaničke čvrstoće primijenjen je plašt s armaturom od čeličnih žica (sl. 56 a). Pri novoj konstrukciji, tzv. laganom kabelu (sl. 56 b), nalaze se elementi za čvrstoću na vlak u unutrašnjosti šupljeg unutarnjeg vodiča.



Sl. 56. Podmorski koaksijalni kabel. a Klasični kabel s vanjskom armaturom, b kabel modernije izvedbe s čeličnim užetom smještenim u unutarnjem vodiču. Uže služi za svladavanje vlaka prilikom polaganja. 1 Unutarnji vodič, 2 vanjski vodič, 3 čelično užo, 4 armatura

Uz isti vanjski promjer kabela, električni presjek je povećan, prigušenje smanjeno, a uz isti broj pojačala može se prenositi širi pojas frekvencija. Masa laganog kabela u vodi je samo trećina mase kabela starijih konstrukcija. Karakteristike obaju kabela prikazuje tabl. 14.

Tablica 14
KARAKTERISTIKE PODMORSKIH KOAKSIJALNIH KABELA

Karakteristika	Kabel s plaštem	Lagani kabel
r_u/r_v	4,1/15,8 mm	8,6/25,4 mm
Vanjski promjer	32,3 mm	33 mm
Težina u vodi	0,98 t/km	0,33 t/km
a na 15 °C	0,11 Np/km	0,13 Np/km
$ Z_1 $	pri $f = 200$ kHz 55 Ω	pri $f = 608$ kHz 44 Ω

Strani utjecaji na vodove i njihovo sprečavanje

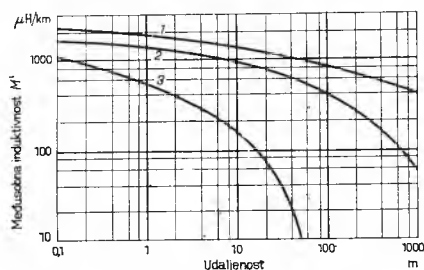
Utjecaji jakostrujnih vodova. Postrojenja jake struje (npr. dalekovodi, kontakti vodovi električnih željeznica) okružena su jakim magnetskim poljima koja mogu u telekomunikacijskim zračnim i kablovskim vodovima u njihovoj blizini izazvati oštećenja i prouzrokovati stalne smetnje (šumove). Do oštećenja (probijanja izolacije kabela i oštećenja postrojenja za obradu i prijenos informacija) može doći uslijed pojave struja velike jakosti prilikom

kratkog spoja na vodovima jake struje, a *trajne smetnje* može izazvati valovitost struje, npr. prisustvo viših harmoničkih (dionih) titraja kakvi se pojavljuju nakon ispravljanja pri električnoj vuči koja radi sa zemljom kao povratnim vodičem (v. *Elektrifikacija željeznica*, str. 291). Do smetnji dolazi također uslijed zračenja jakih radio-odašiljača, čije se frekvencije poklapaju s frekvencijama uređaja za prijenos informacija.

Medusobna induktivnost po jedinici duljine M' strujnih krugova i zemlje oko sistema koji su pod međusobnim utjecajem određuje visinu induciranog napona E prema formuli

$$|E| = |I| \omega M' l. \quad (22)$$

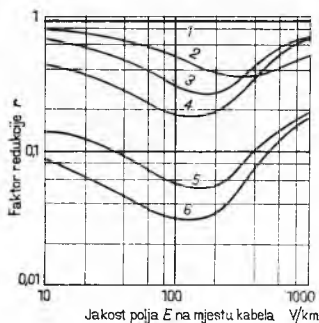
Ova međusobna induktivnost ovisi o udaljenosti vodiča i o vodljivosti zemljišta (sl. 57). Ona je manja za zemlju s dobrom vodljivošću, a veća pri lošijoj vodljivosti (npr. na kršu).



Sl. 57. Međusobna induktivnost između smetanog i smetajućeg voda pri frekvenciji 50 Hz. 1. Dobro vodljivo zemljište (stijena), 2. srednje vodljivo zemljište, 3. slabo vodljivo zemljište

Kako struje kratkoga spoja u vodovima visokog napona mogu kratkotrajno poprimiti i vrijednosti od nekoliko tisuća ampera, a paralelno protezanje kabela i visokonaponskog voda može biti i nekoliko kilometara, to inducirani naponi mogu dostići i znatne vrijednosti. Na primjer, kad struja kratkog spoja u vodu jake struje (npr. u kontaktnom vodu električne željeznice) iznosi $I = 3 \text{ kA}$, a međusobna induktivnost $M' = 0,4 \text{ mH/km}$ (što odgovara razmaku od 100 m između voda jake struje i telekomunikacionog voda u srednje vodljivom zemljištu, v. sl. 57), inducirani napon po jedinici duljine voda iznosi prema jednadžbi (22) $E' = E/l = 3 \cdot 10^3 \text{ A} \times 314/\text{s} \times 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ H/km} \approx 380 \text{ V/km}$.

Faktor redukcije. Ako kabel ima plašt od dobro vodljivog materijala, plašt djeluje kao kompenzacioni vodič. Polje povratnog djelovanja struje koja se pojavljuje u kabelskom plaštu umanjuje induciranu EMS u zamki vodič-kabelski plašt. Ovo je izraženo faktorom redukcije:



Sl. 58. Faktor redukcije različitih kabelskih omotača za telekomunikacione kabele promjera 30 mm pri frekvenciji 50 Hz. 1. Goli olovni omotač, 2. čelični valoviti omotač, 3. čelični omotač, 4. aluminijumski omotač, 5. olovni omotač s čeličnom vrpcom, 6. aluminijumski omotač s čeličnom vrpcom

Radi dobrog zakrivanja, tj. postizanja niskog faktora redukcije, treba otpornost plašta smanjiti, a njegovu induktivnost povećati. Mala otpornost i mala težina prednosti su aluminijumskih plašteva. Induktivnost se može povećati omatanjem plašta čeličnim trakama. Primjenom trakâ od materijala kojemu se permeabilnost s jakošću polja povećava može se smanjiti polje utje-

caja u nepoželjnom području jakosti. Faktor redukcije za različite vrste plašteva (omotača) za telekomunikacione kabele pri različitim induciranim naponima prikazuje sl. 58.

Zaštita od udara groma. Direktni su udari groma u nadzemne vodove ili kabele rijetki, ali kad se dogode, posljedica im je razaranje voda. Pri udarima groma u blizini vodova nastaju u nadzemnim vodovima zbog influencije prenaponi; od njih se valja zaštititi odvodnicima koji odvođe nastale struje prema zemlji. Ta je zaštita naročito potrebna na mjestima gdje se zračni vodovi spajaju s kabelima ili se uvode u zgrade i postrojenja. Kabeli koji se nalaze u području struja koje teku u zemlji nakon udara groma mogu pretrpjeti štetu od struja koje prelaze na kabel i od nastalih napona. Ako kabelski plašt ima neprekidno vodljivi spoj sa zemljom u okolici, prelazi jedan dio struje groma u blizini mjesta udara u kabelski plašt, teče po njemu i raspodjeljuje se iz plašta na većoj duljini po zemlji u okolici. Struja koja teče po plaštu prouzrokuje pad napona, tako da nastaje napon između plašta i kabelskih žila (vodiča), koje se nalaze na potencijalu zemlje dalekog postrojenja. Taj napon može postati tolik da probije izolaciju između žila i plašta. Naročito je kritičan slučaj kad je vodljivost zemlje u okolici mala, jer tada struje groma teku daleko po kabelskom plaštu.

Kabel je bolje zaštićen ako je vodljivost kabelskog plašta veća i ako je izolacija između žila i plašta bolja. Stoga se sigurnost od groma određene konstrukcije plašta definira *faktorom kvaliteta kabela* q :

$$q = \frac{\text{čvrstoća izolacije na udarni napon}}{\text{uzdužna otpornost plašta}}$$

Zbog toga moraju kabeli s plaštom od polietilena u područjima jako ugroženim od groma imati plašt posebne konstrukcije, koja osigurava neprekidan vodljiv spoj sa zemljom i visok faktor kvaliteta.

V. Matković

PROIZVODNJA VODOVA I KABELA

Broj vrsta vodova i kabela koji se danas proizvode za različite namjene izvanredno je velik. Međutim, i za vodove i kabele koji su predviđeni za istu svrhu primjenjuju se često različite konstrukcije, različni proizvodni postupci i raznovrsni materijali (npr. bakar ili aluminijum, guma ili termoplastične mase). Proizvodni procesi često su za kabele iste namjene različiti, a za kabele različite namjene jednaki ili slični. Zato za prikaz proizvodnje kabela nije pogodna njihova podjela po namjeni, a ni uobičajena podjela po vrsti i obliku vodiča, po izolaciji, broju žila, armaturi, zaštiti, frekvenciji ili naponu, itd. U ovoj glavi opisani su stoga pojedini procesi proizvodnje, a ne proizvodnja pojedinih vrsta vodova i kabela prema bilo kojoj klasifikaciji.

Izrada vodiča počela je čim se električna struja počela primjenjivati za praktične svrhe. Kao materijal za vodiče od prvih početaka se upotrebljavao bakar. Prve su izolacije kabela bili omoti ili opleti od vune, jute, papira, pamuka i prirodne svile natopljene voskom ili asfaltnom masom. Prvi takvi kabeli predviđeni za ulično rasvjetu uvlačili su se u željezne cijevi. Najviši napon koji su takvi kabeli mogli izdržati iznosio je 2000 V. Znatno poboljšanje postignuto je izolacijom od gutaperke koja se počela od sredine XIX st. nanositi na vodič prešama. S njom je izrađen i prvi telegrafski podmorski kabel 1866; na njemu je primijenjena i armatura od čeličnih žica koja se na kopnu kabela uvodi tek 1885. Pred više od 100 godina upotrijebljena je za izolaciju vodiča vulkanizirana kaučukova mješavina, a proces nanošenja je 1879 patentiran u Engleskoj. Impregnirani papir počeo se primjenjivati za izolaciju vodiča 1884. God. 1891 položen je prvi (Feranti) kabel predviđen za napon 10 kV; duljina mu je bila 30 milja a izgrađen je u komadima po 20 stopa uz upotrebu 7-8 hiljada spojeva. Posljednji je njegov dio odstranjen tek 1933. godine. 1890 je prvi put upotrijebljen papirni kordel za izolaciju telefonskih kabela. Höchstätter uvodi 1913 ekraniziranje žila visokonaponskih kabela. U Italiji je izrađen 1925 prvi uljni kabel, a već 1927 proizvode se takvi kabeli za napon do 138 kV. Izrada plinskih kabela počela je 1930.

Preša za olovne cijevi pronađena je 1797; u Njemačkoj je 1851 nanesen na kabel prvi olovni plašt a 1928 prvi aluminijumski prešani plašt. Odmah iza 20-tih godina ovog stoljeća razvijaju se preše za izradu izolacija od plastičnih masa, 1935 se uvodi pužna brizgalica s električnim i parnim grijanjem, a 1936 proizvedena je brizgalica samo za polivinilklorid koji se počeo proizvoditi tek nekoliko godina prije toga. 1938 proizvedena je brizgalica s potpunim električnim grijanjem i dvostrukim pužem.

U svom brzom razvoju električni su kabeli uspješno pratili nagli uspon elektrotehnike i elektronike, te su ga u dobroj mjeri i omogućili. Stalno usavršavanje kabela ide za smanjenjem njihove cijene, pronalaženjem prikladnijih novih materijala i podizanjem pogonske pouzdanosti, jer kabeli koji se u sve većem broju primjenjuju u modernim instalacijama i distributivnim mrežama predstavljaju osnovu njihovog sigurnog rada.

$$r_k = \frac{E_a}{E},$$

gdje je E_a inducirana EMS između vodiča i plašta, a E inducirana EMS u nezaštićenom vodiču. Taj je faktor određen i omjerom otpornosti sprege prema otpornosti R kabelskog plašta za izmjeničnu struju:

$$r_k = \frac{R_k}{R} \approx \frac{R'_m}{R'_m + j\omega L'},$$

gdje je R'_m otpornost omotača za istosmjernu struju, a L' induktivnost plašta.

Proizvodni postupci

Izrada svakog kabela počinje izradom njegova vodiča. Žica vodiča se najprije izvlači do propisanog promjera, žari radi omekšanja i eventualno površinski obradi. Radi postizanja većeg presjeka ili bolje savitljivosti više se žica usuče u snop, kome se po potrebi daje još i pogodan oblik. Na taj način proizveden puni vodič ili uže zatim se izolira nanošenjem prikladnog izolacionog materijala. Najčešće se izolirane žile jedne s drugima použe (usuču), a praznine između pojedinih žila ispunjavaju ispunom. Kod visokonaponskih kabela nanosi se sloj slabo vodljivog materijala, a ponekad se preko izoliranih žila i ispunu postavlja dodatni izolacioni sloj (pojasni kabeli, v. str. 240). Dalji proizvodni postupci ovise o vrsti kabela, njihovoj namjeni i uvjetima polaganja. Tako se npr. preko svih žila postavlja radi njihove zaštite od vlage, mehaničkih i kemijskih utjecaja pogodan plašt od olova, bakra, aluminijuma ili plastičnih masa. Armatura (oklop) nanosi se preko plašta radi njegove zaštite od mehaničkih oštećenja i naprezanja. U kabelima s uljem ili plinom pod pritiskom plašt se pojačava dodatnim metalnim bandažama ili pojačanim armiranjem. Da bi se spriječila korozija, željezna se armatura prevlači posebnim zaštitnim slojem.

Najvažniji proizvodni postupci koji se danas primjenjuju pri proizvodnji bit će opisani u daljem izlaganju.

