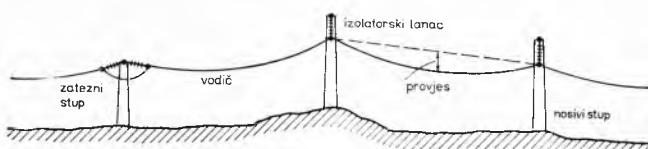


# D

**DALEKOVODI**, električni nadzemni vodovi (slobodni vodovi, zračni vodovi) jake struje visokog i najvišeg napona koji služe za prenos (transport) električne energije bilo s velikim snagama, bilo na srednje i velike udaljenosti, bilo oboje. Danas se električna energija pretežno proizvodi u blizini nalazišta prirodnih izvora energije (fosilnih goriva, vodotoka), odakle se pomoću dalekovoda prenosi do potrošačkih centara, koji mogu biti i na stotine kilometara udaljeni. Za prenos električne energije dalekovodi treba da prenose ponekad i velike električne snage, što zahtijeva, naročito kad su daljine prenosa velike, upotrebu visokih napona, danas i do 700 000 volta. Zbog opasnosti što je visoki napon predstavlja za okolinu, vodići kroz koje teče električna struja moraju biti podignuti visoko iznad zemlje.

Dalekovodi se danas rijetko primjenjuju pojedinačno, redovito je veći broj dalekovoda na nekom području spojen. Spajanje se vrši najčešće u transformatorskim stanicama, gdje se električna energija radi prenosa na daljinu transformira na viši napon, a u potrošačkom centru natrag na niži. Svi među sobom povezani vodovi istog napona zajedno s pripadnim transformatorskim stanicama čine mrežu dotičnog napona na tom području. Takva električna mreža može prekrivati čitavu državu, a može biti povezana i s mrežama susjednih država. Mreže različitih napona na nekom području, zajedno s izvorima električne energije i potrošačima, čine *elektroenergetski sistem* tog područja. Dalekovodi igraju u mrežama i elektroenergetskim sistemima značajnu ulogu, naročito u prenosu električne energije.

Dalekovodi se sastoje od nekoliko *vodiča* koji služe za vođenje električne struje, od *izolatora* koji sprečavaju da struja teče između



Sl. 1. Glavni dijelovi dalekovoda

vodiča ili kroz stupove u zemlju, od *stupova* koji su predviđeni za nošenje i zatezanje vodiča, od *zaštitnih užeta* koja štite dalekovod pred udarcem munje i od različitih dodatnih dijelova koje nazivamo *priborom* dalekovoda (sl. 1).

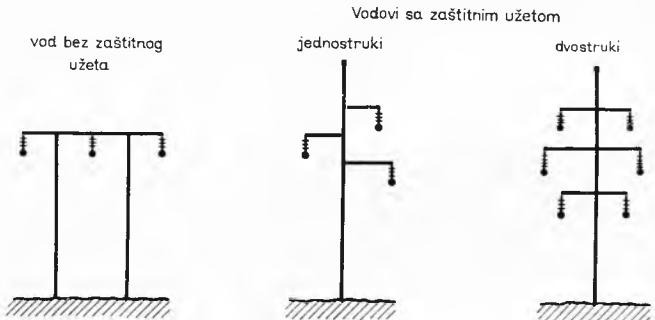
## VODIČI I ZAŠTITNA UŽETA

Vodiči predstavljaju aktivni i najvažniji dio dalekovoda; oni služe za vođenje električne struje.

Zaštitna užeta imaju na dalekovodima dvojaku ulogu. U prvom redu služe za zaštitu od atmosferskih prenapona koji nastaju pri udarcu munje. Za dalekovod je najneugodniji direktni udarac munje u vodič, što dovodi do tako visokih prenapona da to praktički nijedna izolacija dalekovoda ne može izdržati. Zbog toga se zaštitna užeta postavljaju kao gromobrani iznad vodiča i uzemlju-

ju se, da bi preuzela na sebe direktni udarac munje. I udarac munje u stup je neugodan jer zbog otpora uzemljenja stup poprima visok električni potencijal, pa može doći do povratnog preskoka od stupa na vodič. Zaštitna užeta i ovdje pomažu jer ukupnu struju munje podijele na veći broj stupova. Konačno, kad munja udari u okolinu voda, zaštitna užeta smanjuju inducirane prenapone u vodičima.

Zaštitna užeta imaju korisnu ulogu i kad nastane kratki spoj između vodiča i zemlje, jer preuzimaju na sebe dio struje koji



Sl. 2. Raspored vodiča

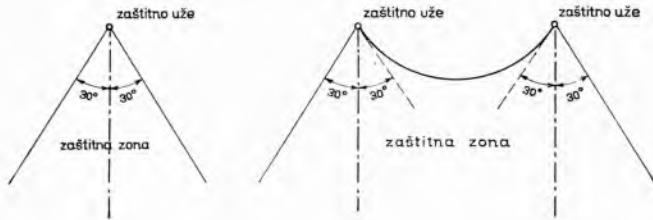
bi inače tekao kroz zemlju. Time se smanjuju na površini tla u okolini stupova opasni naponi koji nastaju pri takvim kvarovima (napon dodira i napon koraka), a isto tako se smanjuju i inducirani naponi u bliskim telefonskim i telegrafskim vodovima.

Vodiči su ovješeni na stupove pomoću izolatora, zaštitna užeta, pak, izravno su učvršćena na njih. Vodiči i zaštitna užeta podjednako su zategnuti; zbog svoje težine oni se provjese. Budući da vodiči stoje pod visokim naponom prema zemlji, oni moraju radi sigurnosti biti dovoljno podignuti pomoću stupova, kako bi se nalazili izvan dohvata ljudi i vozila.

Raspored vodiča i zaštitnih užeta na stupovima može biti različit; on zavisi od konstrukcije stupa i od toga da li se na istim stupovima vode jedan ili dva trofazna voda (jedna ili dvije *trojke*). Sl. 2 daje nekoliko primjera rasporeda vodiča.

Da vodiči budu dovoljno zaštićeni od direktnog udarca munje, treba da se nalaze unutar *zaštitne zone* od 30° koju stvaraju zaštitna užeta (sl. 3). Ako se s jednim zaštitnim užetom ne može postići dovoljno široka zaštitna zona, upotrebljavaju se dva ili iznimno čak tri zaštitna užeta.

Dimenzioniranje vodiča vrši se u električkom i mehaničkom pogledu. U električkom pogledu dimenzioniraju se vodiči s obzirom na struju koja u njima teče i s obzirom na njihov napon. Gubici u otporu vodiča moraju naime ostati u granicama ekonomičnosti, zagrijavanje vodiča ne smije prekoračiti dozvoljenu granicu, a jakost električnog polja oko vodiča ne smije biti prevelika. Osim toga treba prilikom proračuna vodiča voditi računa



Sl. 3. Zaštitna zona kod jednog odnosno dva zaštitna užea

i o prilikama prenosa električne energije u cijelini, i njima prilagoditi otpor voda. (O tome v. više u poglavlju Izbor napona i presjeka vodiča u ovom članku.) Mehaničko dimenzioniranje vodiča vrši se radi uskladivanja mehaničkog naprezanja vodiča i njegova provjesa, tj. njegove visine iznad tla. Zaštitna užeta ne treba električno dimenzionirati s obzirom na napon (jer su ona uzemljena) niti su važne prilike prenosa, već je jedino važno da struja u njima ne prekorači dozvoljenu granicu; u pogledu mehaničkog dimenzioniranja vrijedi za njih isto što i za vodiče.

**Materijal za vodiče.** Vodići se izrađuju od metalâ koji dobro vode električnu struju i imaju i zadovoljavajuću mehaničku čvrstoću, jer vodovi nose sami sebe i eventualni dodatni teret. Žice vodiča moraju biti i dovoljno elastične i savitljive, kako im se zbog njihanja ne bi materijal zamorio i kako ne bi zbog toga došlo do njihova prekida. Na dalekovodima su vodići neizolirani i goli, zbog čega moraju biti i kemijski otporni protiv korozije koja može nastupiti zbog utjecaja atmosfere. U prvom redu dolaze u obzir čisti metali, od kojih se u praksi upotrebljavaju čisti elektrolitski bakar (E-Cu) i aluminij (E-Al). (V. *Aluminijum i Bakar*). Bakar (E-Cu) ima veliku specifičnu vodljivost i u tvrdoručenom stanju njegova mehanička čvrstoća zadovoljava (tabl. I), ali zbog visoke cijene, zbog toga što je to deficitarni materijal, bakar se za vodiče dalekovoda upotrebljava danas samo iznimno. Aluminij slabije vodi električnu struju nego bakar, ali je jeftiniji i znatno lakši, pa je na ovom području gotovo potpuno istisnuto bakar. Zbog njegove premale mehaničke čvrstoće rijetko se za vodiče upotrebljava aluminij sam ili čist, nego se vodičima od aluminija mora upotrebom aluminijskih legura ili kombiniranjem čistog aluminija s čelikom povećati mehanička čvrstoća.

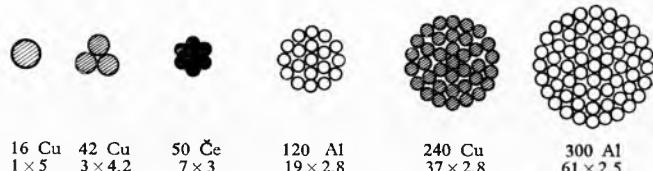
Da bi se poboljšala mehanička svojstva materijala za vodiče, mogu se upotrijebiti i legure, iako se time smanjuje električna vodljivost. Od legura na bazi bakra razne se vrste bronce upotrebljavaju na dalekovodima s bakrenim vodičima tamo gdje je potrebna velika čvrstoća (danasa rijetko). Od legura na bazi aluminija najznačajniji je aldrej (E-AlMgSi), od kojega su u nekim zemljama (npr. Švicarskoj) izvedeni čitavi dalekovodi. U nas se

Tablica 1  
OSNOVNA SVOJSTVA MATERIJALA ZA VODIČE

Materijal		Elektr. vodljivost Sm/mm²	Specif. masa kg/dm³	Vlačna čvrstoća kp/mm²
Metali	bakar aluminij	56 34,8	8,9 2,7	40 17...18
Legure	bronsa aldrej čelik (pocinčani)	48...18 30 ~7	8,65...8,9 2,7 7,8	50...70 30 40...150
Kombinirani vodiči	bakar-čelik (40%) alučel (6 : 1) aldrej-čelik (6 : 1)		8,25 3,45 3,45	60...108 17/120 30/120

spomenute legure ne upotrebljavaju. Među legure ide i čelik, koji se upotrebljava zbog svoje velike mehaničke čvrstoće, ali mora biti pocinčan da se spriječi korozija. Čelik slabo vodi električnu struju, pa dolazi u obzir za zaštitna užeta, a za vodiče sasvim iznimno, npr. kod velikih raspona. Ipak se mnogo upotrebljava u kombinaciji s dobro vodljivim materijalima, prvenstveno s aluminijem. Čistoća materijala i legura koje se primjenjuju za izradu vodiča propisani su standardima pojedinih zemalja. Osnovni podaci materijala za vodiče i zaštitnu užad skupljeni su u tablici 1.

**Izvedba vodiča.** Osnovni oblik vodiča je okrugla žica koja se dobiva izvlačenjem. Vodiči se obično izrađuju od većeg broja žica sukanih u užu. Žice homogenih vodiča sve su od istog materijala. Vodič od jedne žice se upotrebljava samo za male presjek (do 16 mm<sup>2</sup>), a što je veći ukupni presjek vodiča to se uža suče od većeg broja žica, da bi se dobila potrebna gipkost. Različne izvedbe homogenih vodiča prikazane su na sl. 4. Uža od tri žice rijetko se upotrebljava. Normalna izvedba použenog vodiča ima srednju žicu i oko nje sukane slojeve, od kojih je svaki sukan u drugom smislu. Prvi sloj ima 6 žica, a svaki daljnji po 6 više. Tako



Sl. 4. Izvedbe homogenih vodiča

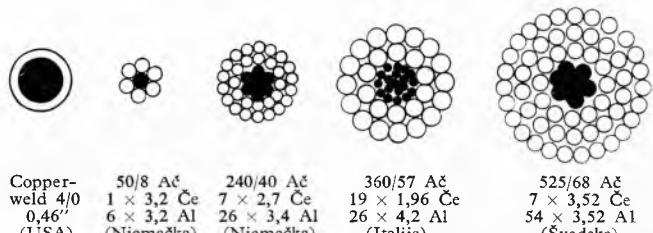
se dobija uža sa 7, 19, 37 i više žica. Promjer pojedinih žica ima standardiziranu vrijednost, npr. 2,8 mm. Presjek vodiča koji je usukan od npr. 37 takvih žica iznosiće 243 mm<sup>2</sup>. To je stvarni presjek vodiča s kojim treba računati. Ali za označavanje radije se upotrebljava tzv. nazivni presjek, koji u ovom primjeru iznosi 240 mm<sup>2</sup>, a to je u stvari zaokružena vrijednost stvarnog presjeka. Nazivni presjeci i najveća trajno dopuštena struja za različite presjeke i materijale vodiča prikazani su u tablici 2.