Izrada vodiča. Za izradu izoliranih vodova upotrebljavaju se danas skoro isključivo visokokvalitetni bakar (E-Cu) i visokokvalitetni aluminijum (E-Al) za elektrotehniku (v. *Aluminijum, Bakar*, TE 1, str. 235 i 664). Za vodiče nadzemnih vodova primjenjuje se užad izrađena i od različitih legura ili kombinacija različitih materijala radi postizanja veće čvrstoće (v. članak *Dalekovodi*). Najvažnije karakteristike bakra i aluminijuma za izolirane vodove i kabele prikazuje tabl. 15.

Tablica 15

KARAKTERISTIKE ELEKTROTEHNIČKOG BAKRA I ALUMINIJUMA

Karakteristika	Jedinica	Materijal	
		E-Cu	E-Al
Čistoća (minimalna)		99,9%	99,5%
Specifična masa	kg/m ³	0,0089	0,002703
Prekidna čvrstoća	kp/mm ²	20...30	7...17
Prekidno istezanje (minimalno)		15...30%	1...25%
Specifični električni otpor na 20 °C	Ω m	1,7241·10 ⁻⁸	2,8264·10 ⁻⁸
Specifična električna vodljivost na 20 °C	S/m	58·10 ⁸	36·10 ⁸
Temperaturni koeficijent otpora	1/°C	0,00393	0,00403

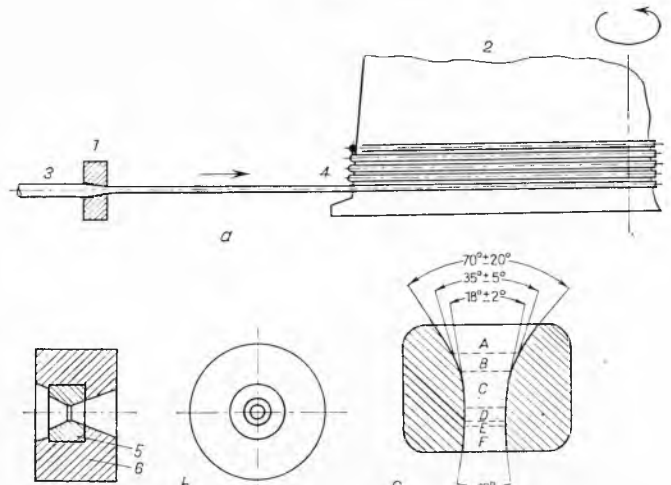
Bakrene i aluminijumske žice koje se upotrebljavaju u proizvodnji vodova i kabela moraju imati čistu i glatku površinu bez pukotina, brazdi, tragova kemijskih promjena i stranih tijela. One moraju biti pogodne za izvlačenje u hladnom stanju.

Skidanje oksidnog sloja s površine bakrene žice mora se provesti prije početka izvlačenja, kako zaostaci oksida ne bi oštetili matrice za izvlačenje i kako se prilikom izvlačenja ne bi utisnuli u žicu, jer to može uzrokovati pucanje žice. Oksidni se sloj obično skida luženjem, a za najkvalitetnije žice i ljuštenjem. **Luženje** vrši se umakanjem kotura žice u kupku razrijeđene sumporne kiseline (~10 °Bé) na temperaturi 60...80 °C. Bakar koji se pri tom otapa rekuperira se kristalizacijom kao bakar-sulfat ili elektrolizom kao metalni bakar. Po završenom luženju koturi žice dobro se isperu mlazovima vode i ostaci kiseline neutraliziraju u kupki vode od 80 °C. Dobro lužena žica ima metalnocrvenu boju. Postupak **ljuštenja** («skalpiranja») žice prije izvlačenja primjenjuje se umjesto luženja samo pri izradi najkvalitetnijih lakiranih žica. Pri tome žica prolazi kroz stroj koji joj mehanički skida oksid. Žica se dobiva potpuno čista, a ostrugani oksid zajedno sa skinutim bakrom ide na ponovnu preradu. S aluminijumskih žica nije potrebno skidati oksidni sloj.

Izvlačenje je hladna deformacija kojoj se podvrgava očišćena žica radi smanjenja njena promjera. Žica se deformira uslijed djelovanja uzdužnih sila izvlačenja i njima izazvanih poprečnih sila koje nastaju prilikom prolaza žice kroz konično suženje u izvlačnoj matrici (sl. 59 c). S obzirom na konstantnost volumena mijenja se pri izvlačenju i duljina žica jer je

$$S_0 l_0 = S_1 l_1 \quad i \quad l_1 = l_0 \frac{S_0}{S_1},$$

gdje S_0 i S_1 znači presjek, a l_0 i l_1 duljinu prije i poslije izvlačenja.



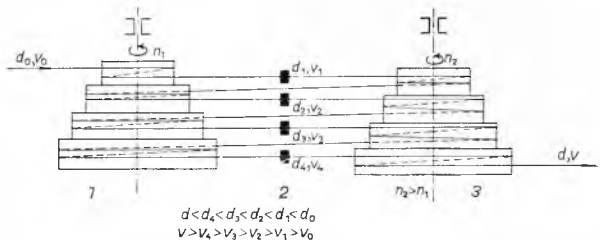
Sl. 59. Izvlačenje žice. a) Princip stroja za izvlačenje žice, b) okvir s jezgrom, c) presjek jezgre; 1 okvir, 2 bubanj, 3 neizvučena žica, 4 izvučena žica, 5 jezgra, 6 okvir, A...F pojedine zone jezgre

Nakon svakog stepena izvlačenja povećava se zbog produljenja žice i brzina kojom se žica izvlači iz matrice:

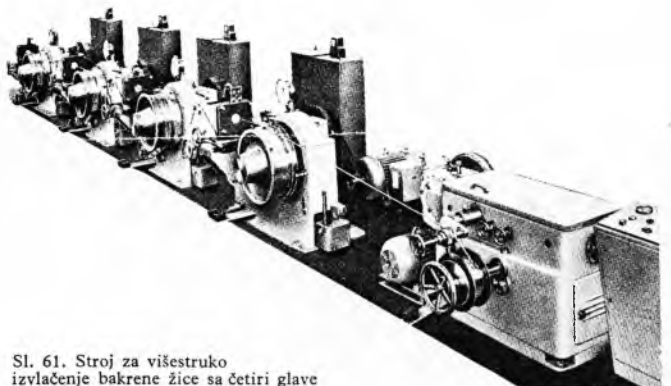
$$S_0 v_0 = S_1 v_1 \quad i \quad v_1 = v_0 \frac{S_0}{S_1},$$

gdje v_0 znači brzinu ulaska, a v_1 brzinu izlaska žice.

Stroj za izvlačenje žice sastoji se načelno od okvira s matricom, bubnja koji vuče žicu i namotača (sl. 59). Strojevi mogu



Sl. 60. Princip višestepenog izvlačenja žice. 1) Bubnjevi za namatanje, 2) serija izvlačnih matrica, 3) povlačni bubnjevi



Sl. 61. Stroj za višestruko izvlačenje bakrene žice sa četiri glave

biti jednostepeni (s jednom matricom i jednim bubnjem) ili višestepeni (sl. 60, 61). Sila kojom bubanj vuče žicu mora savladati sile deformacija, dodatnih pomaka u materijalu i trenje. Pri tome je od velikog značaja pravilno odabran odnos pojedinačne redukcije presjeka žice, broj ukupnih izvlačnih stepeni stroja i ispravno oblikovanje provrta matrice uz prikladno odabrano sredstvo za podmazivanje.

Matrice kroz koje se provlači žica radi smanjenja presjeka sa- stoje se od okvira i jezgre s provrtom koja predstavlja njen radni i najvredniji dio. Provrt jezgre može se podijeliti u više zona: ulazni dio *A*, lijevak maziva *B*, izvlačni konus *C*, cilindrični dio *E* i izlazni konus *F* (v. sl. 59c). Jezgre za izvlačenje žice do ~0,5 mm promjera izrađuju se od tvrdih nezasićenih sinterovanih karbida volframa ili molibdena, ponekad i uz dodatak Cr, Ti, Ta, Zr, a oblikuju se jedino lijevanjem, prešanjem i naknadnim brušenjem. Zone provrta bruse se uz pomoć dijamantnog ili borkarbidnog praha različite veličine zrna priređenog u obliku paste. Za izvla- čenje tanjih i najtanjih žica dolaze u obzir samo jezgre od sirovih dijamana zbog svoje prirodno visoke otpornosti prema trošenju.

Izvlačenje bakra počinje obično od ulaznog promjera 6 ili 8 mm, a aluminijuma od 9 ili 12,5 mm. Prvo se izvlačenje vrši na tzv. grubim prugama sastavljenim obično od više jednostepe- nih strojeva poredanih u niz od 5...11 jedinica, a nastavlja se na višestepenom stroju. Pojedinačni jednostepeni strojevi imaju obično vlastite pogone, matrice su hladene vodom, a kao maziva upotrebljavaju se različita suha sredstva: sapuni, loj, stearati i dr. Izvučena i namotana žica na bubnju prvog stroja odmeta se i kontinuirano ulazi u matricu slijedećeg i tako redom do posljed- njeg stroja. Višestruki strojevi s nizom matrica (do 25) imaju grupni pogon povlačnih konusa kojima prema manjim promjerima žice raste promjer a time se povećava i obodna brzina. Matrice se hlade tekućim mazivima kao što su repičino ulje ili vodene emulzije, sistemom mlaza ili uranjanjem čitavog sistema u emulziju. Iako svi izvlačni strojevi rade po istom principu, oni su građeni za izvlačenje žice u određenim područjima promjera, tako da se izvlačenje od ulazne do najfinije žice obavlja na nekoliko strojeva, već prema potrebnom konačnom promjeru.

Kako u toku svakog izvlačenja žica postaje tvrđa i time joj opada sposobnost da se plastično deformira, pa dalje izvlačenje može biti otežano i dovesti do pucanja žice, primjenjuje se postu- pak *međužarenja*, nakon kojeg žica ponovo omekša što olakšava dalje izvlačenje.

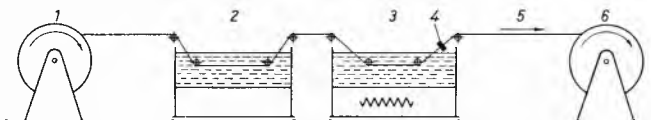
Uz strojeve za izvlačenje žica većih promjera treba imati i uređaj za *šiljenje* žice. Šiljenje je, naime, potrebno radi lakšeg uvođenja i provlačenja žice kroz matricu stroja za prvo izvlačenje. Žice manjih promjera šilje se ručno. Za nadostavljanje žice radi dobivanja veće duljine ili za spajanje žice u slučaju prekida služe aparati za tupo zavarivanje.

Žarenje žice vrši se radi njezina omekšanja nakon što je prošla proces izvlačenja i time postala odviše kruta. Žarenjem treba po- stići temperaturu rekristalizacije materijala koji se kreće, ovisno o promjeru žice, između 300 i 400 °C. Time se postiže otprilike dvostruko povećanje zrna. Dulje trajanje žarenja, pogotovo na temperaturi preko 500 °C, uzrokuje ljuštenje žice, a kod žica koje su namotane u kaleme, pogotovo tanjih, izaziva zaljepljivanje namotaja (zavarivanje uslijed difuzije). Proces žarenja mora se odvijati bez prisustva kisika jer on uzrokuje površinsku oksidaciju. To se postiže bilo eliminiranjem kisika iz zraka redukcijom (npr. drvenim ugljenom), bilo žarenjem u zaštitnoj atmosferi (npr. dušika sa 5...8% vodika, zemnog p'ina ili vodenih para bez kisika), bilo žarenjem pod apsolutnim tlakom 15...20 mmHg.

Žarenje provodi se bilo u zatvorenim električno grijanim loncima bilo u zatvorenim posudama koje se griju ugljenom ili plinom. U upotrebi su i peći kroz koje žica u toku procesa pro- izvodnje prolazi, a koje se griju električnom strujom, plinom ili uljem za loženje. U uređajima s kontinuiranim žarenjem žica se zagrijava prolaskom struje kroz nju. Za dovod struje u tom slučaju služe kotači preko kojih žica prolazi. Jakost struje regulira se tako da pri određenoj brzini prolaza i određenoj dimenziji žice dolazi do pravilnog zagrijavanja i traženog omekšanja materijala. Struja, koja može imati jakost i do nekoliko tisuća ampera, dobiva se iz posebnih regulacijskih trofaznih transformatora. Napon kreće se obično između 10 i 30 V. Žarenje obavlja se u tom slučaju u vertikalnim cijevima koje su uronjene u rashladnu vodu; voda ujedno s donje strane sprečava ulaz zraka (kisika), a s gornje strane ulazak zraka sprečavaju pare koje se izvane dovode u cijev i one koje se osim toga stvaraju prilikom prolaska vruće žice kroz vodu. Vrijeme prolaska kroz zonu žarenja vrlo je kratko (iznosi ~ 0,5 s). Pri tome se postiže kod bakra temperatura 380...420 °C, a kod žice od aluminijuma 380 °C. Postrojenje se sastoji od potpunog

stroja za izvlačenje iz kojeg izvučena žica prije namatanja prolazi još i kroz uređaj za kontinuirano žarenje. Vodiči kabela s kera- mičkom izolacijom žare se kao potpuno izrađeni proizvodi.