Tablica 2  
TRAJNO DOPUŠTENA STRUJA U HOMOGENIM VODIČIMA \*

Nazivni presjek mm <sup>2</sup>	Trajna struja, A		
	Bakar	Aluminij	Aldrej
16	115	92	88
25	151	121	115
35	174	149	142
50	234	187	178
50	231	185	176
70	282	226	215
95	357	283	269
120	411	329	313
150	477	382	363
185	544	435	414
240	630	502	479
240	641	513	488
300	747	598	468

\* Izmjenična struja 50 Hz koja neće zagrijati vodič više nego 40 °C iznad temperature okoline

Da se poveća mehanička čvrstoća vodiča a ne smanji time električna vodljivost, mogu se kombinirati dva različita materijala, od kojih jedan (bakar, aluminij, aldrej) prvenstveno služi za vodenje struje, a drugi (čelik) preuzima mehanička naprezanja. To su tzv. *kombinirani vodiči* (sl. 5). Ponekad se dva materijala



Sl. 5. Izvedbe kombiniranih vodiča

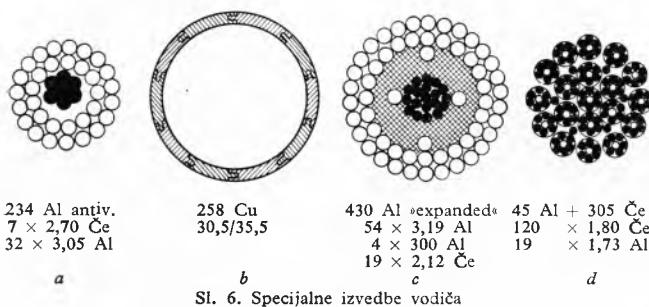
kombiniraju unutar same žice, npr. žice se prave od čelika obloženog bakrom (vodič »copperweld«). Takvi se vodiči upotrebljavaju u Americi, a mogu se kombinirati i u užeta. Druga je mogućnost da se uže suče od žica od različitog materijala. Najpoznatija takva kombinacija je vodič od aluminija i čelika (tzv. *alučel*); to je uže koje ima čeličnu jezgru i oko nje aluminijski plašt. Da se dobije željeni omjer aluminija i čelika, žice općenito nemaju isti promjer.

Tablica 3  
TRAJNO DOPUŠTENA STRUJA U VODIĆIMA OD ALUČELA

Nazivni presjek mm <sup>2</sup>	Trajna struja A	Nazivni presjek mm <sup>2</sup>	Trajna struja A
16/2,5	90	210/36	490
25/4	125	240/40	530
35/6	145	300/50	615
50/8	170	125/29	355
70/12	235	170/40	440
95/15	290	210/50	505
120/21	345	310/100	630
150/25	400	340/110	680
185/32	455	—	—

Dimenzija kombiniranog vodiča se obično navodi tako da se najprije daje nazivni presjek plašta, a zatim nazivni presjek jezgre (npr. 240/40 mm<sup>2</sup>). Kombinirani vodiči od aludreja i čelika se također upotrebljavaju, ali rijetko. Podaci za vodiče od alučela prikazani su u tablici 3.

Da bi se udovoljilo posebnim zahtjevima, upotrebljavaju se i specijalne izvedbe vodiča. Ovdje su navedene samo neke od njih. *Antivibrationo uže* (sl. 6 a) ima svrhu da se smanje štetne vibracije vodiča koje nastaju uslijed trajnog vjetra srednje jakosti a dovode do umora materijala i prekida vodiča. Izvedba je slična alučelu, samo što je ostavljen zračni razmak između čelične jezgre i aluminijskog plašta. Pri montaži se posebno zateže jezgra a posebno plašt, pa uslijed nejednakih frekvencija vibracija dolazi do prigušenja. Zbog složenosti proizvodnje, montaže i uzdržavanja, antivibraciona užeta se nisu afirmirala. *Šuplji vodiči* izvode se sa svrhom da se uz isti presjek dobije veći promjer vodiča i tako smanji jakost električnog polja na njegovoj površini, što je povoljno za sprečavanje korone. Na slici 6 b prikazana je izvedba koja je upotrijebljena na vodu 287 kV Boulder Dam — Los Angeles, a sastoji se od profiliranih spirala koje zahvaćaju jedna u drugu i stvaraju donekle gipku cijev. Ima i drugih izvedaba, npr. od okruglih žica u jednom ili dva sloja oko šupljine koja se održava pomoću posebnog umetka.



Potreba da se vodič izvede sa šupljinom naročito dolazi do izražaja ako se kao materijal upotrebljava bakar, koji zbog velike električne vodljivosti zahtjeva razmjerno mali presjek. Zbog složenosti proizvodnje, pogona i uzdržavanja, šuplji vodiči su izgubili na značenju, a problem električnog polja se danas rješava na drugi način: upotrebom vodiča od alučela (koji imaju veći promjer) i upotrebom snopova (koji smanjuju jakost polja). *Eksplandirani vodiči*, koji su uvedeni u Americi, nisu se naročito afirmirali, a također imaju svrhu da se umjetno poveća promjer vodiča. U načelu se sastoje od čelične jezgre i aluminijskog plašta, između kojih je umetnut sloj od neutralnog materijala, npr. od parafiniranog papira (sl. 6c). Prednost im je što se s njima barata kao i s drugim punim vodičima, ali im je manja što umetnuti sloj ne preuzima ni mehaničke sile ni električnu struju.

U posebnim slučajevima upotrebljavaju se i posebne izvedbe vodiča, obično sa svrhom da se dobije veća mehanička čvrstoća

i veća sigurnost od prekida. Primjer takve izvedbe je vodič upotrijebljen za dalekovod koji povezuje kopno Italije sa Sicilijom iznad Mesinskog tjesnaca. Sastoje se od 19 elementarnih užeta (jedna aluminijска žica u sredini i šest čeličnih žica oko nje) sukanih u jedno uže, i još šest čeličnih žica umetnutih u međuprostore (sl. 6d).

**Materijal i izvedba zaštitnih užeta.** U načelu se zaštitna užeta izrađuju u istoj izvedbi i od istog materijala kao i vodič. Ako ona služe samo za zaštitu od atmosferskih prenapona (u mrežama gdje zvjezdasti nije kruto uzemljeno), onda se za njih upotrebljavaju lošije vodljivi materijali, npr. homogeno uže od čelika. Ali tamo gdje ona treba da preuzmu i dio struje kratkog spoja, ona moraju biti izrađena od materijala bolje vodljivosti. Za ovu svrhu upotrebljavaju se užeta od alučela iste izvedbe kao za vodiče, eventualno s manjim omjerom aluminija prema čeliku. U nekim zemljama primjenjuje se i čelik obložen bakrom.

**MEHANIČKI PRORAČUN VODIČA.** Na dalekovodima su vodiči izolatorima učvršćeni na stupove i zategnuti. Tačke učvršćenja na stupovima nazivaju se *ovjesišta*, a razmak između njih *rasponom*. Općenito ovjesišta u jednom rasponu nisu na istoj visini, ali se visinska razlika, ako nije velika, često zanemaruje, jer to na mehanički proračun vodiča mnogo ne utječe. Prilike se u tom slučaju promatraju kao da je posrijedi horizontalni raspon. Vodič ne nosi samo svoju vlastitu težinu nego i *dodatni teret* uslijed zaledenja, stvaranja inja i nakupljanja snijega ili uslijed djelovanja vjetra, a iznimno i uslijed djelovanja zaledenja i vjetra zajedno. *Dodatni teret* je kombinacija vlastite težine i dodatnog tereta. *Ukupni teret* je kombinacija vlastite težine i dodatnog tereta.

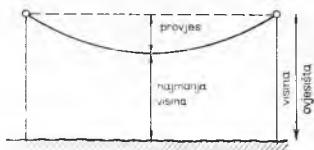
Vodič ne može zauzeti položaj spojnica, tj. ravne linije između dva ovjesišta, nego se zbog svoje težine provjesi u vidu krive linije (lančanice). *Provjes* je najveća okomita udaljenost vodiča od spojnica između ovjesišta (sl. 7). Da bi visina vodiča iznad tla bila dovoljna, nastoji se da provjes bude što manji, a to se može postići jedino jačim zatezanjem vodiča. No time se povećava mehaničko naprezanje i opasnost od prekida vodiča. Problematika mehaničkog proračuna vodiča sastoji se upravo u uskladivanju provjesa i naprezanja. Obično se računa s horizontalnim naprezanjem (naprezanjem u najnižoj tački vodiča), ali se mora voditi računa i o naprezanju u ovjesištu, koje je veće.

U mehaničkom proračunu vodiča pretpostavljaju se određeni *klimatski uvjeti* ne samo u pogledu intenziteta dodatnog tereta uslijed leda i vjetra nego i u pogledu temperatura koje utječu na stezanje i rastezanje vodiča, pa time i na veličinu provjesa, odnosno naprezanja.

Temperatura se za mehanički proračun vodiča uzima za Jugoslaviju u granicama od  $-20$  do  $+40$  °C, a temperatura na kojoj nastupa dodatni teret uzima se  $-5$  °C. To je određeno našim propisima za gradnju dalekovoda. U zemljama sa drugaćjim klimatskim prilikama propisane su druge vrijednosti.

*Dodatni teret* po pravilu nastupa uslijed zaledenja. Intenzitet dodatnog tereta treba procijeniti na temelju prilika na terenu ili na temelju rezultata mjerenja. Razlikuju se normalni i iznimni dodatni teret. Kao normalni dodatni teret važi prema našim propisima najveći teret uslijed zaledenja koji se na dotičnom mjestu pojavljuje prosječno u razdoblju od 5 godina, ali se ne smije uzeti vrijednost manja od  $0,18 \sqrt{d}$  kp/m, gdje je  $d$  promjer vodiča u milimetrima. Po pravilu se kao normalni teret uzimaju samo vrijednosti koje se dobiju ako se najmanja vrijednost izračunata prema spomenutoj formuli množi (prema mjesnim prilikama) s faktorima 1,0, 1,6, 2,5 ili 4,0. Kao *iznimni teret* se uzima onaj koji se pojavljuje prosječno svakih 20 godina, ali se u račun ne uzimaju vrijednosti manje od dvostrukog normalnog dodatnog tereta. *Ukupni teret* dobiva se zbrajanjem težine vodiča i ovako definiranog dodatnog tereta.

U područjima s jakim vjetrom može se dogoditi da je ukupni teret uslijed vjetra i težine vodiča veći nego ukupni teret uslijed težine vodiča i leda. U tom slučaju normalni dodatni teret treba izabrati tako da ukupni teret ne bude manji nego u slučaju s vje-



Sl. 7. Provjes vodiča u rasponu

trom. U posebnim slučajevima, kad se može očekivati da će se led stvarati pod utjecajem hladnog vjetra (npr. bure), računa se s istodobnim zaledivanjem i pritiskom vjetra, iako to propisi izričito ne zahtijevaju.

Našim propisima određen je najmanji pritisak *vjetra* s kojim treba računati, i to: za vodove čija visina prelazi 15 m iznad zemlje,  $50 \text{ kp/m}^2$ ; za vodove čija visina prelazi 15 m iznad zemlje,  $60 \dots 80 \text{ kp/m}^2$ , i to za dijelove između 0 i 30 m nad zemljom  $60 \text{ kp/m}^2$ , za dijelove između 30 i 60 m nad zemljom  $70 \text{ kp/m}^2$ , za dijelove iznad 60 m nad zemljom  $80 \text{ kp/m}^2$ . Za vodiče je mjerodavna visina ovjesišta iznad zemlje.

Za područja s jačim vjetrom (bura, košava, vardarac, veće nadmorske visine) treba računati s većim pritiskom vjetra, koji se računa prema formuli  $p_v = v^2/16$ , gdje je  $v$  maksimalna brzina vjetra u metrima na sekundu koja se na tom mjestu pojavljuje u razdoblju od 5 godina.

Sila kojom vjetar djeluje na vodič dobiva se tako da se napadnuta površina vodiča (promjer  $\times$  dužina) množi s pritiskom vjetra. To bi još trebalo množiti s koeficijentom koji zavisi od oblika napadnutog tijela, no po našim propisima taj koeficijent za vodiče iznosi 1,0.

**Približni mehanički proračun vodiča.** Za uobičajene veličine raspona od nekoliko stotina metara proračun se obično vrši s približnim formulama izvedenim uz pretpostavku da je teret jednolično raspoređen duž horizontalne projekcije vodiča, a ne duž samog vodiča. U tom slučaju se pretpostavlja da vodič poprima oblik parabole a provjes  $f$  se računa po formuli

$$f = \frac{a^2 g}{8 \sigma},$$

gdje je  $a$  raspon,  $g$  reducirani teret koji se dobije tako da se ukupni teret podijeli s presjekom vodiča,  $\sigma$  horizontalno naprezanje (mehanički napon) vodiča.

Provjes izvan sredine raspona može se računati po formuli

$$f = \frac{(a - b) b g}{2 \sigma},$$

gdje je  $b$  udaljenost od jednog ovjesišta do mjesta gdje se traži provjes.

Kod strmog raspona, gdje je visinska razlika ovjesišta dosta velika, treba kao približnu pretpostavku uzeti da je teret jednolično podijeljen duž spojnica ovjesišta. U tom slučaju može se provjes računati po formuli

$$f = \frac{a^2 g}{8 \sigma \cos \alpha},$$

gdje je  $\alpha$  kut nagiba strmog raspona.

Dužina užeta ( $l$ ) računa se po formuli:

$$l = a + \frac{8 f^2}{3 a} = a + \frac{a^3 g^2}{24 \sigma^2}.$$

Kod uobičajenih dužina raspona od nekoliko stotina metara provjes iznosi nekoliko postotaka od dužine raspona, a dužina vodiča je jedva za nekoliko promila duža od raspona.

Tablica 4  
FIZIKALNA SVOJSTVA MATERIJALA ZA VODIČE

Materijal	Specifična masa $\text{kg/m}^3$	Modul elastičnosti $\text{kp/mm}^2$	Linearni toplinski koeficijent rastezanja, $1/\text{°C}$
Bakar	8 900	13 000	$17,0 \cdot 10^{-6}$
Bronza I	8 900	13 000	$17,0 \cdot 10^{-6}$
Bronza II	8 650	13 000	$16,6 \cdot 10^{-6}$
Bronza III	8 650	13 000	$16,6 \cdot 10^{-6}$
Čelik I	7 800	19 200	$12,3 \cdot 10^{-6}$
Čelik II	7 800	19 600	$11,0 \cdot 10^{-6}$
Čelik III	7 800	20 000	$11,0 \cdot 10^{-6}$
Čelik IV	7 800	20 000	$11,0 \cdot 10^{-6}$
Aluminij	2 700	5 600	$23,0 \cdot 10^{-6}$
Aldrej	2 700	6 000	$23,0 \cdot 10^{-6}$
Alučel 6/1	3 450	7 500	$19,5 \cdot 10^{-6}$
Alučel 4/1	3 650	7 800	$17,6 \cdot 10^{-6}$
Alučel 3/1	3 980	8 700	$16,6 \cdot 10^{-6}$

Ako se u proračunu vodiča mijenja pretpostavljeni teret ili temperaturna, vodič iz prvog stanja s određenim provjesom i naprezanjem prelazi u drugo stanje s novim provjesom i naprezanjem. Prilike nisu jednostavne jer se zbog promjene naprezanja

mijenja dužina vodiča uslijed različitog elastičnog rastezanja. Proračun novog naprezanja može se provesti pomoću jednadžbe stanja:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{E} + a(\vartheta_1 - \vartheta_2) = \frac{a^2}{24} \left( \frac{g_1^2}{\sigma_1^2} - \frac{g_2^2}{\sigma_2^2} \right),$$

gdje je  $E$  modul elastičnosti vodiča,  $a$  linearni toplinski koeficijent rastezanja,  $\vartheta$  temperatura, a indeks 1 označava prvo stanje i indeks 2 drugo stanje.

Za korišćenje jednadžbe stanja potrebno je poznavati fizikalna svojstva materijala za vodiče, koja su navedena u tablici 4. Osim toga propisi određuju najveće dopušteno naprezanje za vodiče

Tablica 5  
NAJVEĆE DOPUŠTENO NAPREZANJE VODIČA

Materijal	Ispitna čvrstoća $\text{kp/mm}^2$	Dopušteno naprezanje, $\text{kp/mm}^2$		
		normalno		iznimno žica i uže
		žica	uze	
Tvrdi bakar	40	12	19	30
Polutvrdi bakar	30	10	12	24
Bronza I	50	14	24	40
Bronza II	60	18	30	50
Bronza III	70	22	35	62
Čelik I	40	12	16	32
Čelik II	70	20	28	56
Čelik III	120	30	45	90
Čelik IV	150	40	55	110
Aluminij	17...18	—	7	12
Aldrej	30	—	12	24
Alučel 6/1	Al 17...18	—	10	21
Alučel 4/1		—	11	25
Alučel 3/1		—	12	28
Ce	120	—	—	—

od različitih materijala (tablica 5). Za potrebe proračuna izabire se maksimalno radno naprezanje, tj. maksimalno naprezanje koje će biti postignuto kod bilo kojeg stanja vodiča unutar danih uvjeta za temperature i dodatni teret. Maksimalno radno naprezanje ne smije biti veće od dopuštenog naprezanja, ali smije biti manje, npr. ako se želi veća mehanička sigurnost.

Budući da se naprezanje vodiča povećava sa snižavanjem temperature, a isto tako i s povećavanjem tereta, to *maksimalno radno naprezanje* može nastupiti bilo kod  $-20^\circ\text{C}$  bilo kod  $-5^\circ\text{C}$  s dodatnim teretom. *Osnovno stanje* naziva se ono kod kojeg nastupa maksimalno radno naprezanje, a kod drugog od spomenuta dva stanja naprezanje je onda manje. Kriterij za utvrđivanje osnovnog stanja je *kritični raspon* ( $a_k$ ), koji se računa po formuli:

$$a_k = \sigma_{\max} \sqrt{\frac{360 a}{g_z^2 - g_0^2}},$$

gdje je  $\sigma_{\max}$  maksimalno radno naprezanje,  $g_z$  reducirani ukupni teret (zaledjenog) vodiča,  $g_0$  reducirani teret (golog) vodiča, a linearni toplinski koeficijent rastezanja. Ako je stvarni raspon veći od kritičnoga (što je redovito slučaj kod dalekovoda za prenos), onda je osnovno stanje ono kod  $-5^\circ\text{C}$  s ledom.

Provjes vodiča se povećava s temperaturom, a isto tako i s povećanjem tereta. Zbog toga *maksimalni provjes* može nastupiti bilo kod  $+40^\circ\text{C}$  bilo kod  $-5^\circ\text{C}$  s ledom. Kriterij za utvrđivanje toga stanja je *kritična temperatura*, koja se računa po formuli:

$$\vartheta_k = \frac{\sigma_{\max}}{a E} \left( 1 - \frac{g_0}{g_z} \right) - \vartheta_0.$$

$\vartheta_0$  je temperatura od  $-5^\circ\text{C}$ . Kritična temperatura je u stvari ona temperatura kod koje goli vodič ima isti provjes kao i zaledeni vodič kod  $-5^\circ\text{C}$ . Ako je kritična temperatura manja od  $+40^\circ\text{C}$ , onda maksimalni provjes nastupa kod stanja  $+40^\circ\text{C}$ .

*Tok proračuna* obično ide redom kako je navedeno u nastavku. Najprije se izabere maksimalno radno naprezanje i pomoću kritičnog raspona utvrdi se osnovno stanje. Zatim se pomoću jednadžbe stanja izračuna naprezanje za ostala potrebna stanja vodiča, a poznavajući naprezanje izračuna se za ostala stanja i provjes. Tako se dobije podloga za montažu vodiča, i ako se on kod određene temperature montira s izračunatim provjesom odnosno naprezanjem, onda će u danim klimatskim uslovima naprezanje vodiča upravo dosegnuti izabrano vrijednost maksimalnog radnog naprezanja. Po potrebi se uz pomoć kritične temperature izračuna maksimalni provjes radi određivanja visine ovjesišta iznad tla.

Gornji proračun odnosi se na normalni dodatni teret i normalno naprezanje. Međutim, vodič mora imati dovoljni *mehanički stepen sigurnosti* zbog iznimnih prilika koje mogu nastupiti. Naši propisi zahtijevaju da naprezanje vodiča u ovjesištu pri iznimnom dodatnom teretu ne prekorači vrijednost iznimnog dopuštenog naprezanja. Pomoću jednadžbe stanja može se izračunati horizontalno naprezanje pri iznimnom dodatnom teretu, a zatim i provjes. Naprezanje u ovjesištu računa se po formuli:

$$s = \sigma + fg.$$

Obično se izračuna *granični raspon*, koji ima upravo još potrebiti mehanički stepen sigurnosti. Tada je dovoljno samo kontrolirati da nijedan raspon dalekovoda nije veći od graničnoga. Strmi raspon se ne može direktno uspoređivati s graničnim, nego se mora najprije nadopuniti na *totalni raspon* (sl. 8) koji se računa po formuli:

$$a_t = a + \frac{2h\sigma}{ag}.$$

Sve što je rečeno vrijedi za jedan raspon s čvrstim ovjesišta vodiča. Kod dalekovoda s izolatorskim lancima ovjesišta vodiča na nosivim stupovima nisu čvrsta, nego se zbog otklona izolatorskih lanaca mogu pomocić u ismjeru trase voda. Jedino na zateznim stupovima može se smatrati da su ovjesišta čvrsta, pa se zato promjene stanja vodiča ne mogu promatrati odvojeno za pojedine raspone, nego za čitavo zatezno polje (od jednog do drugog zateznog stupa) u cjelini. Kod bilo kojeg stanja horizontalno će naprezanje vodiča u svim rasponima jednog zateznog polja biti isto, a ta ravnoteža će biti postignuta potrebnim otklonom nosivih izolatorskih lanaca. Kod promjene stanja se horizontalno naprezanje računa opet pomoću jednadžbe stanja, ali se umjesto raspona uvrsti *idealni raspon*, koji se za jedno zatezno polje računa po formuli

$$a_i = \sqrt{\frac{a_1^3 + a_2^3 + \dots + a_n^3}{a_1 + a_2 + \dots + a_n}},$$

gdje su  $a_1, a_2, \dots, a_n$  svi rasponi u zateznom polju.

Na temelju tako izračunatog horizontalnog naprezanja, provjesi u pojedinim rasponima računaju se prema prije spomenutoj formuli za svaki raspon posebno.

**Tačni mehanički proračun vodiča.** Kad su rasponi veći, treba proračun provesti tačnije, pa se polazi od toga da je teret jednolično raspodijeljen duž vodiča. U tom se slučaju uzima da vodič poprima oblik lančanice.

Provjes se računa iz formule:

$$f = \frac{\sigma}{g} \left( \operatorname{ch} \frac{ag}{2\sigma} - 1 \right),$$

ili razvito u red

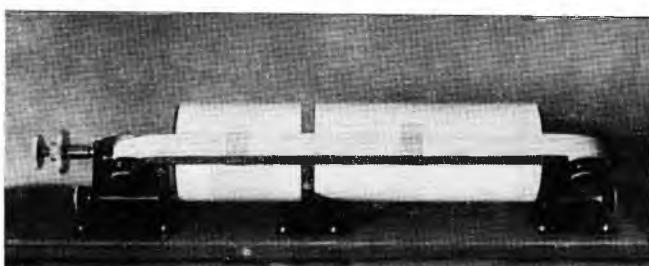
$$f = \frac{a^2 g}{8\sigma} + \frac{a^4 g^3}{384\sigma^3} + \dots$$

Dužina vodiča:

$$l = \frac{2\sigma}{g} \operatorname{sh} \frac{ag}{2\sigma} = a + \frac{a^3 g^2}{24\sigma^2} + \frac{a^5 g^4}{1920\sigma^4} + \dots$$

Naprezanje u ovjesištu:

$$s = \sigma \operatorname{ch} \frac{ag}{2\sigma} = \sigma + fg.$$



Sl. 9. Mehanički računar za provjesne i naprezanja (Elektrotehnički fakultet, Zagreb)

Toplinsko i elastično rastezanje treba računati s obzirom na punu dužinu vodiča. Osim toga treba uvažiti da naprezanje duž vodiča nije jednako, nego se mijenja od najmanjeg naprezanja u najnižoj tački vodiča do najvećeg u ovjesištu. Zbog toga se računa s *efektivnim naprezanjem*, koje daje isto rastezanje kao u stvarnosti, a koje se računa iz izraza:

$$\sigma_{ef} = \sigma \frac{l}{a} = \sigma + \frac{1}{2} fg.$$

Rješenje kod promjene stanja se prema gornjim formulama može dobiti nekom matematičkom metodom sukcesivnog približavanja. Razvijene su i različite grafičke metode, pa i specijalna računala (sl. 9). Danas se za mehanički proračun vodiča sve više upotrebljavaju elektronička računala.