Kositrenje bakrenog vodiča potrebno je kad se vodič izolira gumenom mješavinom, da bi se spriječilo korozivno djelovanje sumpora iz gume na vodič, kao i starenje gume zbog utjecaja nastalih bakrenih spojeva. Kositrenje se vrši prolazom žice kroz rastaljeni kositar (sl. 62). Prethodno se žica očisti provlačenjem kroz razrijeđenu solnu kiselinu ili neku drugu otopinu. Žica nakon otiranja ulazi u kupku. Talina je ili čisti kositar Sn ili mješavina Sn i Pb uz mali dodatak Sb i Bi, a rjeđe još Ni ili Cd. Temperatura taline ovisna je o debljini žice i brzini prolaza, a kreće se između 320 i 470 °C. Površina kupke pokriva se ili drvenim ugljenom ili tinjcem radi zaštite od oksidacije i prevelikog gubitka topline.

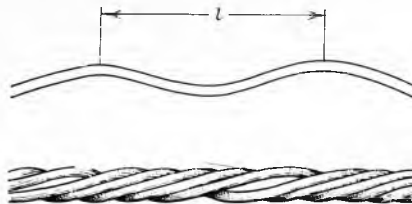


Sl. 62. Shematski prikaz postupka za kositrenje bakrene žice. 1. Odmatanje, 2. odmašćivanje, 3. kupka s kositom koju zagrijava električno grijalo, 4. otirač suvišnog kositra, 5. zračno ili vodeno hlađenje, 6. namatanje

Iza kupke žica prolazi kroz otirače suvišnog nanosa, hladi se zrakom ili vodom i namata. Dobro kositrena žica mora imati sjajnu i glatku površinu.

Galvansko kositrenje upotrebljava se obično pred ulazom žice u izvlačni stroj, ali se zasad rjeđe primjenjuje. Kositrenje se nekad primjenjuje i kod vodova izoliranih plasticima, npr. kod spojnih telefonskih žica radi lakšeg lemljenja ili iz estetskih razloga kod vodova s prozirnom izolacijom koji služe za priključak aparata.

Sukanje (použavanje, upredanje) postupak je kojim se više golih ili izoliranih žica («elemenata») ili od njih sačinjenih grupa jedne s drugima usuću, tvoreći tako uže. Pojedini element helikoi- dalno okružuje elemente ispod sebe tako da je stvarna duljina svakog elementa, osim središnjeg, koji se ne suče, veća od duljine proizvedenog užeta. Korak sukanja (použenja) jest aksijalna uda- ljenost dviju tačaka istog elementa nakon što ovaj opiše puni kut (360°) po opsegu svog sloja (sl. 63). Iznos koraka ovisan je o kutu



Sl. 63. Korak použavanja (sukanja)

pod kojim se element suće te raste sa smanjenjem kuta, a njegova veličina određuje savitljivost vodiča ili kabela. Većem koraku uz jednaki broj i vrstu elemenata odgovara manja savitljivost. Pravilno ili normalno sukanje (s približno istim kutom sukanja u svim slojevima) primjenjuje se za višežične vodiče i žile nekih kabela, a izvodi se s jednim ili više slojeva. Svaki sloj ima uvijek po 6 elemenata jednakog promjera više nego prethodni sloj. Elementi

Tablica 16
BROJ ŽICA U POJEDINIM SLOJEVIMA VODIČA
u ovisnosti o broju žica u središnjoj jezgri pri normalnom sukanju

Broj žica u			
središnjoj jezgri	I sloju	II sloju	III sloju
1	6	12	18
2	8	14	20
3	9	15	21

svakog sloja dodiruju elemente ispod sebe i oba susjedna elementa u svom sloju. Broj elemenata u pojedinim slojevima snopa vodiča pri normalnom sukanju pokazuje tabl. 16.

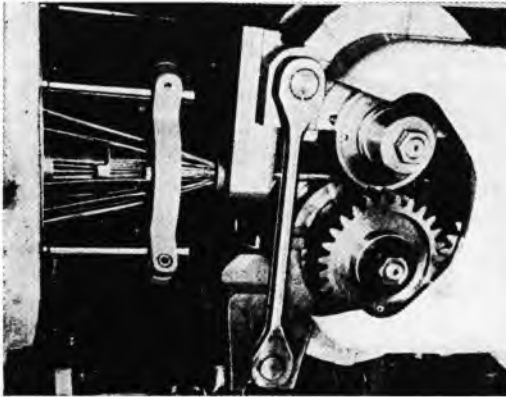
Konstrukcija vodova. Pojedini vodiči vodova izrađuju se bilo samo od jedne pune (masivne) žice bilo od više usukanih žica.

Jednožični vodiči mogu imati okrugli ili profilni (npr. sektorski) presjek. Bakreni masivni vodiči izrađuju se samo za presjeke 0,5...16 (rjeđe 35) mm², aluminijumski za presjeke 2,5...240 mm², a i veće.

Vodiči s više žila dijele se u standardima prema broju i presjeku žica na višezične (npr. sa ~19 žica za presjek 70 mm²), na mnogožične (npr. sa 189 žica za isti presjek), na finožične (npr. sa 560 žica za isti presjek), i na vodiče s najtanjom žicom (npr. sa 1427 žica za isti presjek). Takvi vodiči se već prema broju žica izrađuju u jednom ili više slojeva. S tanjom žicom i s više slojeva postiže se bolja savitljivost voda.

Kompaktirani vodiči dobiju se iz normalno sukanih okruglih vodiča koji se radi smanjenja promjera a uz zadržavanje istog efektivnog presjeka posebnim postupkom provlače kroz matricu ili kalibrirane valjke da bi se zbili na manji ukupni presjek. Time se povećava tzv. faktor punjenja vodiča. Promjer se vodiča pri tom smanji za ~8% i time se štedi dalji materijal izrade kabela. Rjedi oblik kompaktiranja je izrada vodiča od žica različitih promjera da bi se bolje popunio prostor. Slojevi se u tom slučaju suču u istom smjeru.

Vodiči sektorskog presjeka (v. sl. 22) također su kompaktirani. Uže okrugla oblika pretvara se u neki drugi oblik prolaskom kroz uređaj sa dva valjka koji ga gnječe. Tako dobiveni sektorski vodič bit će ravan ako osi valjaka miruju (sl. 64) ili spiralan ako sistem



Sl. 64. Valjci za ravno sektoriranje vodiča

valjaka rotira oko osi užeta. Brzina te rotacije određuje korak budućeg pouzjenja žile u kabel. Sektorski oblikovani vodiči služe kao žile višezičnih energetskih kabela za niže visoke napone (npr. do 6 kV). Takvim se oblikom vodiča postiže smanjenje promjera kabela pri zadanom presjeku vodiča, ušteda materijala, manja težina i sniženje proizvodnih troškova.



Sl. 65. 300 kV-ni kabel sa šupljim vodičem (za prolaz ulja) koji je sukan iz predprofiliranih žica

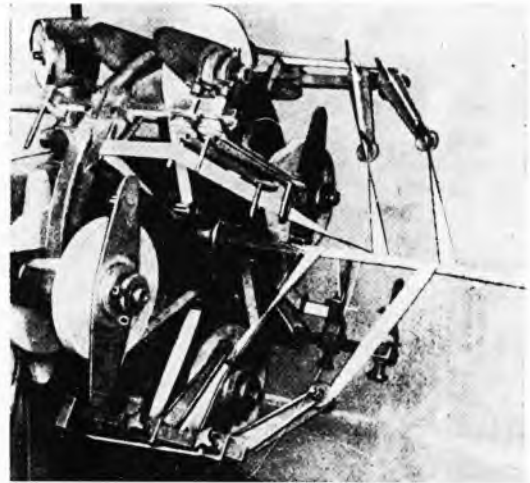
Vodiči savitljivih priključnih vodova izrađuju se jednostavnim uvrtanjem većeg broja tankih golih ili izoliranih žica (npr. za visokofrekventne pletenice). U jednom snopu može biti i do 85 žica promjera 0,08...0,4 mm, a suču se do ukupnog presjeka od 10 mm². Iako se tu radi o nepravilnom pouzavanju, vodiči savitljivih vodova imaju zadovoljavajući okrugli presjek. Upotrebljavaju se u visokofleksibilnim vodovima kao što su savitljivi priključni vodovi (gajtani za kućnu i radioničku upotrebu, kabeli za dizala i druga pokretna trošila, spojne žice i sl).

Šuplji vodiči upotrebljavaju se u uljnim kabelima, a izrađuju se sukanjem prethodno profiliranih žica (sl. 65).

Vodiči za specijalne namjene jesu cijevni, bakreni, posrebrjeni, čelični i pobakreni, koncentrični, ovalni, pleteni i dr.

Izoliranje vodiča. Hladno izoliranje vodiča vrši se uzdužnim omatanjem izolacije, spiralnim obavijanjem vodiča uzicom (kordelom) za održavanje udaljenosti od drugog vodiča, diskontinuiranim nanošenjem okruglih pločica i utiskivanjem izolacionog praha. Izolacioni materijali su papir, termoplastične mase, guma, svila, pamuk, lakirano platno, azbest i magnezijum-oksidi.

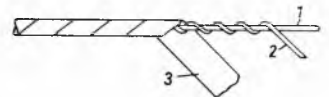
Papirna izolacija. Klasična izolacija jakostrujnih kabela jest papir od tehnički čiste natronske celuloze. U času nanošenja treba da ima do 25% vlage radi veće čvrstoće i boljeg prilijeganja.



Sl. 66. Glava stroja omatalice za papirnu izolaciju

Mora imati dobru propustljivost na zrak i impregnaciona ulja, visoki izolacioni otpor (reda 10¹⁶ Ω cm). Prosječna je debljina papira za izolaciju 0,125 mm, a za vrlo visoke napone 0,10...0,03 mm. Broj slojeva papira izolacije ovisi o konstrukciji i pogonskom naponu. Pojedinačni strojevi omatalice koji rade sa po četiri do osam papirnih traka (sl. 66) postavljaju se u niz, te mogu nanositi i do 144 traka papira u jednoj radnoj operaciji. Po završenom postupku papir se mora temeljito pod pritiskom impregnirati rafiniranim vrućim mineralnim uljima, ali prethodno se mora papir zagrijati i sušiti u vakuumu. Ulja su mineralna s dodacima kolofonija, polizobutilena (Opanola), polietilena i dr., a bez parafina, sumpora i asfalta. Dodacima polimera ugljikovodika umjesto kolofonija postiže se smanjenje električnih gubitaka. Nakon impregnacije papir postiže visoku dielektričnu čvrstoću (45...55 kV/mm). Relativna dielektričnost iznosi 2,0...2,5 pri temperaturi 20 °C i lagano opada s porastom temperature; dielektrični gubici, pak, rastu s porastom vlage, temperature, frekvencije, napona i sadržaja nečistoća. Iako danas termoplastične mase sve više potiskuju papir u kabelima s radnim naponom iz područja od 1 do 30 kV, on ipak kao izolacija za više i najviše napone ostaje zasad i dalje nezamjenljiv.

Za izolaciju telefonskih kabela upotrebljava se papir u obliku uzice (kordela) promjera 0,34...1,2 mm, koja se dobiva uvijanjem papirne trake. Kao prvi sloj namata se spiralno na vodič papirna uzica, a preko nje papirna traka. Time se dobiva koncentrično oko vodiča postavljena papirna cijev (sl. 67). S obzirom na to da se na taj način uz sam vodič nalazi kao izolator pretežno zrak, relativna dielektričnost takve kombinacije zraka s papirom iznosi samo ~1,4.



Sl. 67. Zračno-papirna izolacija vodiča. 1 Vodič, 2 papirna uzica, 3 papirna traka

Za istu svrhu upotrebljavaju se ponekad i uzice od polietilena, a preko njih se brizga polietilenska cijev.

Gumena izolacija. Guma se u procesu hladnog uzdužnog izoliranja nanosi istovremeno na nekoliko vodiča. Dvije trake od si-

rove gumene mješavine i nekoliko vodiča između njih ulaze u par kalibriranih valjaka koji pritiskom šavno spajaju trake i odrezuju višak traka. U drugom paru valjaka, koji slijedi odmah za prvim, nanosi se na isti način drugi sloj. Vulkaniziranjem u autoklavu guma dobiva u mehaničkom i električnom pogledu svoja konačna svojstva. Ova se metoda danas sve više napušta i prelazi se na (kasnije opisano) toplo izoliranje.

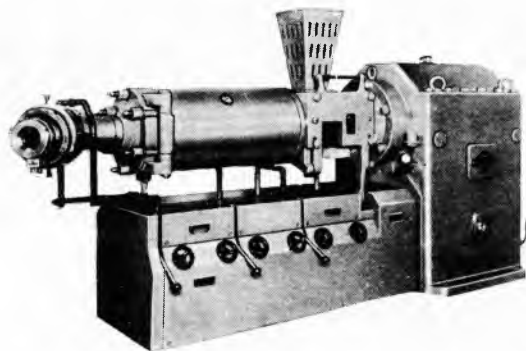
Izoliranje utiskivanjem praha magnezijum-oksida primjenjuje se pri izradi specijalnih kabela namijenjenih za prostorije s visokim temperaturama, kao npr. za kotlovnice. Izrađuje se prešanjem praha magnezijum-oksida u bakrenu cijev kroz koju prolaze puni bakreni vodiči.

Brizganje (ekstruzija) ide u postupke nanošenja izolacije, ispune, plašta i poluvodljivih materija posredstvom topline i tlaka. Za brizganje dolaze u obzir elastomeri i termoplastični materijali.

Elastomeri (gume) su materijali na bazi prirodnog ili sintetskog kaučuka, polimerâ butila, etilen-propilena (butadien-stirena, kloroprena, butadien-akrilonitrila, silikona). U kabelskoj proizvodnji primjenjuju se i mješavine prirodnog i sintetskog kaučuka ili mješavine sintetskog kaučuka i termoplastičnih masa.