**Dimenzioniranje zaštitnih užeta.** U pogledu provjesa i naprezanja mora se za zaštitna užeta provesti isti proračun kao i za vodiče. Pri tome treba voditi računa o tome da provjes ne bude prevelik, kako se zaštitna užeta ne bi previše približila vodičima (u kom bi slučaju postojala opasnost preskoka između vodiča i zaštitnih užeta) i kako bi zaštitna zona uvijek i na svakom mjestu obuhvaćala vodiče. Time je određen i najmanji presjek koji zaštitno uže u danim prilikama treba da ima. Presjek mora biti dovoljno velik da se zaštitno uže pretjerano ne zagrijava uslijed struje koja u njemu teče za vrijeme kratkog spoja.

#### IZOLATORI

Izolatori predstavljaju na dalekovodima pasivni električni dio. Oni sprečavaju da struja teće kratkim putem između vodiča ili kroz stupove u zemlju i time daju dalekovodu potrebnu električnu čvrstoću. Kako su vodiči s pomoću izolatora pričvršćeni na stupove, ovi moraju biti i mehanički dovoljno čvrsti. Iz toga, a i iz prilika u kojima se izolatori nalaze, slijede zahtjevi koji se na njih postavljaju.

Izolatori moraju imati dovoljnu električnu čvrstoću na preskok, koja zavisi od vanjskih dimenzija i od oblika izolatora, a potrebna je da ne dođe do električnog luka između vodiča i stupa kroz uzduh duž izolatora. Od njih se nadalje traži i električna čvrstoća na probaj, koja zavisi od unutrašnjih dimenzija i svojstava materijala, a potrebna je da ne dođe do probaja i kratkog spoja kroz sam izolator. Izolatori se dimenzioniraju tako da im je čvrstoća na probaj veća od čvrstoće na preskok, jer probaj dovodi do uništenja izolatora. Daljnji važan zahtjev je mehanička čvrstoća, koja zavisi od unutrašnjih dimenzija i svojstava materijala, a potrebna je da ne dođe do loma izolatora pod djelovanjem sila koje na njega djeluju.

Izolatori moraju biti otporni prema promjenama temperature do kojih dolazi u slučaju kratkog spoja s električnim lukom duž izolatora. Zahtjeva se dakako i postojanost svojstava izolatora, uključivši ovdje i postojanost prema atmosferskim utjecajima. Daljnji je zahtjev sigurnost od pada vodiča u slučaju mehaničkog oštećenja izolatora, koja se može postići odgovarajućom izvedbom izolatora, odnosno prikladnim pričvršćenjem vodiča. Konačno se kao zahtjev može navesti laka proizvodnja i povoljna cijena, također lako održavanje u pogonu.

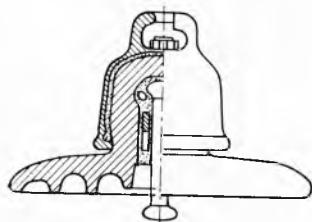
**Materijal za izolatore.** Za izradu izolatora za dalekovode danas se upotrebljavaju prvenstveno keramički izolacioni materijali, koji — ako su kvalitetno proizvedeni — dobro zadovoljavaju postavljene zahtjeve. Najviše se primjenjuje *elektroporculan*, koji se u osnovi proizvodi od smjese glinenca, kvarca i kaolina, upotrijebljenih otprilike u omjeru 1 : 1 : 2. Od upotrijebljenog omjera zavisi kojem će zahtjevu biti bolje udovoljeno: veći postotak glinenca daje veću električnu čvrstoću na probaj, veći postotak kvarca daje veću mehaničku čvrstoću, a veći postotak kaolina daje veću otpornost prema topolini. Vanjska površina se prilikom drugog pečenja glazira prevlakom sličnom staklu, i to u smeđoj ili eventualno zelenoj (danas rijetko u bijeloj) boji, da se eventualna vлага lakše suši na suncu. Uz elektroporculan upotrebljavaju se i neki drugi keramički materijali s istaknutim pojedinim svojstvima, npr. *steatit* s većom mehaničkom čvrstoćom (u njemu magnezijev silikat uglavnom zamjenjuje glinenac).

U posljednje vrijeme sve se više upotrebljava za izolatore i *kaljeno staklo*, naročito u nekim zapadnim zemljama; takvi izolatori upotrijebljeni su već i kod nas (220 kV Split — Zagreb). Formirani stakleni izolatori koli se u struji hladnog zraka, tako

da mu se naglo ohladi površina a unutrašnjost mu se ohladi kasnije. Time se na površini izolatora stvore tlačna naprezanja, što staklu daje znatno veću mehaničku čvrstoću, pogotovo na udar, i veću otpornost prema promjenama temperature.

Izolatori se ne sastoje samo od izolacionog tijela, nego imaju i metalne dijelove, obično od pomicanog čelika, koji služe za vezu prema stupu, za vezu prema vodiču ili za vezu između pojedinih dijelova izolatora. Za vezu između izolacionog tijela i metalnih dijelova, a isto tako za vezu među pojedinim dijelovima izolacionog tijela (kod velikih potpornih izolatora), upotrebljavaju se različita vezna sredstva. Da ne dođe do prskanja izolacionog tijela, vezna sredstva moraju imati, uz dovoljnu mehaničku čvrstoću, skoro isti koeficijent rastezanja kao što ga imaju izolator i čelik, i ne smiju bubriti uslijed vlage.

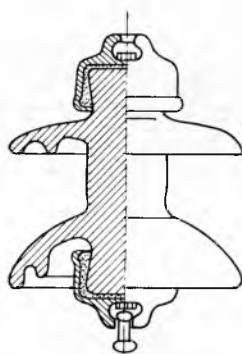
**Izvedba izolatora.** Za dalekovode napona 30 kV i više upotrebljavaju se ovjesni izolatori, od kojih se sastavljaju izolatorski



Sl. 10. Kapasti izolator



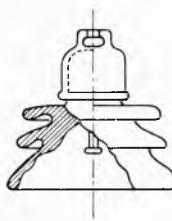
Sl. 12. Štapni izolator



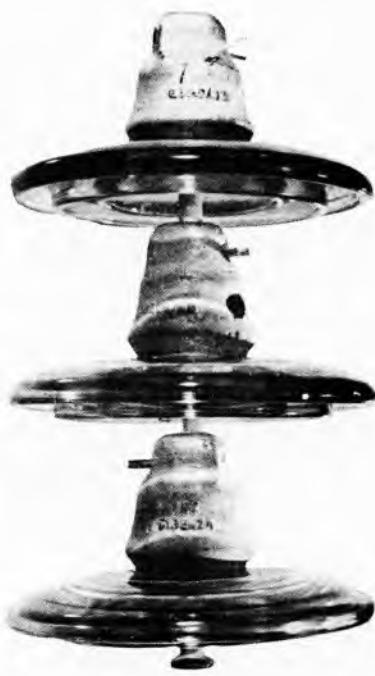
Sl. 11. Masivni izolator

lanci. Izolatorski lanci obično imaju veći broj ovjesnih izolatora (izolatorskih članaka), ali mogu se sastojati i od svega jednog članka. Upotreba izolatorskih lanaca sastavljenih od ovjesnih izolatora ima mnogo dobrih strana. Izolatori nisu mehanički napregnuti na savijanje nego samo na vlastiti težinski moment, pa se mogu upotrijebiti po volji dugi lanci (i po nekoliko metara), kako to već zahtijeva napon dalekovoda. Ako se jedan članak ošteti ili probije, ostali članici će dati dovoljnu električnu čvrstoću dalekovodu do prve prilike za popravak; pri popravku dovoljno je zamjeniti samo oštećeni članak. Ako se dalekovod privremeno stavlja u pogon sa smanjenim naponom (npr. sa 110 kV, a graden je za 220 kV), može se privremeno u izolatorske lance montirati manji broj članaka. Konačno, ako se u jednom rasponu prekine vodič, na nosivom će se stupu izolatorski lanac otkloniti i tako smanjiti jednostrani vlastiti težinski moment.

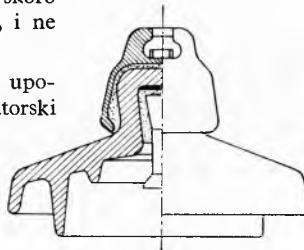
Od porculanskih ovjesnih izolatora najviše se upotrebljavaju kapasti izolatori (sl. 10). U porculansko tijelo je odozgo usaden batić, a odozgo nasadena kapa s grijezdom u koje se utakne batić slijedećeg članka. Prednost je izolatora ove izvedbe da se razmjerno lako proizvode jer nemaju ni velikih ni debelih porculanskih komada. Nadalje je mehanički problem dobro riješen jer je porculan uglavnom napregnut na tlak (stiskanje) i jer se veza između batića i kape obično ne prekine kad se izolator mehanički ošteti, pa ne dolazi do pada vodiča. Mana mu je što je izložen proboru, a taj se može utvrditi samo električkim ispitivanjem koje treba vršiti povremeno za vrijeme pogona.



Sl. 13. Magleni kapasti izolator



Sl. 15. Tri staklena kapasta izolatora spojena zajedno

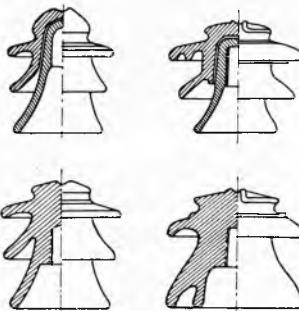


Sl. 14. Magleni kapasti izolator od stakla

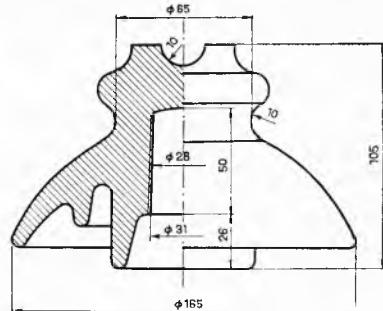
U srednjoj Evropi se dosta upotrebljavaju *masivni izolatori* (sl. 11) i *štapni izolatori* (sl. 12).

Prednost im je što su neosjetljivi na probor, pa ih ne treba ni u pogonu ispitivati. Mana im je što je porculan napregnut na vlastiti težinski moment, a vlačna je mehanička čvrstoća porculana mnogo manja nego tlacića i što se lanac prekida kad se jedan izolator mehanički ošteti. Zbog toga se takvi izolatori izrađuju od mehanički čvršćeg materijala (steatita).

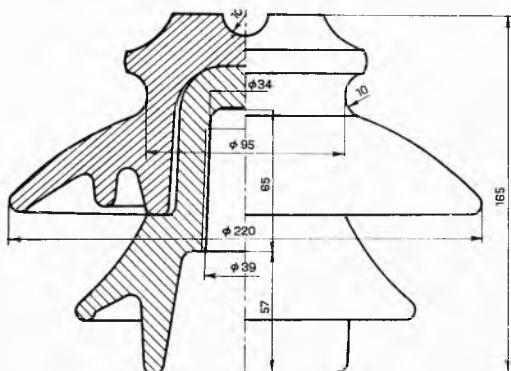
Da se osigura električna čvrstoća na preskok, izolatori su oblikovani tako da imaju dugu kliznu stazu po površini izolacionog tijela, od koje staze jedan dio ostaje suhi i za vrijeme kiše. Na taj se način sprečava pojavljivanje puzavih struja koje bi mogle nastati naročito ako je izolator onečišćen i ovlažen, i konačno bi dovele do preskoka. Za dalekovode koji prolaze kroz područja s većom mogućnošću onečišćenja izolatora upotrebljavaju se *magleni*



Sl. 16. Izvedbe potpornih izolatora



Sl. 17. Izolator I 165



Sl. 18. Izolator I 220

*izolatori* sa mnogo dužom kliznom stazom. Ti izolatori imaju veću električnu čvrstoću na preskok u nepovoljnim atmosferskim uvjetima, ali su skuplji od običnih. Kapasti magleni izolator od porculana prikazan je na sl. 13, a štapni magleni izolator je sličan običnom izolatoru, samo ima veći broj rebara.