Termoplastični materijali koji se upotrebljavaju najčešće za izradu kabela jesu: polivinilklorid (PVC) s omekšivačima, polietilen (PE) umreženi i neumreženi, polistiren, poliamidi (Nylon), politetrafluoretilen (Teflon) i drugi.

Brizgalice (ekstruderi) su strojevi koji nanose na vodiče i kabele u obliku bešavnog plašta ove materijale u toplom i mekanom stanju. Nakon izlaska iz stroja masa se ohladi u vodi. Elastomeri se moraju naknadno još i vulkanizirati ukoliko se u samom procesu ne provodi kontinuirana vulkanizacija.



Sl. 68. Brizgalica za elastomere

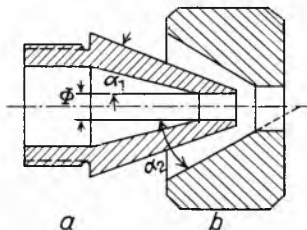
Brizgalice za elastomere (sl. 68) sastoje se od pogonskog motora i zupčanog prijenosa koji pogoni pužni vijak (puž, sl. 69) koji se okreće u osi cilindra. Puž ima samo jedan ležaj i to na strani po-



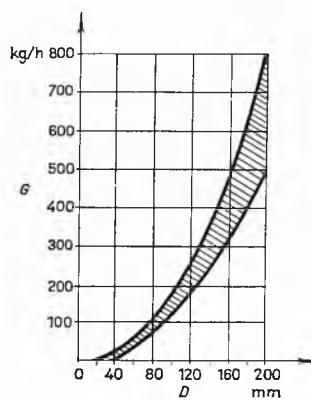
Sl. 69. Pužni vijak brizgalice za elastomere

gona. Materijal koji dolazi na početak puža potiskuje se kretanjem puža naprijed, pri čemu raste temperatura mase i stupanj kompresije. Na izlazu iz cilindra masa koja je dobila potrebnu temperaturu i mekoću ulazi u glavu koja sadrži alat za brizganje (sl. 70). Glava ima kanal za prolaz mase koji prema osi puža može stajati pod kutom od 90°, 45° i 30°, trn kroz čiju šuplinu prolazi vodič ili kabel, i matricu koja okružuje trn. Kroz konični prostor između trna i matrice pritječe masa koju dobavlja puž i ona se u obliku cijevi nanosi na proizvod. Glava ima 1...3 posebne električki grijane zone koje izlaznoj masi daju konačnu temperaturu.

Kapacitet brizgalice prosuđuje se na osnovi istisnute količine (sl. 71). Ona ovisi o vrsti mase, promjeru puža D (obično je $D = 30, 45, 60, 80, 90, 120,$



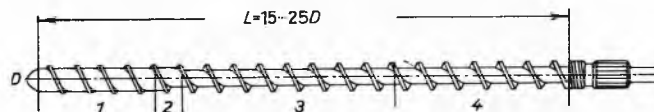
Sl. 70. Presjek i međusobni položaj trna (a) i matrice (b) za brizgalice



Sl. 71. Kapaciteti brizganja u ovisnosti o promjeru puža

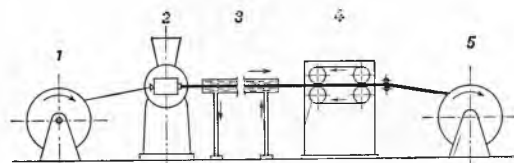
obliku smotaka sirove gume, granulata ili trake koju uvlače posebni valjci. Cilindar se grije parom, vrelom vodom ili termosifonski, a glave električnom strujom. Cilindar i glave hlade se vodom. Temperature zona održavaju se ručno ili automatski. Glave nekih brizgalica mogu biti predviđene za priključak horizontalne ili vertikalne cijevi za kontinuiranu vulkanizaciju.

Brizgalice za termoplastike slične su brizgalicama za elastomere, jedino su im duljine puževa veće i iznose od 15 do 20 (25) promjera D (sl. 72). Cilindri i glave griju se električnom strujom uz automatsko održavanje temperature. Puževi imaju manje dubine i korake navoja. Posebne izvedbe mogu imati i do 3 puža. Oni su normalno promjera 30, 45, 60, 90, 120, 150 i 200 mm, rijetko drugog promjera.



Sl. 72. Puž brizgalice za termoplastike. 1 Zona istiskivanja, 2 zona kompresije, 3 zona plastifikacije, 4 zona ulaza i predgrijavanja

Brizgalicama nanose se osim izolacije i sve ostale mase koje se ugrađuju u kabele, ali uz primjenu odgovarajućeg puža, trna i matrice i uz zagrijavanje koje odgovara upotrijebljenim materijalima. Masa dolazi na početak puža u obliku granulata zrna 3...5 mm. Ako temperatura previše naraste, cilindar se hladi (podijeljeno po zonama) prisilnom ventilacijom ili vodom, a pužni vijak vodom kroz njegov aksijalni provrt. Osnovna linija za brizganje (sl. 73) sastoji se od uređaja za odmatanje 1, brizgalice 2, vodnog hlađenja 3, povlačnog uređaja 4 i uređaja za namatanje 5. U liniju mogu biti dodani još i uređaj za predgrijavanje i ravnanje žice, uređaj za posipanje izoliranog vodiča talkumom, kontrola centricnosti, kontrola promjera, visokonaponski ispitivač izolacije, uređaj za pisanje oznake i aparat za stvaranje podtlaka u glavi



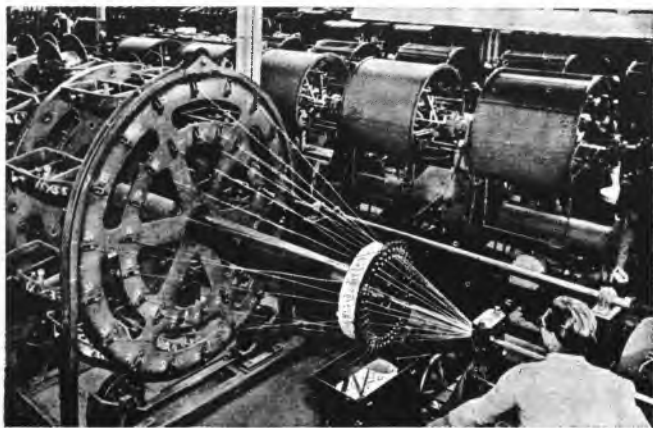
Sl. 73. Shematski prikaz linije za brizganje termoplastičnih izolacija i plašteva. 1 Uređaj za odmatanje, 2 brizgalica, 3 vodna rashladna kupka, 4 povlačni gušjeničar s trakom, 5 uređaj za namatanje

da bi ekstrudirani nanos priliiegao. Ponekad je na glavi brizgalice dodatna mala brizgalica za nanošenje dvobojne izolacije ili označne niti na izolaciju žile ili plašta. Pri proizvodnji telefonskih žila odmah nakon glave može doći uređaj za signiranje žila radi kasnijeg raspoznavanja. Ponekad se pri izradi žila za kabele visokih napona od 10 do 30 kV primjenjuje dodatna pomoćna brizgalica koja je smještena pred glavnom brizgalicom, a služi za nanošenje

poluvodljivog sloja na snop žile radi izravnjanja površine i postizanja povoljnijeg oblika električnog polja. Ponekad je već glava osnovne brizgalice izrađena tako da može primiti i drugu glavu, te se poluvodljiva masa i izolacija nanose istovremeno.

Vulkanizacija je kemijska obrada elastomerskog materijala radi poboljšanja njegovih mehaničkih svojstava (elastičnosti i čvrstoće). To je kemijska reakcija između kaučuka i sumpora, pri kojoj se lančane molekule poprečno povezuju mostovima sumpora. Ubrzivači vulkanizacije ubrzavaju taj proces. Najčešće se primjenjuju za ovu svrhu merkaptobenzotiazol, vrlo brzo djelujući tiurampolisulfid, a i drugi. Proces vulkanizacije odvija se pod pritiskom i na povišenoj temperaturi bez prisustva kisika. Vulkanizacija proizvoda koji su namotani na bubanj ili su smješteni u plošnoj posudi vrši se u autoklavu pod pritiskom 3,5 at i na temperaturi 135 °C. Kabeli s nanosima sirovog elastomera nanesenog brizganjem ili hladnim postupkom ostaju u autoklavu 30–60 min. Da bi se spriječila deformacija ili bubrenje, ponekad se vodiči većih promjera omataju tekstilnom gumiranom trakom ili im se čak nabrizga olovni plašt, koji se po završenoj vulkanizaciji, kao i trake, odstranjuje.

Velike proizvodne serije sve se češće vulkaniziraju kontinuiranim postupkom. Razlikuje se horizontalna i vertikalna vulkanizacija, prema tome u kojem smjeru prolazi kabel. Glava brizgalice ima priključak na čeličnu cijev kroz koju prolazi kabel s nanese- nom elastomerskom masom. Vulkaniziranje mora biti završeno kad kabel dođe do kraja cijevi. Pri horizontalnoj vulkanizaciji poseban je problem slijevanje mase prema donjoj strani kabela i prolaz kabela kroz cijev bez dodira s njom, dok je masa još mekana, tj. u prvoj trećini cijevi. Treba dobro uskladiti oblik lančani- ce, koji poprma kabel, s nagibom tog dijela cijevi, da bi se pri jedno- likoj sili povlačenja izbjegla svaka mogućnost dodira. Pri vulka- nizaciji u vertikalnoj cijevi nema tih opasnosti, pa se stoga ova metoda primjenjuje za teške i skupe proizvode koji se inače iz- rađuju manjim brzinama. Kako su pri tom sistemu osi kabela i cijevi postavljene koaksijalno i kako stoje vertikalno, nema opas- nosti da dođe do dodira između kabela i stijenke cijevi, bez obzira na veličinu vučne sile.

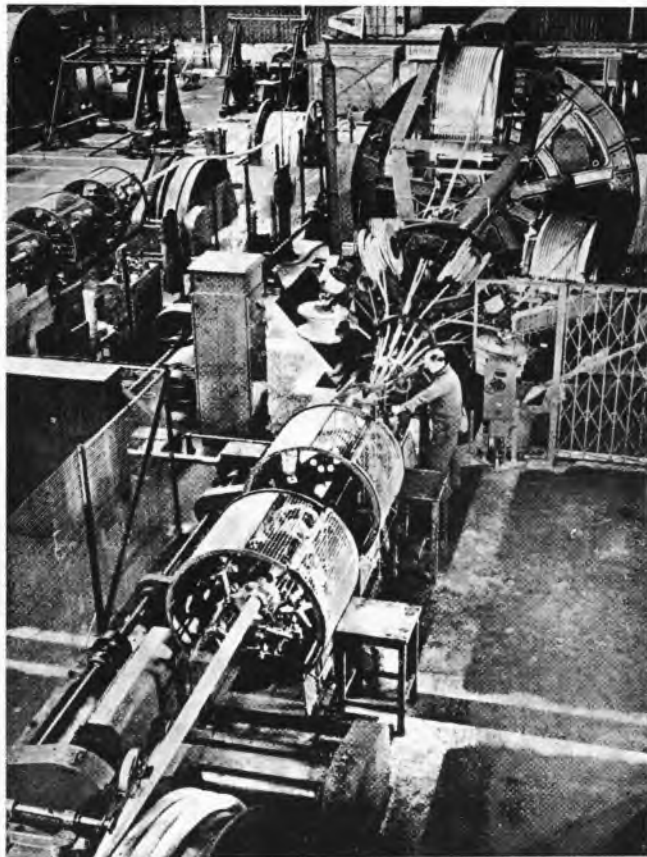


Sl. 74. Košarasti stroj za použavanje žica

Kontinuirana vulkanizacija vrši se pri tlaku pare 16–18 at i temperaturi 200 °C, brzine prolaza iznose pri horizontalnoj vulkanizaciji do 200 m/min, a pri vertikalnoj vulkanizaciji znatno manje jer se radi o proizvodima većih promjera. Prosječni po- trošak pare u procesu iznosi 130–200 kg/h. Nakon završene vulkanizacije u cijevi kabel ulazi pod tlakom u vodu, koja hladi kabel i ujedno sprečava izlaz pare iz cijevi. Nakon toga se kabel otire, prolazi povlačnim uređajem i namata se.

Použavanje (sukanje) žica u vodiče i žila u snopove od više žila vrši se s pomoću strojeva za použavanje.

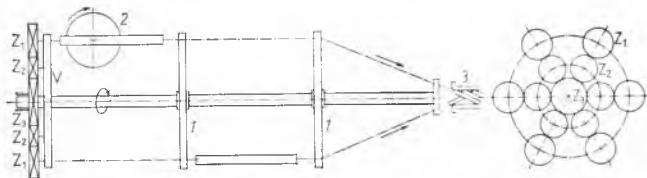
Izvedba strojeva za pravilno sukanje različita je prema namjeni i prema broju i vrsti elemenata koji se obrađuju. Strojevi za sukanje dijele se na sporohodne (košaraste), brzohodne (cjevaste) i tanjuraste. Ovi strojevi imaju uložne kaleme s namotanim ele- mentima, rotirajuće dijelove s vođenjem elemenata do čvrste tačke sukanja, uređaj za povlačenje (vuču) i namatanje sukanog



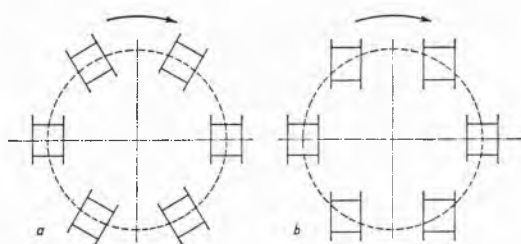
Sl. 75. Košarasti stroj za použavanje žila kabela

proizvoda. Svaki puni okretaj stroja prati tačno određeni uzdužni pomak (»izvlaka«) proizvoda, čiji je iznos određen korakom pou- ženja. Proces použenja treba da se provodi uz jednaku zategnutost svih elemenata jednog prema drugome, pa se kalemi koč- e pode- sivim kočnicama.

Košarasti strojevi (sl. 74, 75) redovito su sporohodni; upo- trebljavaju se kako za izradu vodiča tako i za sukanje žila kabela jake i slabe struje. Uz dodatnu opremu oni mogu da služe i za nanošenje okruglih ili plosnatih žica armatura, koncentričnih vo- diča, za sektoriranje i za použanje snopova telefonskih, signalnih i drugih kabela. Osim toga oni mogu imati omatalice za papirne, tekstilne, plastične, metalne i druge trake.



Shema stroja. Z_1 zupčanici koji zakreću kaleme, Z_2 međuzupčanici, Z_3 nepomični zupčanik. Omjer $Z_1 : Z_2$ određuje iznos zakreta. 1 Vijenac košare, 2 kalem sa žilom, 3 tačka použavanja žila



Položaj kalema pri použavanju: a s potpunim zakretom, b bez zakretanja

Sl. 76. Košarasti stroj za použavanje 6 žila

Kalemi s namotanim elementima raspoređeni su u okvirima u jednoj ili više ravnina okomitih na os stroja. Istovremenim povlačenjem i rotacijom košare, elementi se pouzavaju u tački izvan stroja. Kalemi mogu biti fiksni, tj. imati osi koje zadržavaju isti položaj u odnosu prema osi stroja, ili mogu pomoću ekscentra ili planetarnog sustava izmjenjivih zupčanika vršiti potpuni ili djelomični zakret oko osi okomite na vlastitu os (sl. 76). S kalemima na fiksnim nosačima pouzavaju se elementi koji dozvoljavaju plastično oblikovanje, također podužno sektorirane žile, profilirane žice, armature od plosnatih žica. Okrugle se žile suču uz zakretanje osi kalemova za 360° pri jednom okretaju košare. Spiralno sektorirane žile moraju se sukati uz zakretanje koje je ovisno o dužini koraka. Armature od okruglih žica rade se s lijevim ili desnim zakretanjem od 0 do 360° . Kako pri zakretanju elementi stalno mijenjaju svoj položaj (stranu) prema osi kabela i susjednim elementima, ovakav se način sukanja primjenjuje i pri pouzanju grupa žila telefonskih kabela. Dalja svrha zakretanja osi kalemova jest oslobađanje okruglih elemenata od unutrašnjih torzionih naprezanja. Pri sukanju uzdužno sektoriranih žila često su potrebne korekcije da bi se žice tačnije složile u tački pouzjenja, pa su nosači opremljeni uređajima za daljinsku korekciju, iako se u načelu pouzjenje vrši sa fiksnih nosača.

Više košara sa različitim brojem uložnih kalema (npr. sa 6...12, 12...18, 6...12...18 kalema) postavljaju se za redom u niz (engl. »tandem«) tako da se elementi slažu u dva ili više slojeva istih ili suprotnih smjerova. Kad se izrađuju višezični vodiči, na uređaj za pouzavanje može se nastaviti uređaj za sektoriranje (v. sl. 64).

Brzohodni strojevi cjevastog tipa sastoje se od rotirajuće cijevi s otvorima za ulaganje kalema koji su postavljeni u niz duž njegove osi i slobodno su zavješeni tako da ne rotiraju sa cijevi. Žice koje se odmataju s kalema prolaze kroz cijevi i kroz razdjelnu ploču koja rotira zajedno s cijevi i sastaju se u tački pouzjenja; nastalo užice se nakon prolaza kroz povlačni uređaj namata na bubanj.

Budući da ovakvi strojevi nemaju velikih masa na obodu, oni u modernim izvedbama prave i do nekoliko tisuća okretaja u minuti. U upotrebi su redovito za pouzjenje žica, koje se u stvari pouzavaju sa zakretom osi kalemâ od 360° po okretaju. Rade samo jedan sloy i ne mogu raditi u nizu (tandemu).

Tanjurasti strojevi imaju vertikalnu osovinu i redovito služe za pouzavanje osjetljivih i tankih žica, telefonskih elemenata i sl. Strojevi su opremljeni vrlo preciznim i međusobno usklađenim kočnicama za kaleme, jer je jednolikost zategnutosti već u ovoj fazi odlučna za kvalitet kabela.

Sukalice su strojevi za nepravilno sukanje i služe za izradu uzica. Žice se odmataju sa kalema postavljenih na stalak izvan stroja, a uređaj koji uvlači i namata uzicu nalazi se unutar rotirajućeg dijela stroja. Konstrukcija sukalice redovito je takva da jednom okretaju stroja odgovara dvostruki korak uzice.

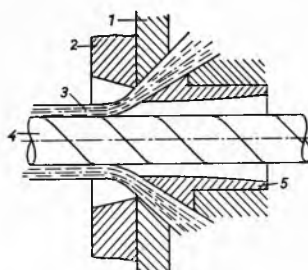
Najnoviji strojevi za sukanje žila (do $4 \times 25 \text{ mm}^2$) podsjećaju po izvedbi na sukalice, a rade velikim brzinama. Osim velike produktivnosti, prednost im je što se žile mogu odmatati s bubnjeva bilo koje veličine.

Ispuna služi za popunjavanje prostora između žila kako bi kabel dobio okrugli oblik. Izvodi se ili istodobno sa pouzavanjem žila na košarastim strojevima, i to od papirnih uzica (kordela), kudeljnih, gumenih i drugih niti ili brizganjem nekog jeftinog materijala, kao npr. prerađene stare gume (regenerata) ili polivinilklorida s jeftinim punilima. Ponekad se ovi prostori popunjavaju i tanjim izoliranim vodičima koji služe npr. telekomunikacijama (signalni vodovi, vodovi za prenos mjernih podataka i sl.).

Izrada plašta. Kabelski plašt je bešavna cijev postavljena preko žile jednožilnog ili skupa žila višezilnog kabela radi zaštite od vanjskih utjecaja, npr. vlage, mehaničkih, kemijskih i elektrolitičkih utjecaja. Plaštevci se izrađuju od metala (olova, aluminijuma, bakra itd.) ili od plastičnih masa.

Olovo (gustoća $11\,300 \text{ kg/m}^3$) klasični je materijal za izradu plašta. Lako se prerađuje na niskoj temperaturi i otporno je prema koroziji, a osim toga je i nepropusno. Nanosi se na kabel prešanjem na temperaturi $150\text{--}200^\circ\text{C}$. Čistoća olova treba da iznosi 99,9%. Obično se legira sa Sb ili sa $15\text{--}25\%$ Sb i $35\text{--}45\%$ Sn, a ponekad i sa 5% telura radi povećanja otpornosti prema vibracijama i radi otvrdnjavanja.

Preše za olovo građene su s jednim stapom za prekidni ili s dva stapa za neprekidni rad; za neprekidni rad upotrebljavaju se i preše s pužnim vijkom. Stapne preše sastoje se od recipijenta s glavom i klipa s hidrauličkim uređajem. Građe se za sile prešanja od 350 do 2800 Mp, a ako služe za prešanje i olova i aluminijuma, grade se i za znatno više sile ($1600\text{--}4500 \text{ Mp}$). Jedno punjenje preše olovom iznosi $100\text{--}600 \text{ kg}$.

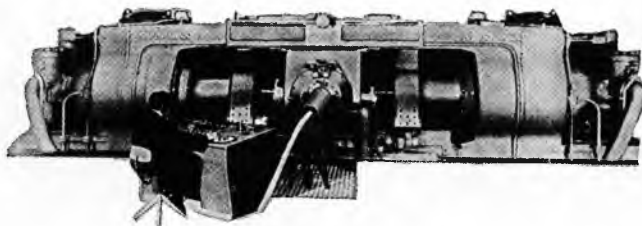


Sl. 77. Alat za prešanje olovne matrice. 1 i 2 matrica, 3 olovo, 4 kabel, 5 trn

Olovo se istiskuje na kabel u obliku bešavne cijevi prolazom kroz konični prostor između matrice kroz određuje vanjski promjer i trna kroz čiju šupljinu prolazi kabel (sl. 78). Odmah po izradi plašt se hladi vodom i kabel namata na bubanj.

Aluminijum (gustoća 2700 kg/m^3) sve se više upotrebljava kao materijal za plašt zbog vrlo dobrih mehaničkih i električnih svojstava. Aluminijumski plašt može u niskonaponskim kablama služiti i kao četvrti vodič. Izdrži visoka poprečna naprezanja, naročito kad je izveden valovito, što mu daje i dobru savitljivost. Rekristalizira tek na 300°C i vrlo je otporan prema vibracijama, te je stoga prikladan za polaganje preko mostova, uz željezničke pruge i u zraku.

Pri nanošenju aluminijumskog plašta na najstariji način uvlači se kabel najprije u prethodno izrađenu aluminijumsku cijev koja ima veći promjer nego kabel i koja je za $10\text{--}30\%$ kraća od njega. Po uvlačenju žica u cijev provlači se kabel kroz matricu; time se promjer cijevi smanji na potrebnu mjeru, a uslijed izduženja plašt prekrije cijeli kabel. Proizvodne duljine su do 550 m uz promjere od 3,8 do 102 mm. Metoda je i danas u upotrebi. Navučeni aluminijumski plašt pogodan je za kabele s izolacijom koja je vrlo osjetljiva prema toplini (npr. od polietilena) i za koaksijalne kabele.

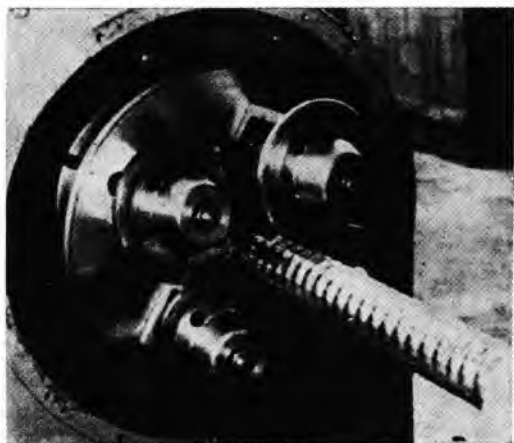


Sl. 78. Preša za kontinuiranu izradu aluminijumskog plašta

Prešanje aluminijumskog plašta vrši se pomoću preše s jednim ili sa dva stapa u horizontalnoj ili vertikalnoj izvedbi (sl. 78). Čistoća aluminijuma mora biti $99,5\text{--}99,8\%$. Sila prešanja iznosi i do 4500 Mp uz temperaturu prešanja od $\sim 400^\circ\text{C}$. Aluminijumski blokovi mase 160 kg dolaze u ovakve preše predgrijani na 500°C . Kako je kabel s aluminijumskim plaštem iznad 60 mm previše krut, daje se plaštu odmah nakon prešanja valovit oblik. Zaustavljanje kabela u toku prešanja može uzrokovati toplinska oštećenja izolacije, pa se u tom slučaju dio kabela koji se nalazi u glavi intenzivno hladi zrakom ili vodom.

Šavno varenje plašta prodire sve više u tehniku proizvodnje kabela zbog niskih nabavnih troškova uređaja i zbog toga što su mogućnosti primjene veće nego mogućnosti prešanja. Plaštevci od aluminijumskih, čeličnih i bakrenih traka mogu se šavno variti u neograničenim duljinama i promjerima (od 2 do 180 mm) uz ravnomjernu debljinu stijenke, a legiranjem traka daju se plaštu vrlo različita svojstva. Metalna traka, kojoj se odrezuju rubovi na ulazu u stroj, prolazi kroz grupe profiliranih kotača koji je oblikuju u cijev. Uzdužni se spoj kontinuirano zavaruje elektrodom od specijalne legure u zaštitnoj atmosferi argona (za čelične i bakrene trake) ili u smjesi argona i helijuma (za aluminijumske trake). Var je izvana i iznutra čist, tako da naknadna obrada nije potrebna. U plaštu se odmah zatim utiskuju s pomoću rotirajućeg ekscentričnog diska spiralna valovita udubljena ko-

jima se može dati željeni oblik, dubina i uspon (sl. 79). Primjenjuje se također indukciono i otporno zavarivanje, ali je njihov nedostatak u usporedbi s lučnim zavarivanjem što zahtijevaju dodatnu obradu šava i relativno debele stijenke.



Sl. 79. Naprava za izradu valovitog plašta

Bakreni bešavni glatki plašt imaju redovito samo kabeli s mineralnom izolacijom (npr. tvorničkih naziva: Isotax, Pirotenax itd.) i neki koaksijalni kabeli.

Metalni oplet stavlja se na brodske i slične kabele radi zaštite od mehaničkih povreda. On se izvodi u snopovima od nekoliko paralelnih žica. Za ovu svrhu služe meko žarene i galvanski

ili uronjavanjem pocinčane čelične žice promjera najčešće 0,31 i 0,40 mm i prekidne čvrstoće 30...44 kp/mm². Za oplet upotrebljavaju se i žice od bakra, aluminijuma i nekih legura. Oplet izrađuju pletarice sa 8, 12, 18, 24, 36 i 48 (rijetko više) nosača kalema, na kojima je namotano po nekoliko žica (sl. 80). Da se postigne ispreplitanje, polovina žica okreće se u jednom a polovina u drugom smjeru izvodeći pri tome valovito kretanje. Takvim unakrštaivanjem i ispreplitanjem žica dobije se oplet. U «tački opleta» na kabelu se sve grupe žica sa šablonā, tzv. «figurā», sastaju tvoreći oplet. Za različite vrste i dimenzije kabela traži se različit postotak pokrivanja površine žičanim opletom. On iznosi obično 65...95%. Metalni se oplet za brodske kabele naknadno premazuje zaštitnim premazima (obično uljenom bojom).