*Ovjesni stakleni izolatori* izrađuju se samo kao kapasti, i to bilo kao obični bilo kao magleni (sl. 14). Najveća im je prednost pred porculanskim izolatorima što nikakva ispitivanja za vrijeme pogona nisu potrebna, jer i najmanje oštećenje stakla na bilo kojem mjestu dovodi do rasprskavanja čitavog staklenog tijela i do otpadanja vanjskih staklenih dijelova, pa je takav izolatorski članak već izdaleka uočljiv. Na sl. 15 vide se tri staklena kapasta izolatora spojena u jedan dio izolatorskog lanca.

Za manje napone (10 do 35 kV) upotrebljavaju se *potporni izolatori*, koji su preko usaćene potpore čvrsto pričvršćeni na stup. Vodiči se smještaju u žlijeb na izolatoru (sa strane ili odozgo) i pričvršćuju veznom žicom ili posebnim stezaljkama. Neke izvedbe potpornih izolatora koje se upotrebljavaju u srednjoj Evropi prikazane su na sl. 16.

U nas su neke izvedbe izolatora standardizirane, i to u pogledu dimenzija i u pogledu mehaničkih i električnih svojstava. Standardizirani kapasti izolator nosi oznaku »Izolator K 170/280 JUS N. F1.111«. Glavne dimenzije su mu: promjer 280 mm i visina (u sastavljenom lancu) 170 mm, a svojstva: mehaničko opterećenje 6400 kp, podnošljivi izmjenični napon pod kišom 45 kV i preskočni udarni napon (pozitivni) 130 kV. Od potpornih izolatora standardizirani su »Izolator I 165 JUS N. F1.101« (sl. 17) s mehaničkim prelomnim opterećenjem 1000 kp, podnošljivim izmjeničnim naponom pod kišom 40 kV i preskočnim udarnim naponom (pozitivnim) 110 kV, i »Izolator I 220 JUS N. F1.102« s mehaničkim prelomnim opterećenjem 1200 kp, podnošljivim izmjeničnim naponom pod kišom 64 kV i preskočnim udarnim naponom (pozitivnim) 160 kV (sl. 18).

**Izbor izolatora s obzirom na mehanička naprezanja.** U tom pogledu potrebno je odabrat izolator, odnosno izolatorski lanac, tako da s dovoljnim stepenom sigurnosti izdrži sile kojima na nj djeluje pričvršćeni vodič. Kod zateznih stupova se vlačna sila u vodiču direktno prenosi na izolatore, pa osnovu za izbor izolatora čini vlačna sila u vodiču koja se dobije ako se presjek vodiča pomnoži s maksimalnim radnim naprezanjem. Kod nosivih stupova koji se nalaze u pravcu trase vlak vodiča s jedne strane izolatora u ravnoteži je s vlakom vodiča na drugoj strani, pa se na izolator prenosi samo vertikalna sila uslijed težine. Kao osnova za izbor izolatora uzima se težina vodiča s normalnim dodatnim teretom. Pri tome treba voditi računa o eventualnim visinskim razlikama između stupova, jer će vertikalna sila kod stupa na uzvisini biti veća, a kod stupa u udolini manja od sile kod stupa u ravnici.

Kod kapastih izolatora mjerodavna je elektromehanička čvrstoća, koja mora biti tri puta veća od sile (kako je gore definirana) koja se prenosi na izolator. Kod masivnih i štapnih izolatora mjerodavna je prekidna čvrstoća, koja također mora biti bar tri puta veća od sile, a kod potpornih izolatora mjerodavna je također prekidna čvrstoća, ali ona mora biti samo 2,5 puta veća od sile koja djeluje na izolator. Podaci o elektromehaničkoj odnosno prekidnoj čvrstoći za različite izvedbe i različite veličine izolatora nalaze se u odgovarajućim standardima i u katalozima tvornica koje ih proizvode.

Ako jedan potporna izolator ili jedan izolatorski lanac ne zadovoljava u mehaničkom pogledu u zadanim prilikama, upotrebljava se paralelno više izolatora odnosno više lana, koji zajednički preuzimaju ukupnu silu. Pri tome se mora upotrijebiti mehanička veza koja garantira da će ukupna sila biti jednolično raspodijeljena na sve izolatore, odnosno izolatorske lance. Kod ovjesnih izolatora se događa da se moraju upotrijebiti dvostruki, trostruki, pa čak i višestruki lanci.

U izvjesnim slučajevima propisi zahtijevaju pojačanu mehaničku sigurnost izolacije, npr. kad dalekovod prolazi kroz naseljeno mjesto, kad prelazi preko autoputa itd. U takvim slučajevima upotrebljavaju se višestruki izolatori, koji i u slučaju prekida jednog izolatora, odnosno jednog izolatorskog lanca, mogu s dovoljnom sigurnošću izdržati postojeće sile. Pri tome se kod potpornih izolatora zahtijeva isti stepen sigurnosti 2,5, dok se kod ovjesnih izolatora stepen sigurnosti od 3 smanjuje na 2.

**Izbor izolatora s obzirom na električna naprezanja.** U ovom pogledu osnovu za izbor izolatora čine unutarnji prenaponi, tj. najviši kratkotrajni prenaponi koji se mogu pojaviti uslijed naglih promjena stanja u mreži. Visina unutarnjih prenapona zavisi od najvišeg pogonskog napona mreže, a donekle i od toga je li zvjezdasti mreže kruto uzemljeno ili nije. Obično se određuje propisima koliki napon treba da je izolacija dalekovoda kadra podnijeti bez preskoka ili probaja. Podaci prema našim propisima dani su u tablici 6, a odnose se na normalne atmosferske prilike

Tablica 6  
PODNOŠLJIVI NAPONI ZA IZOLACIJU DALEKOVODA

Uzemljenje mreže	Maksimalni pogonski napon kV	Jednominutni podnošljivi (efektivni) napon 50 Hz pod kišom kV	Podnošljivi udarni napon* 1,2/50 kV
nije kruto	3,6	16	45
	7,2	22	60
	12,0	28	75
	24,0	50	125
	38,0	70	170
	72,5	140	325
	123,0	230	550
	245,0	460	1 050
kruto	123,0 245,0	185 395	450 900

\* Oblik i trajanje udarnog napona po JUS

(pritisak 760 mm, temperatura +20 °C, vлага 11 g/m³). Na višim nadmorskim visinama treba voditi računa o tome da je zrak rijed i da lakše dolazi do preskoka.

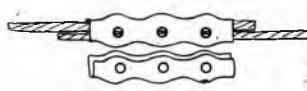
Kod ovjesnih izolatora treba odabrati toliki broj članaka u lancu da se postigne potrebiti podnošljivi napon. Nažalost se napon u izolatorskom lancu ne podjeli podjednako na sve članke, nego najveći dio napona preuzima najdonji članak (najблиži vodiču). Zbog toga treba ispitivanjem utvrditi podnošljivi napon za lance s različitim brojem članaka, i samo to može činiti osnovu za izbor broja članaka. Pri tome treba ispitivati kompletan lanac zajedno s ostalom opremom (rogovima, prstenima), jer sve to utječe na podnošljivi napon.

U područjima gdje dolazi do onečišćavanja površine izolatora zahtijeva se i određena dužina klizne staze, to veća što je veći stepen onečišćenja. To u stvari znači da se prelazi na upotrebu maglenih izolatora. U područjima s veoma velikim onečišćenjem umjesto toga se u posljednje vrijeme upotrebljava premaz izolatora silikonskom mašču, koji se premaz obnavlja obično svake godine. Taj premaz odbija vlagu i sprečava da se stvorи vodljiva staza po površini izolatora, pa ne dolazi do preskoka iako su izolatori onečišćeni.

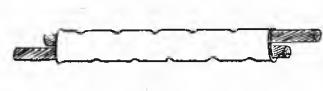
#### PRIBOR ZA DALEKOVODE

Sastavne dijelove dalekovoda možemo podijeliti na gradevine (stupovi i temelji) i električne. U električne dijelove ide osim vodiča i izolatora i pribor dalekovoda. Pribor sačinjava mnogo različitih dijelova koji ne moraju biti uvijek upotrijebljeni, a koji mogu biti na različitim dalekovodima različito izvedeni. Pribor možemo podijeliti na spojni i zaštitni, a jedan i drugi mogu imati električnu i mehaničku svrhu.

**Spojni pribor** ima ujedno i električnu i mehaničku ulogu. Za spajanje vodiča u rasponu upotrebljavaju se različne vrste



Sl. 19. Vijčana spojnica



Sl. 20. Zarezna spojnica

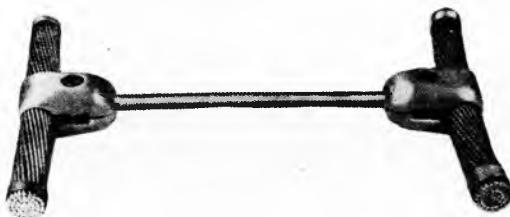
*spojnice*, koje moraju omogućiti dobro vođenje električne struje, a moraju izdržati i mehaničke sile. Kod necentričnih spojnice vodič se postavlja u tuljak jedan kraj drugoga i učvršćuju se. Takva je npr. vijčana spojnica (sl. 19), upotrebljavana za manje

presjek, ili zarezna spojnica (sl. 20), kod koje se radi fiksiranja vodiča posebnim alatom utiskuju zarezi u ovalni tuljak. Kvalitetnijima se smatraju centrične spojnice, u kojima se vodiči na-



Sl. 21. Kompresiona spojnica (montaža)

stavljaju jedan na drugi tačno u istom pravcu. Takva je npr. konusna spojnica, koja je dosta komplikirana. U novije se vrijeme mnogo upotrebljavaju kompresione spojnice (sl. 21), koje imaju



Sl. 22. Odstojnik za dva vodiča u snopu

cijevni tuljak u koji se s jedne i s druge strane uvuku vodiči. Tuljak i vodiči se zajedno hidrauličkom prešom čvrsto stisnu.

Na zateznim stupovima spajaju se vodiči, koji dolaze s jedne i s druge strane, u tzv. strujni most, koji se nalazi ispod izolatorskih lanaca. U tu svrhu se upotrebljavaju različite *strujne stezaljke*,



Sl. 23. Nosiva stezaljka

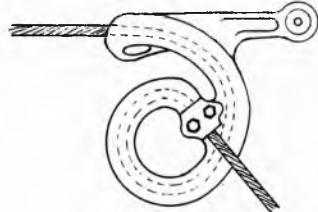
na koje se ne stavljaju posebni mehanički zahtjevi, pa se mogu za ovu svrhu upotrijebiti jednostavni vijčani spojevi koji se po potrebi mogu lako i otvoriti.

Ako dalekovod ima vodiče u snopu, mora se osigurati razmak i međusobni položaj tih vodiča i u rasponu, jer nije dovoljno ako se to učini samo kod pričvršćenja vodiča na izolatorski lanac. Radi toga se unutar raspona postavljaju *odstojnici* (sl. 22), koji mogu biti različite izvedbe i izradeni za snopove od 2, 3 ili 4 vodiča. Odstojnici imaju samo mehaničku ulogu.

Za pričvršćenje vodiča na izolatorske lance nosivih stupova upotrebljavaju se *nosive stezaljke* (sl. 23). Od njih se traži i dovoljna

gibljivost, da ne dođe do prekida vodiča zbog umora materijala. Ponekad se upotrebljavaju i izvedbe koje dozvoljavaju da vodič iskoči iz stezaljke u slučaju jednostranog vlaka (kad se prekine vodič), čime se rasterećuje nosivi stup od opterećenja za koja nije predviđen. Za pričvršćenje vodiča na izolatorske lance zateznih stupova upotrebljavaju se *zatezne stezaljke*, koje moraju čvrsto držati vodič, a da ipak ne dođe do njegova oštećenja. U tu svrhu upotrebljavaju se različita rješenja. Pužasta stezaljka (sl. 24) preuzima zateznu silu vodiča postepeno duž čitavog svog oboda.

Konusna stezaljka (sl. 25) ima konus koji se to jače steže što je jača sila koja djeluje na vodič. Vijčana stezaljka (sl. 26) ima vijčane stremene koji pritišću vodič u užlijebljeno tijelo stezaljke. Radi



Sl. 24. Pužasta zatezna stezaljka



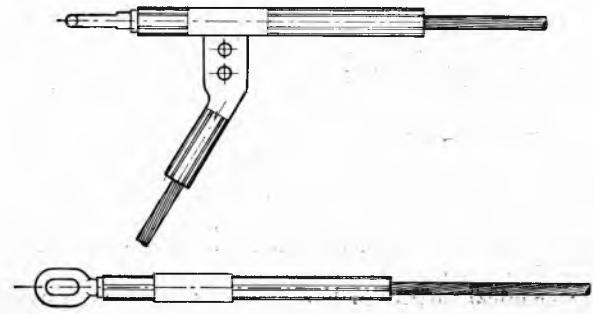
Sl. 25. Konusna zatezna stezaljka

boljeg preuzimanja zatezne sile žlijeb može imati valovit oblik. Kompresione stezaljke (sl. 27) rješavaju zadatak na isti način kao što je rečeno kod kompresionih spojница.



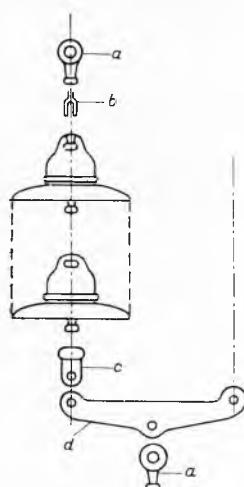
Sl. 26. Vijčana zatezna stezaljka

Za sastavljanje izolatorskih lanaca stoji na raspolaganju veoma velik broj različitih dijelova pribora, od kojih se najčešće pojavljuju (sl. 28): *batić s uškom* (a) s gornje strane lanca, *zatik za osiguranje* (b) da batić ne iskoči iz zdjelice, *zdjelica s uškom* (c) s donje strane lanca, i *jaram* za sastavljanje dvostrukih izolatorskih lanaca (d).

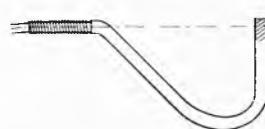


Sl. 27. Kompresiona zatezna stezaljka

Za pričvršćenje izolatorskih lanaca na stup upotrebljavaju se *vijčani stremeni* ili slični dijelovi koji se prilagoduju izvedbi stupova. Za učvršćenje potpornih izolatora upotrebljavaju se *potporni*



Sl. 28. Tipični pribor za izolatorske lance. a - Batić s uškom, b - zatik, c - zdjelica s uškom, d - jaram



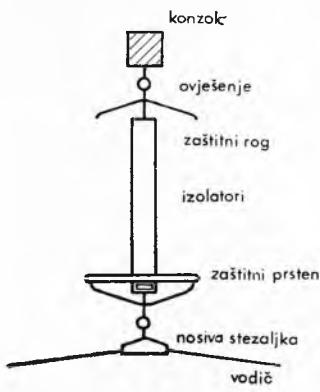
Sl. 29. Savinuti potporanj za potporni izolator



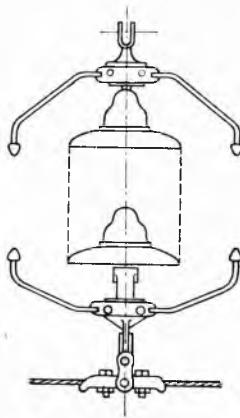
Sl. 30. Ravnji potporanj za potporni izolator

*potporni* koji su odozdo usađeni u šupljinu izolatora. Savinuti potporanj se upotrebljava za direktnu montažu na drveni stup (sl. 29), a ravnji potporanj za montažu na metalnu ili betonsku konzolu (sl. 30).

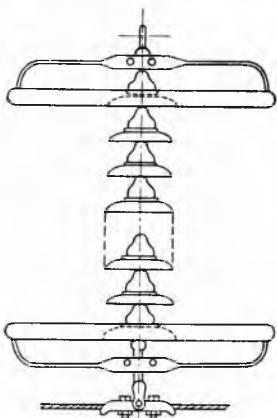
**Električni zaštitni pribor** (sl. 31). Ovamo idu *zaštitni rogov* na izolatorskim lancima (sl. 32), koji u slučaju kratkog spoja



Sl. 31. Izolatorski lanac i pribor



Sl. 32. Zaštitni rogovi na izolatorskom lancu



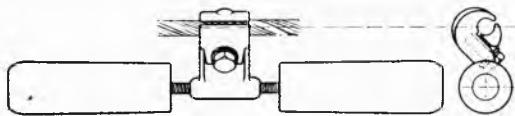
Sl. 33. Zaštitni prsteni na izolatorskom lancu

treba da preuzmu na sebe električni luk i tako zaštite od štetnog toplinskog djelovanja prvenstveno izolatore, ali također vodič i pribor za ovješenje izolatorskih lanača. *Zaštitni prsteni* (sl. 33) osim toga treba da povoljnije oblikuju električno polje, naročito na donjem kraju izolatorskog lanača. Sve širom upotreboom brze zaštite od kratkog spoja i orientacijom na dimenzioniranje izolacije prema udarnim naponima, zaštitni rogov i prsteni pomalo gube od svog značenja.

U električni zaštitni pribor bi u stvari pripadala i zaštitna užeta i uzemljenje. Ali zbog njihovog razmjerno velikog značenja bolje je o njima govoriti posebno.

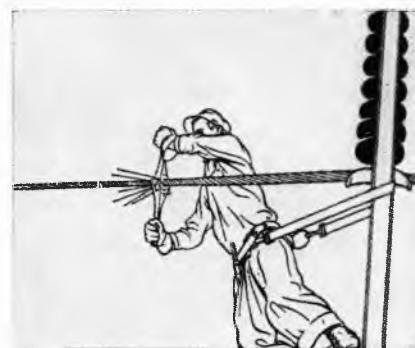
**Mehanički zaštitni pribor.** Ovamo ide u prvom redu pribor koji služi za prigušenje vibracija vodiča i za sprečavanje štetnih

posljedica u vezi s njima. Usljed djelovanja vjetra stvaraju se oko vodiča uzdušni vrtlozi koji dovode do vibracija vodiča. Posljedica dugotrajnih vibracija je umor materijala, zbog čega dolazi do prekidanja pojedinih žica vodiča, naročito u blizini tačaka pričvršćenja, gdje su zbog mehaničkih refleksija naprezanja najveća.



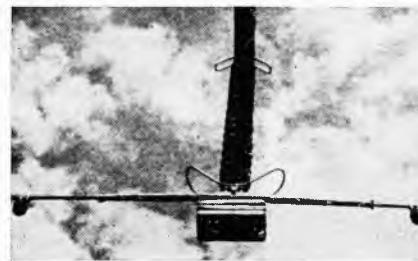
Sl. 34. Prigušnik vibracija

Da se to sprijeći, upotrebljavaju se *prigušnici* (sl. 34), koji se sastoje od utega elastično pričvršćenih na vodič, a stavljuju se na vodič u blizini stupova pored nosivih ili zateznih stezaljki. U istu svrhu se u posljednje vrijeme sve više upotrebljavaju *prutovi* (sl. 35)



Sl. 35. Montaža prutova

koji se spiralno omotaju oko vodiča prije montaže u nosivu stezaljku. Prutovi ne samo da dobro prigušuju vibracije nego i pojačavaju vodič tamo gdje je najpotrebiti. Ovamo idu i *utezi* (sl. 36) koji se vješaju na nosive izolatorske lance da se poveća



Sl. 36. Uteg

vertikalna sila prema dolje. To je potrebno kod stupova u dolinama, jer bi moglo — zbog toga što su susjedni stupovi viši — doći do prevelikog bočnog otklona izolatora uslijed vjetra ili čak do podizanja izolatorskog lanača.

#### UZEMLJENJE DALEKOVODA

Uzemljenje općenito ima svrhu da pojedine tačke električnog postrojenja vodljivo poveže sa zemljom. Kod dalekovoda dolazi u obzir uzemljivanje nosača izolatora, odnosno ovjesišta izolatorskih lanača, i uzemljivanje zaštitnog užeta, ako postoji. Zadatak koji se pri tome postavlja uzemljenju jest da se struja koje teku u zemlju odvedu u nju na bezopasan način. Do struja koje teku u zemlju dolazi u slučaju kratkog spoja između vodiča i zemlje (preskok ili proboj na izolatoru) ili u slučaju udarca munje u vod.

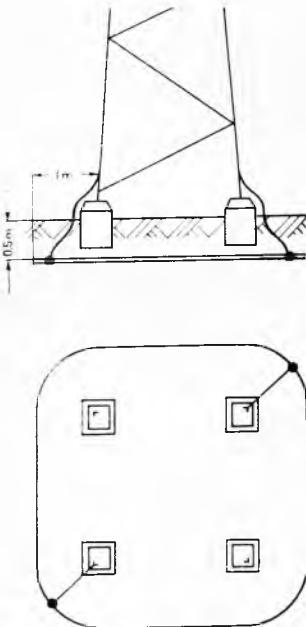
Uzemljenje se sastoji od uzemljivača, tj. metalne elektrode ukopane u zemlju, i od dozemnog voda koji povezuje s uzemljivačem one tačke na stupu dalekovoda koje treba uzemljiti (sl. 37). Prikładnim dimenzioniranjem dozemnog voda sprečava se eventualno oštećenje stupa uslijed struja koje teku u zemlju, a prikladnim dimenzioniranjem uzemljivača sprečava se povratni preskok od stupa na vodič, do kojeg bi moglo doći uslijed velikog pada napona na

otporu uzemljenja. Time uzemljenje ispunjava svoj zadatak u pogledu sigurnosti dalekovoda.

Pri prelazu struje u zemlju nastaju na površini tla u okolini stupa razlike električnog potencijala koje mogu biti opasne za ljude i životinje. U tom pogledu razlikujemo napon dodira i napon koraka. *Napon dodira* je napon između stupa i tačke na površini tla udaljene 1 metar od stupa. Toliki napon može djelovati na osobu koja se nalazi u blizini stupa i dodirne stup. *Napon koraka* je napon između dvije tačke na površini tla udaljene jedna od druge 1 metar. Toliki napon može djelovati na osobu koja hoda u blizini stupa. Uzemljenje ima svrhu da svede na bezopasnu mjeru takve potencijalne razlike na površini koje nastaju uslijed struja kratkog spoja (ali ne i uslijed udarca munje).

**Izvedba uzemljenja.** *Dozemni vodovi* se izrađuju u obliku čelične, bakarne ili aluminijске okrugle šipke, plosnate trake ili užeta. Zbog opasnosti od korozije, mehaničkog oštećenja i zagrijavanja uslijed struje ne smiju se upotrijebiti manji presjeci od ovih: čelik  $50 \text{ mm}^2$ , bakar  $16 \text{ mm}^2$  i aluminij  $35 \text{ mm}^2$ . Kod metalnih stupova može se i sama konstrukcija stupa upotrijebiti umjesto dozemnog voda. Na betonskim stupovima mogu se u tu svrhu iskoristiti neki štapovi čelične armature, ali onda moraju biti među sobom pouzdano električno spojeni, najbolje zavareni. Isto tako može se posebni dozemni vod ugraditi unutar betona. Na drvenim stupovima, ako imaju uzemljenje, mora se položiti dozemni vod duž stupa. Za spajanje na dozemnom vodu primjenjuju se stezaljke, viđani spojevi i zavarivanje.

*Uzemljivači* stvaraju neposrednu vodljivu vezu dozemnog voda s tlom, a svojim oblikom i dimenzijama definiraju strujno polje u svojoj okolini. O njima ovise otpor uzemljenja i potencijalne razlike na površini tla u okolini stupa. Izrađuju se od nerđajućeg ili pocijančanog čelika ili eventualno od bakra. Po obliku dijele se na pločaste, šipkaste ili cijevaste i trakaste. *Pločasti uzemljivači* imaju oblik kvadratne ploče površine  $\sim 1 \text{ m}^2$ , a izrađeni su od punog lima ili u obliku rešetke. Oni se danas za dalekovode praktički više ne upotrebljavaju. *Šipkasti uzemljivači* izrađeni su od cijevi dužine  $3\ldots5 \text{ m}$ , promjera  $\sim 50 \text{ mm}$  ili od profilnog željeza sličnih dimenzija; oni se zabijaju u zemlju. Za dalekovode se upotrebljavaju rijetko. *Trakasti uzemljivači*, u obliku plosnate trake, šipke ili užeta, ukopaju se horizontalno otprilike pola metra ispod površine zemlje. Uzemljivači ove vrste danas se najčešće upotrebljavaju za dalekovode. Zbog opasnosti od korozije, mehaničkog oštećenja i zagrijavanja uslijed struje ne smiju se za različite vrste uzemljivača upotrijebiti manje dimenzije od onih u tablici 7. Primjer trakastog uzemljivača za dalekovode prikazan je na slici 37. U izvjesnim slučajevima može i sam temelj stupa služiti umjesto uzemljivača, pa se u tom slučaju posebni uzemljivači ne izvodi.