Armiranje je postupak za izradu metalne armature kabela radi njegove zaštite od mehaničkih oštećenja te od poprečnih ili uzdužnih, vanjskih ili unutrašnjih naprezanja. Armatura nije predviđena za vođenje struje i ne može služiti kao četvrti vodič; struju vodi samo ako nastane kvar (npr. proboj izolacije) u kabelu.

Armature od čeličnih traka. Po dvije hladno valjane pocinčane i nepocinčane čelične trake izrađene od niskougljičnih čelika u mekožarenom stanju (čvrstoće 28...40 kp/mm²) ili 1/8 tvrdom stanju (čvrstoća 32...44 kp/mm²), debljine 0,2...0,8 (iznimno 1,2) mm, a širine 15...60 (iznimno 75) mm.

Namataju se spiralno na kabel tako da gornja traka djelomice pokriva zavoje donje trake i razmak između njih. Na armaturu može doći bilo polivinilkloridni plašt bilo antikoroziorna zaštita na bazi bitumena s papirnim i vlaknastim omotima. Armature izrađene od čeličnih traka ne smiju se izložiti uzdužnim mehaničkim naprezanjima.

Armature od čelične žice. Plosnate pocinčane čelične žice služe za prihvatanje uzdužnih i manjih poprečnih sila pri kosom i vertikalnom polaganju kabela. Žice su 1/8 tvrdoće i prekidne čvrstoće 34...44 kp/mm². Obično su dimenzija 4×0,8 mm. Ova se armatura izrađuje na košarastim strojevima s pogodnim brojem uložnih kalema sa čvrstim nosačima (vilicama). Radi se u jednom sloju, a po potrebi i u dva protusmjerna sloja, u spiralama velikog koraka. Preko njih obično dolazi protuzavoj od tanke čelične trake da se spriječi rasplitanje (sl. 81).

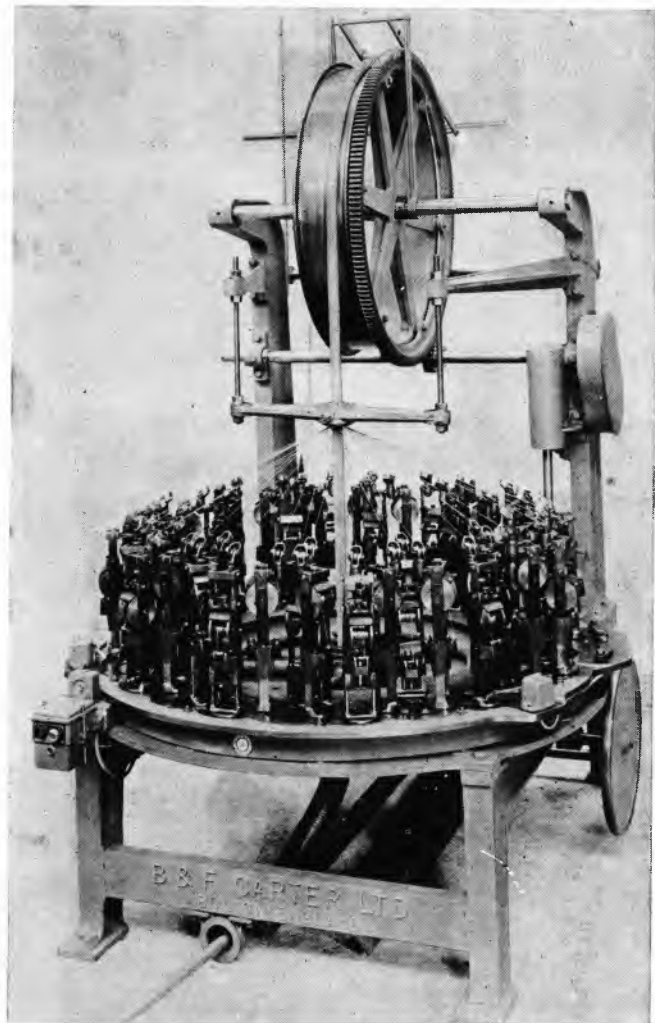


Sl. 81. Obavljanje armature od čelične žice čeličnom trakom

Na sličan se način rade armature od profiliranih žica (oblika »Z«). Armature od okruglih čeličnih žica (promjera 1,4...5 mm, iznimno do 10 mm) služe sličnoj svrsi, a izrađuju se sličnim postupkom. Radi rasterećenja od unutrašnjih naprezanja i boljeg prijanjanja uz kabel rade se uz zakretanje osi kalemove bilo u smjeru okretanja košare bilo u protivnom smjeru.

Koncentrični zaštitni vodič može služiti i kao multi vodič. U tom slučaju njegov presjek iznosi 50...100% presjeka faznog vodiča. Gole žice nanose se s pomoću košarastih strojeva koncentrično na podlogu koja okružuje glavne vodiče i omataju otvorenim spiralom (s međuprostorom između navoja). Koncentrični vodič i glavni vodič mogu biti od različitih materijala.

Valoviti koncentrični vodič («ceander») novija je izvedba koncentričnog četvrtog vodiča, čije žice ne opisuju helikoide nego razvučene sinusoide. Stroj koji ih nanosi ne rotira nego oscilira oko srednjeg položaja. Stoga se žice zaštite mogu bez rezanja udaljiti od žila kabela, što omogućuje priključenje novog odvojka na već položeni kabel i dok je pod naponom (sl. 82). U jednoj se operaciji brizgalicom nanosi unutrašnji plašt; nakon toga oscilirajuća glava nanosi i do 60 bakrenih žica. One se lagano utiskuju



Sl. 80. Pletarica za oplet kabela žicom

u još mekanu masu i odmah obavijaju bakrenom trakom. Na kraju uređaja brizgalica nanosi vanjski polivinilkloridni plašt. Kabel se izrađuje brzinom 10...15 m/min.

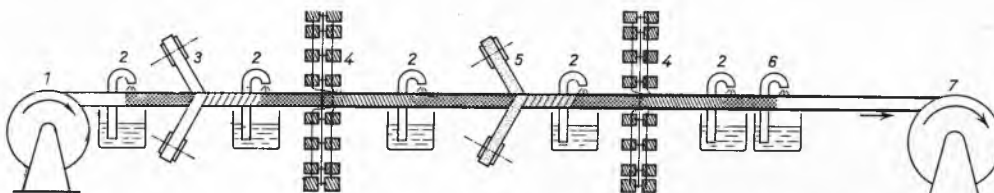


Sl. 82. Valoviti koncentrični vodič odvojen od jezgre

Električna koncentrična zaštita primjenjuje se na visokonaponskim kabelima radi zaštite od visokog dodirnog napona u slučaju težih mehaničkih oštećenja. U tom je slučaju potrebno da zaštita ima minimalni presjek od 6 mm ako je od bakra ili električni ekvivalentni presjek ako je od nekog drugog materijala (aluminijuma, čelika). Bakarne, aluminijumske ili čelične trake polažu se ispod vanjskog plašta. One time ujedno povećavaju i čvrstoću kabela.

Vanjska nemetalna zaštita kabela sprečava prodor tekućina i plinova koji bi mogli oštetiti izolaciju, metalni plašt ili armaturu.

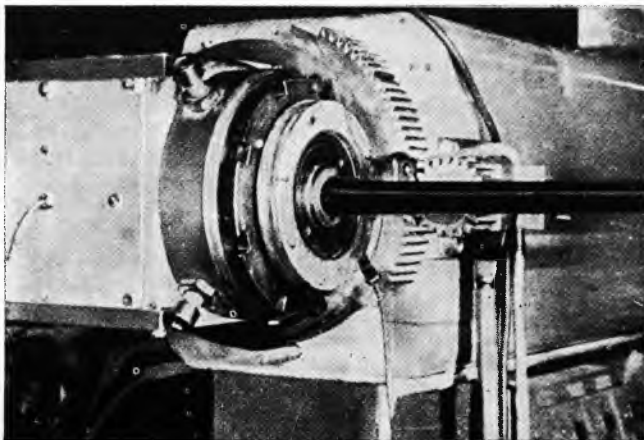
Još je i danas u upotrebi zaštita u obliku gustog omota od jutene ili kudeljne prede (metričke numeracije oko 0,5) dobro impregnirane mješavinama ulja, različitih bitumenskih i katranskih smola i voskova. Izrađuje se tako da se jutena preda sa svitaka raspoređenih obostrano po opsegu rotirajućeg vijenca omata oko kabela koji prolazi njegovom osi. Vijenac s jutom redovito je sastavni dio većeg uređaja koji osim njega može imati kotlove za natapanje bitumenom, omatalice za impregnirani papir i čelične trake, košaru za armiranje žicama i drugu omotalicu jute. Broj i redoslijed nanosa ovisi o konstrukciji i stupnju zaštite kabela. Posipanje kredom posljednja je operacija; njome se sprečava lijep-



Sl. 83. Shematski prikaz stroja za izvedbu vanjske mehaničke i kemijske zaštite kabela. 1 Odmatanje, 2 bitumenski premaz, 3 omatanje impregniranim papirom, 4 omatanje impregniranom žicom, 5 omatanje čeličnim trakama, 6 vapnjeni premaz, 7 uređaj za povlačenje i namatanje

ljenje namotanog kabela na bubanj. Sl. 83 shematski prikazuje stroj za izvedbu vanjske zaštite kabela. Lakši kabeli i vodovi namijenjeni polaganju u vlažnim prostorijama ili izloženi atmosferskim utjecajima izvode se često s vanjskim pamučnim opletom izrađenim na brzohodnim pletaricama; taj oplet naknadno se impregnira bitumenom, parafinom i voskovima ili uljnim bojama (npr. minijumom).

Plašt od polivinilklorida vrlo je djelotvorna zaštita zbog svoje otpornosti prema vlazi, plinovima, lužinama, kiselinama i nekim otapalima, tako da često zamjenjuje olovni plašt. Ne podržava



Sl. 84. Brizganje plašta od PVC

gorenje, a zbog svojih mehaničkih svojstava predstavlja i stano-vitu mehaničku zaštitu za vrijeme polaganja i u pogonu. Osim toga se takvi kabeli mnogo jednostavnije proizvode i montiraju. Izrađuju se na većim i najvećim brizgalicama uz eventualno utiskivanje oznake kabela i proizvođača (sl. 84).

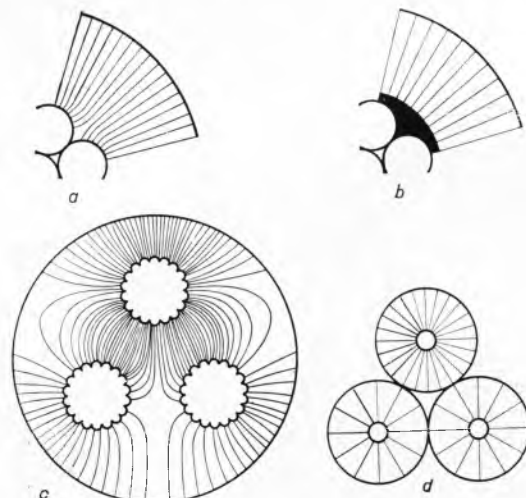
Plaševi od elastomera. Guma se zadržala i dalje u upotrebi za vrlo savitljive radioničke gajtane. U novije ju vrijeme sve više zamjenjuju plaševi od polikloroprenskog kaučuka (Neoprena). Ovaj je materijal, naime, vrlo postojan prema ozonu, kisiku, atmosferilijama, ultravioletnim zrakama, niskim temperaturama (do -40 °C) i drugim utjecajima, a i ne podržava gorenje. Primjenjuje se naročito za izradu plašteva robustnih radioničkih, bagerskih, rudničkih i drugih kabela za teške uvjete rada, kad su izloženi jakom mehaničkom trošenju. Materijal se na kabel nanosi brizganjem na niskim temperaturama, a vulkanizacija traje 45 min na temperaturi od ~145 °C.

Izrada nekih specijalnih kabela

Visokonaponski kabeli. Sprečavanju pojave korone ili tinjanog izbijanja u vakuolama papirne ili termoplastične izolacije visokonaponskih kabela treba pri konstrukciji i proizvodnji posvetiti veliku pažnju jer te pojave dovode do proboja izolacije (v. str. 240). Jedan način suzbijanja tinjanja jest sprečavanje deformacije električnog polja oko vodiča i između njih. Zbijanje polja, koje nastupa kao posljedica deformacije, dovodi do povećanja jakosti električnog polja i stvara uvjete za pojavu tinjanja.

Da bi se spriječila deformacija polja uz žice vodiča (sl. 85 a), površina vodiča poravnava se različitim slabo vodljivim materijalima (sl. 85 b), a da bi se dobilo jednolično radijalno polje u izolaciji, provodi se ekranizacija pojedinih žila (sl. 85 c, d) s pomoću vodljivih uzemljenih slojeva.

Poravnanje površine vodiča izvodi se s pomoću slabo vodljivih materijala koji moraju biti prilagođeni materijalu izolacije. Da bi se postigla potrebna vodljivost, izolacionim materijalima, koji služe u tom slučaju kao nosioci, dodaje se grafit ili vodljiva čada. Time se dobiju materijali kojima je vodljivost znatno manja



Sl. 85. Oblik električnog polja oko vodiča kabela bez sloja za poravnanje (a) i sa slojem za poravnanje (b), u izolaciji bez ekrana i u prostoru između žila (c), u ekraniziranom kabelu (d)

od vodljivosti vodiča. U kabelima s papirnom izolacijom primjenjuje se za tu svrhu slabo vodljiva papirna ili tekstilna traka koja se omata oko vodiča, a u kabelima s termoplastičnom izolacijom nanosi se brizganjem na vodič plastična masa pomiješana s nekim lošim vodičem.

Ekranizacija se vrši ekranom (zaslonom) od slojeva slabije vodljivosti koji se postavljaju preko izolacije vodiča. U kabe-

lima s papirnom izolacijom upotrebljava se kao ekran papirna traka metalizirana aluminijumom. Ona se namata na izolaciju izravno ili preko slabo vodljive podloge (npr. grafitnog premaza ili grafitirane trake). U kabelima s plastičnom izolacijom postoji više načina ekranizacije. Tako se npr. izolirane žile premazuju vodljivim lakom ili se pak kao ekran upotrijebi ispuna od slabo vodljivog materijala. Primjenjuju se i disperzije od čađe i grafita, jedan ili više slojeva vodljivih tekstilnih traka ili tanak plašt od vodljive plastične mase.

Slabo vodljivi ekranski sloj mora biti spojen s metalnim plaštem duž cijele duljine kabela radi dobrog uzemljenja. To se u papirnom izoliranim kabelima postiže dodatnom metalnom trakom, a u kabelima s plaštem od termoplastične mase s pomoću jedne ili više bakrenih traka. One moraju biti dimenzionirane tako da mogu odvoditi struju greške u slučaju proboja izolacije i time spriječiti previsok napon dodira.

Za sprečavanje tinjanja (v. str. 240) primjenjuje se i povećanje pritiska u unutrašnjosti kabela. Na tom principu rade uljni i plinski kabeli s unutarnjim i vanjskim pritiskom.

U *uljnim kabelima* (v. str. 240) cirkulira ulje duž kabela pod natpritiskom. Ono prolazi kroz šuplji vodič, između žila, kroz posebne cijevi (sl. 86) ili uture s unutrašnje strane plašta i natapa



Sl. 86. 33 kV trožilni uljni kabel s ekraniziranim žilama. Prolaz za ulje nalazi se u ispuni a aluminijumski plašt ima antikoroziivnu zaštitu

izolaciju, ispunjava šupljine i povećava pritisak u još preostalim vakuolama kabela. Da bi izdržali dodatni pritisak, olovni se plaševi moraju pojačati metalnim bandažama ili dodatno armirati, a aluminijumski oblikovati valovito. Primjenom ulja pod pritiskom postiže se s istom izolacijom znatno veći nazivni napon, npr. umjesto 60 kV, 132 kV.

U *plinskim kabelima* (v. str. 241) kao sredstvo za prijenos pritiska služi dušik. Da bi se olakšala cirkulacija plina, postavlja se ponekad oko svih žila a ispod vanjskog plašta prikladna spirala. To u kabelima s aluminijumskim valovitim plaštom nije potrebno. U plinskim kabelima s unutarnjim pritiskom (v. sl. 29 a) dušik izravno prodire u pore izolacije i tjera gustu izolacionu tekućinu kojom je natopljena papirna izolacija u praznine, a u vakuolama povisuje pritisak. U kabelima s vanjskim pritiskom (membranskim kabelima) dušik izvodi samo pritisak na plaštev (v. sl. 29 b) obično ovalno ili plosno oblikovanih žila. Preko plaštev pritisak se prenosi na izolaciono ulje u unutrašnjosti žila kabela. Ovakvi oblici plaštev omogućuju da se žile zbog zagrijavanja pri opterećenju šire, a pri ohlađenju opet stežu, a da se pri tome pritisak u njima ne promijeni.

Djelovanjem plina pod pritiskom povećava se dakle pri istoj izvedbi izolacije probojna električna čvrstoća kabela, npr. od 16...20 kV na 35...50 kV. Plinski kabeli izrađuju se i za najviše napone.

Telefonski kabeli sastavljeni su od osnovnih grupa upredanja (parica, četvorki, osmeraca) koje se upređaju u slojevima ili snopovima (sl. 87, v. i sl. 53, 54 i str. 249).



Sl. 87. Telefonski kabel použen u snopovima

Vodiči su žice od punog odžarenog bakra promjera 0,4...1,5 mm. Izolacija treba da osigura dobru centričnost vodiča, nisku dielektričnost i što manje dielektrične gubitke. Tome najbolje odgovara kombinirana izolacija od zraka i papira, ili od zraka i polietilena.

Izolacija izvodi se time što se na žicu vodiča spiralno namota uzica (kordela) od papira ili polietilena, ili se pak stavlja na nju pjenasti polietilen. Zatim se taj prvi sloj kombinirane izolacije prekrije još papirnom ili polietilenskom trakom (v. sl. 66 i str. 255). Pamučna ili obična papirna izolacija danas se u telefonskim kabelima samo rijetko primjenjuje.

Kako je već rečeno, sukanjem grupâ žilâ treba osigurati najveću preciznost u zategnutosti svake žile, mali ulazni kut sukanja, pravilno slaganje na bubanj, rasterećenost od uvijanja, centričnost vodiča i homogenost izolacije. Da ne bi došlo do pojave preslušavanja, tj. kapacitivne ili induktivne veze između dva govorna kruga, grupe se použavaju s različitim koracima tako da u sloju nikada ne dođu dva susjedna elementa koji prostorno duž kabela imaju jednaki položaj žila. Izbor sheme sukanja ovisi o iskustvu

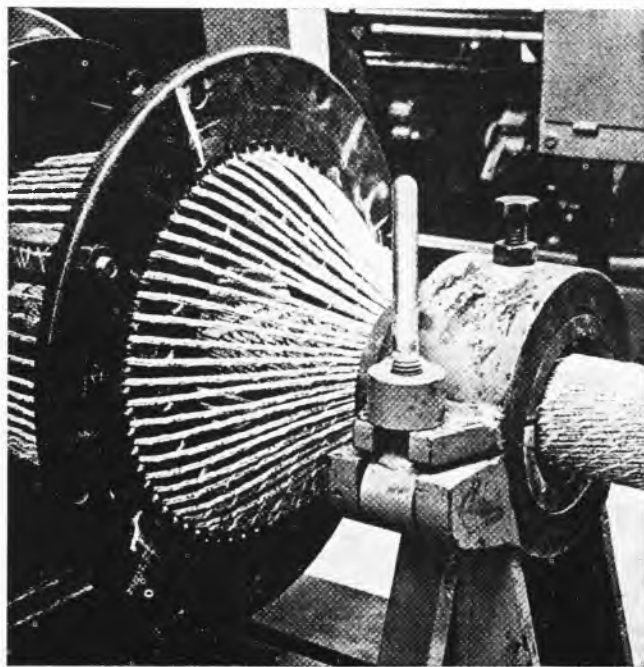
Tablica 17

DJELATNI PROMJER OSNOVNIH GRUPA U TELEFONSKIM KABELIMA

	Parica	Dieselhorst-Martinove četvorki	Zvezdaste četvorki
Teoretski promjer	2 d	4 d	2,4 d
Djelatni promjer	1,9 d	3 d	3 d

d je promjer jednog vodiča

jer se računom dobiveni odnosi ne mogu nikada tačno ostvariti prilikom izrade. Pri použenju pojedinih grupa u snopove ili slojeve ne računa se s teoretskim promjerom kruga opisanog oko svake grupe, već s nekom manjom vrijednošću, tzv. djelatnim promjerom, koji je dat u tabl. 17. Prilikom použenja upadaju, naime, pojedine grupe djelomično u međuprostore i uture drugih susjednih grupa.



Sl. 88. Použavanje jezgre telefonskog kabela u slojevima

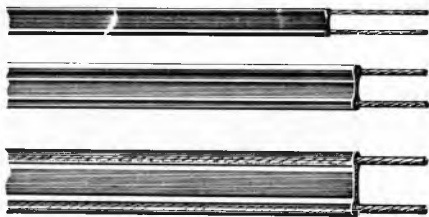
Jezgra kabela použava se u slojevima (sl. 88) kad broj elementa i promjeri vodiča nisu preveliki. Použava se tada različitim koracima s pomoću tandem-košara koje se okreću u suprotnim smjerovima. Između pojedinih košara često se nalaze omatalice koje papirom odvajaju pojedine slojeve ili ih ekraniziraju metalnom folijom. Strojevi za sukanje gradskih telefonskih kabela imaju fiksne nosače kalema. Jezgre međugradskih telefonskih kabela koji su predviđeni za prenos telefonije nosivim frekvencijama na velike udaljenosti suču se uz zakretanje kalema, čime se postižu ravnomjerne električne karakteristike.

Sukanje u snopovima upotrebljava se kad je kabel sastavljen od velikog broja tanjih žila. Od 50 do 100 grupa suče se zajedno ili u posebne snopove u pravilnim slojevima. Na kraju se u većim košarastim strojevima snopovi poučavaju u jezgu kabela (v. sl. 54).

Pri izgradnji jezgre telefonskog kabela namijenjenog prijenosu struja bilo govornih, bilo nosivih frekvencija pojavljuje se mnogo složenih problema. Stoga postoji i velik broj vrsta, izvedaba i pojedinosti na kabelima koje različite tvornice različito rješavaju. Međufazne kontrole i ispitivanja električnih i drugih veličina provode se pri izradi telefonskih kabela vrlo strogo, da bi se na taj način osigurao kvalitet i pouzdanost vrlo skupog proizvoda.

Završni dio izrade (izrada plašta, armature, itd.) izvodi se načelno na isti način kao u jakostrujnih kabela. Izolacija se zaštićuje od vlage, prema kojoj je jako osjetljiva, olovnim ili aluminijumskim plaštom. Jezgre se ekraniziraju radi zaštite od vanjskih utjecaja, kabel se armira radi suzbijanja poprečnih i/ili uzdužnih sila i zaštićuje od kemijskih i elektrolitičkih utjecaja. Telefonski kabeli koji su predviđeni za polaganje u blizini trasa električnih željeznica ili jakostrujnih vodova posebno se zaštićuju od njihovih elektrostatičkih i magnetskih utjecaja dobro vodljivim plaštem i zatvorenim jakim čeličnim omotom visokog permeabiliteta (v. str. 252 i *Elektrifikacija željeznica*, str. 292). Radi povećanja daljine prijenosa primjenjuje se umjesto pupinizacije na telefonskim kabelima (danas doduše rijetko) metoda po Krarupu, koja se sastoji u povećanju samoindukcije namatanjem feromagnetskog materijala (željeznih žica ili traka) na vodiče govornog kruga. To se izvodi na uređaju koji ima u sredini horizontalnog rotirajućeg tanjura kotur sa željeznom žicom ili trakom kroz koji prolazi vodič. Stroj nema uređaja za povlačenje jer rotirajuća glava sama gura omotani vodič naprijed.

Simetrični vodovi izvede se uvijek sa dva vodiča od punog ili višežičnog, golog, pokositrenog ili posrebnog bakra, a izrađuju se kao plosnati (sl. 89), ovalni ili okrugli. Najjednostavnije



Sl. 89. Simetrični vodovi za visoku frekvenciju

su izvedbe s usporednim vodičima. Pri prolazu kroz brizgalicu nanose se istovremeno izolacija i distancijski mostići. Radi smanjenja dielektričnih gubitaka ponekad se svaki vodič posebno izolira pjenušavim polietilenom ili kordelom preko kojeg se brizganjem nanosi cijev od polietilena. Obje žile su usporedne ili sukane, a preko njih je postavljen ekran od bakrenog opleta ili omota od dviju protusmjernih bakrenih traka. Plašt je redovito od crnog polietilena otpornog prema atmosferskim i kemijskim utjecajima, vrlo gipkog i mehanički čvrstog.

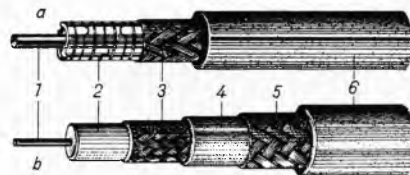
Ovi se vodovi izrađuju za valne impedancije od 60, 75, 95, 120, 150, 210, 240 i 300 Ω . Upotrebljavaju se za prenos struja visoke frekvencije, npr. za vezu između simetrične antene i prijemnika, u predajnim i prijemnim uređajima za samostalne vodove ili kao žila u sastavu nekog kombiniranog kabela.

Koaksijalni kabeli (o njima v. str. 250) upotrebljavaju se za prijenos struja visoke frekvencije pa zahtijevaju stoga visokokvalitetne materijale i veliku preciznost izrade. Izrađuju se sa dva koaksijalna vodiča: vanjski ima oblik cijevi koja okružuje središnji, a između njih se nalazi izolacija.

Središnji vodič izrađuje se od najkvalitetnijeg bakra vučenog na tačnu mjeru. Izvodi se kao puni, višežični ili cijevni vodič. Puni vodič upotrebljava se do promjera od 6,2 mm. Za veće promjere primjenjuju se glatke bakrene cijevi u koje se ponekad umeće čelična valovita cijev da bi se spriječile deformacije pri savijanju. Za promjere veće od 25 mm središnji je vodič valovita bakrena cijev. Valovite se cijevi izrađuju po postupku opisanom na str. 258 i 259.

Izolacija je najčešće od polietilena u kompaktnoj izvedbi ($\epsilon = 2,1 \dots 2,3$, $\tan \delta = 0,0005$) ili spužvastoj izvedbi ($\epsilon = 1,5$, $\tan \delta = 0,0004$), i od tetrafluoretilena (Teflona, $\epsilon = 2,00$, $\tan \delta = 0,0005$).