Sl. 37. Trakasti uzemljivač

Primjera radi neka bude navedeno da u tlu sa specifičnim otporom  $100 \Omega \text{ m}$  otpor uzemljenja za pločasti uzemljivač s dimenzijama  $1 \times 1 \text{ m}$ , a isto tako i za šipkasti uzemljivač dužine

3,5 metara, iznosi  $\sim 25 \Omega$ , a za trakasti uzemljivač ukupne dužine 40 metara otpor iznosi  $\sim 5 \Omega$ . Otpor uzemljenja može se odrediti mjeranjem na modelu, a isto tako i mjeranjem u naravi na izvedenom uzemljivaču, što se redovito vrši radi kontrole.

Tablica 7  
MINIMALNE DIMENZIJE UZEMLJIVAČA

Uzemljivači	Pocinčani čelik	Bakar
trakasti	traka $100 \text{ mm}^2$ , ali ne tanja od $3,5 \text{ mm}$	$50 \text{ mm}^2$ , ali ne tanja od $2,5 \text{ mm}$
	uže $50 \text{ mm}$	$35 \text{ mm}^2$
šipkasti	cijev $2''$ , ali ne tanja od $3 \text{ mm}$	$50/44 \text{ mm}$
	ugaonik $65 \times 65 \times 7$	—
	profil U 6, odnosno T 6	—
	okrugli čelik $\varnothing 8 \text{ mm}$	—
pločasti	lim $3,0 \text{ mm}$	$1,0 \text{ mm}$

U pogledu sigurnosti dalekovoda otpor uzemljenja trebalo bi da bude što manji, kako struja munje (u slučaju udarca munje u stup) ne bi izazvala velik pad napona u uzemljenju stupa i time dovela do povratnog preskoka. Kako jakost struje munje dosije na desetke hiljada ampera, to sigurnost od povratnog preskoka nije lako postići, naročito na vodovima manjeg napona. Radi sigurnosti ljudi traži se da pad napona u otporu uzemljenja uslijed struje kvara ne prekorači  $125 \text{ V}$ , i to u mrežama koje nemaju kruto uzemljeno zvjezdiste. U tim mrežama, naime, kvar može trajati duže vrijeme, pa je vjerojatnost da netko nastrada veća; struje kvara, opet, nisu velike i zato je traženom zahtjevu lakše udovoljiti.

Za razlike potencijala na površini tla u okolini stupa važno je kako je oblikovan uzemljivač. U pogledu sigurnosti ljudi traži se da u mrežama s kruto uzemljjenim zvjezdistem (tu se struje kvara razmjerno velike, ali se dalekovod u kvaru brzo automatski iskapča) razlike potencijala ne ugrožavaju živote ljudi. U načelu, tamo gdje se očekuje kretanje ljudi u blizini stupova, dodirni napon ne smije biti veći od  $65 \text{ volta}$ , a napon koraka ne smije biti veći od  $125 \text{ volta}$ . Međutim, što se osigurava brže iskapčanje kvara to veće od navedenih mogu biti vrijednosti spomenutih napona. Dovoljno mali napon dodira i napon koraka može se postići upotrebom trakastog uzemljivača koji je oko stupa položen u obliku nekoliko prstena različitih dimenzija, ukopanih na različitim dubinama (tzv. potencijalna rampa). Razlike potencijala mogu se odrediti mjeranjem na modelima ili u naravi.

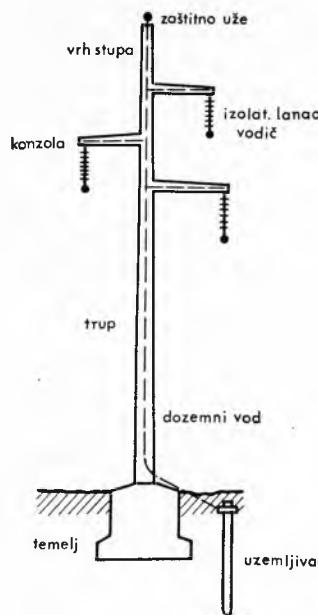
#### STUPOVI DALEKOVODA

Stupovi dalekovoda služe za nošenje i zatezanje vodiča i zaštiti užeta. Oni mogu s obzirom na njihov raspored imati vrlo različite oblike. Stupovi mogu služiti samo za nošenje vodiča (*nosivi stupovi*) ili za nošenje i zatezanje vodiča (*zatezni stupovi*). Oni se postavljaju na razmacima od nekoliko stotina metara. Stupovi mogu biti od čelika, betona ili drveta. Svi oni imaju načelno iste sastavne dijelove, koji su primjera radi prikazani na sl. 38.

Tablica 8  
SPECIFIČNI OTPOR TLA

Vrsta tla	Specifični otpor, $\Omega \text{m}$
Močvara	30
Ilovača Oranica Vlažan sitni pijesak	100
Vlažan krupni pijesak	200
Suh sitni pijesak	500
Suh krupni pijesak Sljunak	1000
Kamenito tlo	3000

Stup ima redovito jedan ili više temelja koji su ukopani u zemlju. Glavni mu je dio *trup* kojim se postiže potrebna visina iznad tla; za pričvršćenje vodiča služe *konzole* ili prečke, a za držanje zaštitnih užeta *vrh stupa*. Često stup ima i posebni dozemni vod za uzemljenje pojedinih tačaka na stupu (ovješenja izolatorskih lanaca i zaštitnog užeta) tj. za njihovo galvansko povezivanje s uzemljivačem koji pripada tom stupu.

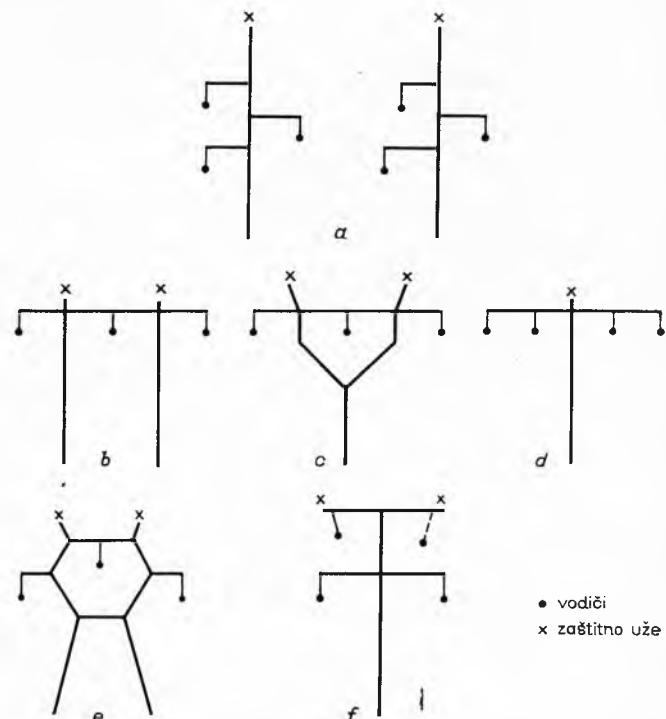


Sl. 38. Stup električnog dalekovoda

sve vodiče od direktnog udarca munje. Manji razmaci vodiča su povoljni ne samo sa stanovišta cijene stupa, nego i stoga što se time smanjuje induktivitet dalekovoda. S druge strane, razmaci moraju biti dovoljno veliki da ne dode do kratkog spoja između dva vodiča i između vodiča i uzemljenih dijelova dalekovoda. Niži stupovi će biti jeftiniji, ali vodiči moraju biti dovoljno visoko da ne budu opasni za ljude i okolinu, a i zaštitna užeta moraju biti dovoljno visoko iznad vodiča da ih obuhvate u svojoj zaštitnoj zoni. Svim zahtjevima se ne može istodobno u punoj mjeri udovoljiti pa se pribjegava kompromisu, ili se traži rješenje koje najbolje zadovoljava u konkretnim prilikama.

Osim spomenutog, na raspored vodiča i zaštitnih užeta u konkretnom slučaju djeluju i razni drugi utjecaji. U prvom redu je to broj vodiča, koji kod jednostrukog trofaznog voda iznosi 3, kod dvostrukog 6, a u posebnim slučajevima može biti i drugačiji. Dalje utječe broj zaštitnih užeta, koji opet zavisi od broja i rasporeda vodiča. Utječi i razmaci vodiča, koji zavise od veličine raspona između stupova a i od napona dalekovoda. Na raspored utječe, nadalje, konfiguracija terena, tj. da li je teren isprekidan, ravan ili strm. Terenske prilike mogu čak utjecati i na broj vodiča na jednom stupu: kod prelaza preko velikih i dubokih dolina, gdje je potreban velik razmak između vodiča a nije potrebna velika visina stupa, gradi se poseban stup za svaki vodič; s druge strane, u gusto izgrađenim industrijskim područjima, da bi se zauzelo što manje zemljišta, postavlja se veći broj trofaznih vodova na iste stupove. Konačno, svoj utjecaj ima i materijal stupa, jer od njega može zavisiti oblik stupa, pa prema tome i raspored vodiča i zaštitnih užeta.

Neke mogućnosti za raspored vodiča i zaštitnih užeta *jednostrukog voda* prikazane su na sl. 3 i 39. Pojedini oblici stupa s tim u vezi dobili su svoja imena. Kad su vodiči raspoređeni u tri visine, češće se upotrebljava »jednostruka jela«, gdje su vodiči i horizontalno razmaknuti, ali zaštitno uže (ukoliko postoji) ipak može dobro štititi vodiče. Kad su vodiči u jednoj visini, najčešće se upotrebljava »portal«, a zatim i »Y-stup«, na koji se mogu postaviti dva zaštitna užeta, koja su potrebna zbog širokog rasporeda vodiča. Rjeđe se upotrebljava »T-stup« zbog lošeg zaštite vodiča jednim zaštitnim užetom i zbog lošeg iskorištenja stupa sa samo tri vodiča. Mjesto za četvrti vodič se naprsto ne iskorištava ili

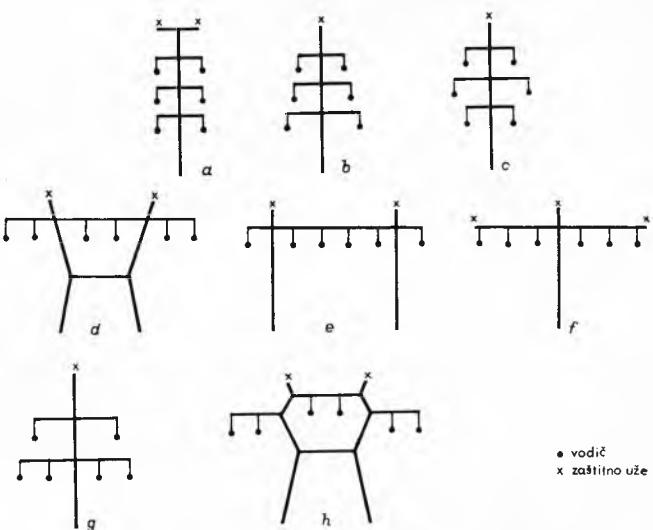


Sl. 39. Raspored vodiča i zaštitnih užeta jednostrukog dalekovoda. a) Jednostruka jela, b) portal, c) Y-stup, d) T-stup, e) mačka, f) dvostruki T-stup

se na njemu montira rezervni vodič. Od rasporeda u dvije visine treba spomenuti »mačku«, koja se razvila od Y-stupa a daje uži raspored, iako to ne ide na račun visine stupa. U nas je na nekim vodovima upotrijebljen i raspored pri kojem gornji vodič mijenja mjesto lijevo-desno od stupa do stupa, čime je postignuta simetrija.

Neke mogućnosti za raspored vodiča i zaštitnih užeta *dvostrukog voda* prikazane su na sl. 40. Kad su vodiči raspoređeni u tri visine, češće se upotrebljava »dvostruka jela«, na kojoj su vodiči horizontalno razmaknuti a i samo jedno zaštitno uže dobro štititi vodiče. Upotrebljava se i »bačva«, koja se u svom donjem dijelu bolje prilagođuje poprečnim strminama terena. Kako raspored u tri visine daje razmjerno visoke stupove, tako raspored u jednoj visini daje razmjerno široke stupove. Najčešće se upotrebljava »Y-stup« i donekle »portal«, a rijetko »T-stup« zbog veoma dugih konzola i teške zaštite od udarca munje u vodič. Najradije se upotrebljava raspored u dvije visine, i to »dvostruki delta« (poznat i pod imenom »Dunav«) i u novije vrijeme »mačka« za dvostruki vod.