Strogo održanje centričnosti bitan je preduvjet za dobivanje kvalitetnog kabela. Kontrola centričnosti kabela s punom i pjenastom (sl. 90 a) izolacijom vrši se u toku brizganja instrumentom koji na svom ekranu pokazuje položaj vodiča u izolaciji. Ostali

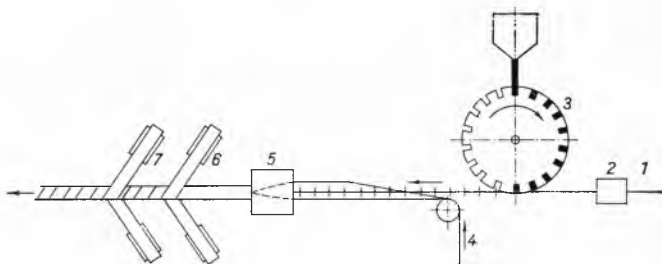


Sl. 90. Koaksijalni kabel s kolustastom (a) i punom izolacijom (b). 1 Srednji vodič, 2 izolacija (polietilen, politetrafluoretilen ili keramika), 3 koaksijalni vanjski vodič izrađen od bakrenog žičnog opleta, 4 izolacija, 5 zaštitni oklop, 6 vanjski plašt



Sl. 91. Koaksijalni kabel s polietilenskom spiralno namotanom trakom kao izolacijom

su načini nanošenja izolacije: spiralno omatanje srednjeg vodiča polietilenskom kordelom (vrpcom okruglog ili profilnog presjeka, sl. 91), slaganje polietilenskih okruglih pločica u jednakim razmacima (sl. 90 b i 92) i različni drugi načini sa zajedničkom svrhom osiguranja centričnosti i što većeg udjela zraka u izolaciji. Vanjski



Sl. 92. Shematski prikaz stroja za postavljanje polietilenskih distancijskih kolata na središnji vodič koaksijalnog kabela i namatanje bakrenih traka koje služe kao vanjski vodič. 1 Središnji Cu-vodič, 2 čišćenje žice, 3 kotač za nanošenje kolutića sa dozatorom, 4 Cu-traka, 5 uređaj za oblikovanje trake u cijev, 6 omatanje čeličnih traka, 7 omatanje papirnih traka



Sl. 93. Stroj za uzdužno zavarivanje uzdužnih bakrenih traka koje sačinjavaju vanjski vodič koaksijalnog kabela

se vodič oslanja na izolaciju, a izvodi se od jednog ili dvaju bakrenih opleta (radi bolje gipkosti) izrađenih na stroju »pletarici« na 12, 16, 18 ili 24 »figure«, ili od bakrene trake koja se uzdužno formira oko distancijskih kolutića u cijev i odmah obavija čeličnim trakama, ili od uzdužno varene bakrene trake (sl. 93) koja se naknadno vuče na tačnu mjeru ili valovito oblikuje. Vanjski vodič može biti i od čelične valovite cijevi koja je iznutra pobakrena.

Vanjska zaštita obično je od termoplastičnih materijala (crnog polivinilklorida), otpornog prema atmosferskim i kemijskim utjecajima, ultravioletnim zrakama, ulju, zemlji, plijesni itd. a s malom sposobnošću da apsorbira vodu. Ako se za vanjski vodič upotrijebi čelična cijev, ona se mora prije nego se ogrne plaštom snabdjeti antikorozijskom zaštitom.

Koaksijalni se kabeli izrađuju s impedancijama od 50, 60, 75, 100 i 125 Ω . Upotrebljavaju se za prenos struja visokih frekvencija u radio-, televizijskim, relejnim, radarskim, višekanalnim telefonskim uređajima i drugdje.

Ponekad se u telefonskim kabelima jedna ili više koaksijalnih tuba suče zajedno s paricama i četvorkama u kabel i stavlja pod zajednički plašt (v. sl. 55).

Valovodi (v. str. 232) služe za prijenos signala najviših frekvencija (3,6–10 GHz), a u novije vrijeme se izvode, umjesto od pravokutnih, od okruglih ili ovalnih valovitih cijevi (sl. 94). Cijev se radi s najvećom preciznošću savijanjem bakrene trake debljine ~0,5 mm kontinuirano šavno varene uz eventualnu naknadnu izradu valovitosti. Time cijev dobiva veliku poprečnu čvrstoću i savitljivost. Jednolično oblikovanim cijevima postižu se najmanji gubici što ih uzrokuju refleksije. Cijevi moraju biti nepropusne za zrak i vodu jer su u pogonu često napunjene nekim plinom s unutrašnjim natpitisom. Plastična vanjska zaštita potrebna je samo ako se valovod češće premata ili premješta, inače nije potrebna, kao ni zaštita od korozije.



Sl. 94. Valovod izrađen od ovalne valovite bakrene cijevi

Ispitivanje kabela

Kabelski proizvodi i sirovine za njihovu izradu ispituju se prema važećim propisima i standardima. Sve zemlje teže za tim da svoje standarde usklade s preporukama IEC (International Electrotechnical Commission). Uz ove postoje i propisi za izradu i ispitivanje specijalnih tipova kabela za zrakoplovstvo, brodogradnju i druge svrhe (npr. francuski Bureau Veritas, engleski Lloyd's Register, američki Bureau of Shipping i drugi). Za vrijeme proizvodnje kontroliraju se duljina i debljina izolacije i plašta, promjeri, centričnost izolacije i greške u izolaciji.

Na gotovom se proizvodu kontrolira duljina, geometrijske veličine, centričnost, mehanička svojstva, boje žila i redoslijed u sloju, te opći izgled proizvoda.

Električna ispitivanja kabela i vodova jake struje vrše se prema konstrukciji i namjeni proizvoda i to: kratki spoj između vodiča i plašta; prekid vodiča; otpor vodiča (Wheatstonovim ili Thompsonovim mostom); otpor izolacije; pogonski kapacitet; probojna čvrstoća izolacije (promjenljivim izmjeničnim ili istosmjernim naponom). Električna ispitivanja visokonaponskih kabela obuhvaćaju još i mjerenje faktora gubitaka $\tan \delta$ (Sheringovim mostom), mjerenje napona početka ionizacije, ispitivanje udarnim naponom i ciklička ispitivanja ugrijavanja i hlađenja uz kontrolu faktora gubitaka $\tan \delta$. Zatim se ispituje unutrašnji pritisak u kabelu, eventualne promjene promjera i nepropusnost plašta.

Telefonski i visokonaponski kabeli podvrgavaju se, osim vizuelnoj i geometrijskoj kontroli i nekim gore navedenim ispitivanjima, još i ispitivanju pogonskog kapaciteta i odvoda, kapacitivnog i induktivnog preslušavanja, gušenja preslušavanja, ali se moraju ustanoviti i druge njihove karakteristike, pogotovo ako se radi o novom tipu kabela. To su npr. karakteristična impedancija, specifično gušenje i konstante R' , L' , C' i G' (v. str. 226) uz mjerenje homogenosti i refleksije po cijeloj njihovoj duljini. Svestrano

se ispituju izmijenjene ili nove konstrukcije kabela i prikladnost novih materijala; na kabelima redovne proizvodnje vrše se samo najvažnija kontrolna ispitivanja.

Pakiranje kabela

Pakiranje tanjih i savitljivih vodova i kabela vrši se premanjanjem sa završnog proizvodnog bubnja u komadima od 50, 100 m ili više, a prema standardu tvorničkih duljina. Koturi se namataju na strojevima prematalicama koje imaju rasklopljive kaleme i mjerac namotane duljine. Isporučuju se vezani trakom, u plastičnim vrećicama ili u kutijama s oznakom proizvoda i proizvođača.

Teži i kruti vodovi i kabeli isporučuju se na drvenim bubnjevima u komadima od npr. 150, 300, 500, 750, 1000 m.

Vanjski promjeri bubnjeva iznose 400–3300 mm, a istom promjeru odgovaraju razni promjeri jezgre. Npr. kabeli s armaturom (dozvoljeno savijanje ~20 D) trebaju bubanj s jezgrom većeg promjera nego savitljiviji kabeli. Tvornice kabela imaju svoje interne norme koje propisuju koji se tip kabela i u kojoj duljini smije namotati na određenu vrstu bubnja. Na bubnju mora biti označena vrsta i tip kabela, presjek i broj žila, napon, duljina, težina i proizvođač.

Kabeli koji se moraju izraditi u jednom vrlo dugom komadu (npr. podmorski kabeli) slažu se izravno, onako kako dolaze sa završnog stroja, u vagone, s time da se kabel između pojedinih vagona ne prekida. Tvornice uz rijeku ili more slažu ovakve kabele u velikim duljinama izravno u posebne brodove za polaganje podmorskih kabela (v. *Brodovi, specijalni*, TE 2, str. 446).

M. Rajčević

LIT.: H. W. Droste-Neumeyer, Hilfsbuch für Kabel und Leitungen, Nürnberg 1934. — R. King, H. Minno, A. Wing, Transmission lines, antennas and wave guides, New York 1945. — Westinghouse, Electrical transmission and distribution, East Pittsburgh 1950. — W. zur Megede, Fortleitung elektrischer Energie längs Leitungen in Starkstrom- und Fernmeldetechnik, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1950. — F. Woodruff, Principi prijenosa električne energije (prijevod s engleskog), Zagreb 1954. — P. V. Hunter, J. Temple-Hazell, Development of power cables, London 1956. — W. Ehlers, H. Lau, Kabel-Herstellung, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1956. — P. Behrens, H. Meyer, J. Neßger, Aluminiumski nadzemni vodovi (prijevod s njemačkog), Zagreb 1959. — G. Schenkel, Schneckenpressen für Gummi und Kunststoffe, Hannover-Wulfel 1960. — R. Adler, L. J. Chu, R. Fano, Electromagnetic energy transmission and radiation, New York 1960. — J. Aribauer, Kabel und Leitungen, Berlin 1960. — D. Kaiser, Elektrotechnischer priručnik, Zagreb 1964. — Инженерно-технический справочник по электросвязи, Москва 1964. — К. Шимони, Теоретическая электротехника, Москва 1964. — К. Kippmüller, Einführung in die theoretische Elektrotechnik, Berlin-Heidelberg-New York 1965. — H. Waddicor, The principles of electric power transmission, London 1964. — J. MacCombe, F. R. Haigh, Overhead line practice, London 1966. — C. C. Barnes, Power cables, their design and installation, London 1966. — G. A. Boal, Electric power distribution, London 1966. — А. И. Петрашко, М. И. Шаповал, Электротехнические материалы, электрические конденсаторы, провода и кабели, Москва 1968. — P. Wasowski, Słownik elektryczny, Warszawa 1969. — И. И. Гроднев, Л. А. Фролов, Коаксиальные кабели связи, Москва 1970. — В. А. Привезенцев, Э. Т. Ларина, Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии, Москва 1970. — R. A. Waldron, Theory of guided electromagnetic waves, London-New York 1970. — V. Srb, Kabelska tehnika, Zagreb 1970. — А. И. Белоруссов, Электрические кабели и провода, Москва 1970.

T. Bosanac V. Matković
M. Rajčević V. Srb

ELEKTRIČNO OSVJETLJENJE (ELEKTRIČNA RASVJETA), umjetno osvjetljavanje predmeta i objekata svjetlom električnih izvora kako bi ih čovječje oko moglo vidjeti. Radi postizanja što prikladnije rasvjete električni se izvori svjetla postavljaju u pogodne svjetiljke.

Historijat. Prvi izvori električnog svjetla koji su se i u praksi afirmirali bili su električna lučnica i električna žarulja. Njihov je razvoj tekao usporedno. *Električna lučnica.* Nakon prvog prijedloga da se električni luk upotrijebi kao izvor svjetla (V. V. Petrov, 1803) i prvih pokusa s električnim lukom (Humphry Davy, 1813) mnogi su se istraživači bavili problemom električnog luka. U prvo vrijeme za obje elektrode među kojima bi se pojavljivao električni luk uzimao se drveni ugljen natopljen nekom vodljivom tekućinom, zatim retortni ugljen (iz plinara), a kasnije umjetni retortni ugljen. Radi postizanja boljeg svjetla ugljenim su se elektrodama početkom ovog vijeka dodavale i različite metalne soli. Elektrode lučnice se prilikom gorenja laka troše i skrću. U toku godina izumljeno je više sistema za održavanje stalnog međuelektrodnog razmaka, od ručnih do potpuno automatskih. Rus P. N. Jabločkov riješio je uspješno ovaj problem dvjema paralelnim elektrodama koje pojednako izgaraju i time se zadržava među njima stalno isti razmak (tzv. Jabločkovljeva svijeća, 1876). Međutim, do šire primjene lučnica došlo je tek poslije 1879, tj. nakon izuma (1867) i usavršavanja električnog dinamo-stroja koji je bio kadar davati dovoljnu energiju za napajanje lučnica. U unutrašnjoj rasvjeti lučnicu su već vrlo rano zamijenile jednosavnijske električne žarulje, ali za vanjsku rasvjetu one su služile do tridesetih godina ovog stoljeća, kad su ih potisnule žarulje veće snage i specijalne sijalice. Danas se lučnice primjenjuju samo još u nekim projekcijskim aparatima i u jakim reflektorima. One stoga u ovom članku neće biti opisane.

Električne žarulje. Prvi pokušaji da se toplinsko djelovanje električne struje iskoristi i za stvaranje svjetlosti padaju u razdoblje između 1838 i 1845. Strujom užareni ugljeni štapići i platinska žica nalazili su se u početku u zraku, ali već