**Razmak između vodiča** treba dimenzionirati tako da se izbjegne dodir ili opasno približenje između vodiča ili između



Sl. 40. Raspored vodiča i zaštitnih užeta dvostrukog dalekovoda. a i b Dvostruka jela, c bačva, d Y-stup, e portal, f T-stup, g dvostruki delta-stup, h mačka

vodiča i zaštitnih užeta, stupa i zemlje. Traži se da ne dode do opasnog približavanja niti pod utjecajem vjetra (horizontalni otklon vodiča) niti pod utjecajem dodatnog tereta (veći provjes zaledenog užeta i odskok pri otpadanju leda), pri čemu se klimatski uslovi uzimaju kao što je navedeno u poglavljiju Mehanički proračun vodiča.

**Sigurnosni razmak** je najmanji razmak koji se još dozvoljava pri utjecaju vjetra i/ili leda, i njime treba da se spriječi električni preskok između dijelova različitog napona. Sigurnosni razmak se određuje s obzirom na unutrašnje prenapone (kao i izolacija dalekovoda) i u centimetrima iznosi  $0,7 U_n$  ( $U_n$  je nazivni napon dalekovoda u kilovoltima). On ne smije biti nikad manji od 20 cm. On se može jedino kod približenja vodiča stupu pri otklonu izolatorskog lanca uslijed vjetra smanjiti i do  $0,5 U_n$ .

**Kontrola razmaka vodič-vodič, ili vodič-zaštitno uže,** provodi se pomoću empirijske formule za medusobnu udaljenost:

$$D = \left( 2,5 + \frac{a}{10} \right) \sqrt{f + l} + \text{sigurnosni razmak (centimetara)},$$

gdje je  $a$  kut otklona vodiča uslijed vjetra (kad je manja gustoća materijala vodiča i kad je manji promjer vodiča, kut  $a$  je veći, pa je time i opasnost veća),  $f$  provjes vodiča na  $+40^\circ\text{C}$ , u centimetrima (to je najveći provjes nezaledenog vodiča u danim klimatskim uslovima, a što je provjes veći to će biti i pomak vodiča uslijed vjetra veći, pa time veća i opasnost od približenja),  $l$  dužina izolatorskog lanca u centimetrima.

Račun po gornjoj formuli provodi se za svaki vodič i svako zaštitno uže posebno, pa udaljenost do susjednog vodiča ili zaštitnog užeta ne smije biti manja od toga. To se provjerava pri stanju bez vjetra i leda, i to u sredini raspona. Razmaci u sredini raspona se općenito ne moraju poklapati s razmacima na stupu, a upravo u sredini raspona postoji najveća mogućnost opasnog približenja pri otklonu uslijed vjetra. Ako se npr. pri prelazu dalekovoda iznad velikih i dubokih dolina moraju izvesti tako veliki razmaci da je to teško postići na stupu, vodiči se mogu nejednakom zategnuti, čime se dobiju nejednaki provjesi, pa i veći razmaci u sredini raspona. Drugi je izlaz da se za svaki vodič izvede poseban stup i da se stupovi smjesti na dovoljnem razmaku, jedan od drugog.

Ako s vodiča naglo otpadne led, može vodič odskočiti uvis toliko da se opasno približi vodiču koji se eventualno nalazi iznad njega. Ta se opasnost izbjegava time što se vodiči horizontalno razmaknu za vrijednost sigurnosnog razmaka (sl. 41).

**Kontrola razmaka vodič-stup** se provodi tako da se provjerava postoji li između vodiča i stupa puni sigurnosni razmak ( $0,7 U_n$ ) kod neotklonjenog izolatorskog lanca, odnosno smanjeni sigurnosni razmak ( $0,5 U_n$ ) kod izolatorskog lanca koji je otklonjen uslijed vjetra. Kut otklona izolatorskog lanca  $a$  može se izračunati iz formule:

$$\operatorname{tg} a = \frac{V_v + 0,5 V_1 + R}{G_v + 0,5 G_1 + U},$$

gdje je  $V_v$  sila vjetra na vodič,  $G_v$  sila kojom vodič djeluje na izolatorski lanac prema dolje,  $V_1$  sila vjetra na izolatorski lanac,  $G_1$  težina izolatorskog lanca,  $R$  rezultanta sila zatezanja vodiča, koja dolazi do izražaja ako trasa dalekovoda na tom mjestu ne ide u pravcu nego se lomi (pri tome treba voditi računa o predznaku rezultante prema tome da li rezultanta pomaže vjetru ili mu se suprotstavlja),  $U$  težina eventualnog utega (koji se upravo zato i postavlja da kut otklona ne bi bio prevelik).

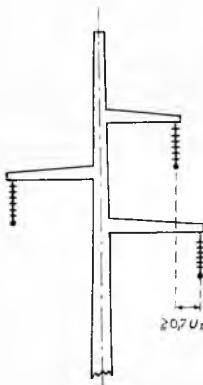
Radi kontrole razmaka vodič-zemlja, ili razmaka od vodiča do raznih objekata na zemlji, provjerava se je li održana sigurnosna visina vodiča nad tlom (kod maksimalnog provjesa bez vjetra) i sigurnosna udaljenost od vodiča do objekata na tlu (kod provjesa na  $+40^\circ\text{C}$  i vjetra između nule i pune vrijednosti). Naši propisi vrlo detaljno određuju kolika je sigurnosna visina i sigurnosna udaljenost za različite slučajevе. Npr. za vodove nazivnog napona

do uključivo 110 kV sigurnosna visina na terenu pristupačnom za vozila iznosi 6 metara, a iznad cesta, autoputova i naseljenih mjesta, 7 metara.

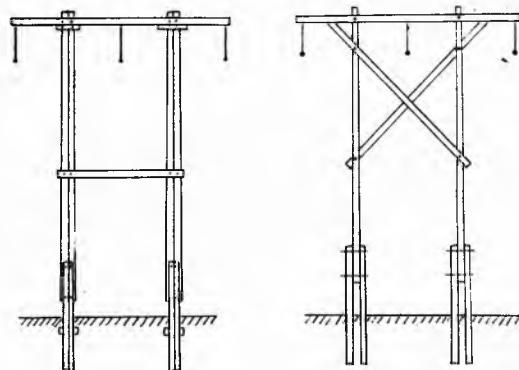
**Materijal i izvedba stupova.** Stupovi za dalekovode se grade od metala, drveta i armiranog betona. Najčešće se čitav stup gradi od istog materijala, ali materijal stupa može biti i kombiniran tako da se pojedini dijelovi stupa grade od različitih materijala. Kako se spomenuti materijali među sobom bitno razlikuju po svojim svojstvima, to su i izvedbe stupova od različitog materijala među sobom bitno različite.

Od metala se prvenstveno upotrebljava **čelik**. Stupovi se obično grade kao rešetkaste konstrukcije od štapova kutnog profila, ali se upotrebljavaju također drugi profili i čelične cijevi. Ako se stupovi izrađuju u tvornici, konstrukcija stupa se većinom svaruje, ali se stup mora izraditi u komadima prikladnim za transport. Za sastavljanje stupa na terenu upotrebljavaju se vijci. Za zaštitu od rde treba stupove premazati bojom otpornom protiv vanjskih utjecaja. U novije vrijeme se stupovi, ili bar njihov gornji dio, pocičavaju, čime se izbjegava potreba redovitog premazivanja bojom u pogonu. Čelični rešetkasti stupovi mogu se lako prilagoditi svim potrebama pri izradnji dalekovoda, pa se zato u velikoj mjeri upotrebljavaju. Čelične cijevi, ukoliko su upotrijebljene umjesto drugih profila, mogu se ispuniti betonom, čime se postiže veća krutost štapova i ušteda na čeliku. U posljednje vrijeme se upotrebljavaju **aluminijске legure**; prednost je takvih stupova što su lagani (povoljno za transport naročito po teškom terenu) i što ih ne treba posebno štititi od rde.

**Drvo** je prvi materijal koji se upotrebljava za stupove dalekovoda. Drveni stupovi se upotrebljavaju još i danas za dalekovode s naponom sve do 220 kV, ali se češće primjenjuju za dalekovode nižih napona. Drvo se upotrebljava u prirodnom obliku kao oblica, te se po potrebi sastavlja u konstrukcije koje nisu veoma složene (sl. 42). Za sastavljanje upotrebljavaju se različiti tesarski spojevi s vijcima. Za zaštitu od truljenja drvo treba impregnirati, kako bi se zajamčila trajnost drveta bar 15–20 godina. Za impregnaciju upotrebljavaju se kreozot i otrovne soli, već prema vrsti drveta. Najviše se upotrebljava bor koji ima pravilan oblik i dade se dobro impregnirati, ali se primjenjuju i ostale vrste četinjača. Kesten ima prednost što se može upotrijebiti i neimpregniran, ali mu nepravilnost oblika otežava upotrebu kod sastavljenih stupova. Hrast se upotrebljava kao rezana građa za spojne klinove i temeljne pragove. Drvo ima i tu prednost da služi kao dodatna izolacija, pa se nosači izolatora na drvenim stupovima redovito ne uzemljuju.

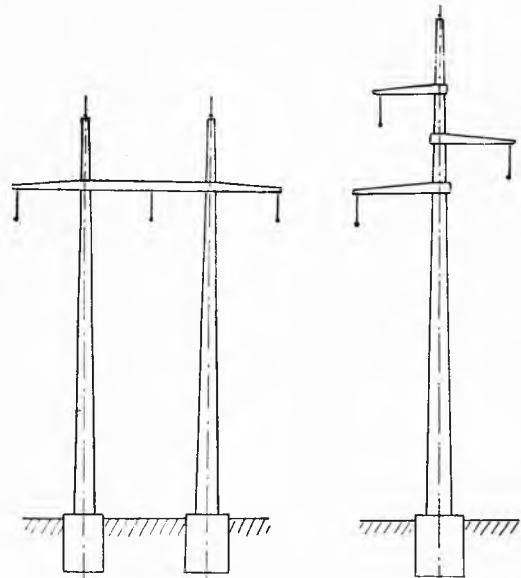


Sl. 41. Horizontalni razmak vodiča



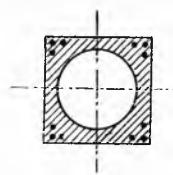
Sl. 42. Izvedbe drvenih stupova 110 kV (Jugoslavija)

**Armiran beton** je materijal koji se također prilično uveo za stupove dalekovoda, naročito ako se želi postići ušteda na čeliku. Vanjski izgled stupova od armiranog betona veoma je jednostavan (sl. 43). Upotrebljavajući pogodne kalupe u koje se lijeva beton može se pojedinim dijelovima stupa dati svaki željeni oblik. Pri izradi stupova moraju se upotrijebiti posebni postupci za dobivanje gustog i kvalitetnog betona, ali zato u pogonu stupovi ne zahtijevaju nikakvo održavanje. Manji im je što su glomazni i što zahtijevaju velike količine materijala, pa to stavlja velike zahtjeve na transport prilikom gradnje. Zbog toga se nastoji dati im konstruktivni oblik koji zahtijeva što manje materijala. Manji se stupovi izrađuju tvornički, a veći na mjestu postavljanja, i to obično u



Sl. 43. Izvedbe betonskih stupova 110 kV (Jugoslavija)

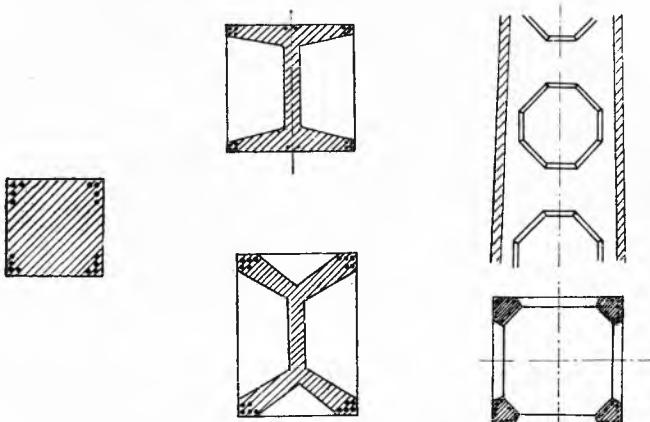
definitivnom uspravnom položaju. Na tvornički izrađenim stupovima može se razmjerno lako postići unutrašnja šupljina. Najpoznatiji su centrifugirani stupovi (sl. 44), pri čijem se lijevanju i stvrđivanju kalup okreće oko uzdužne osi. Time se postiže šupljina u sredini, a gust i otporan beton na površini stupa. Šupljina se može



Sl. 44. Presjek centrifugiranog stupa

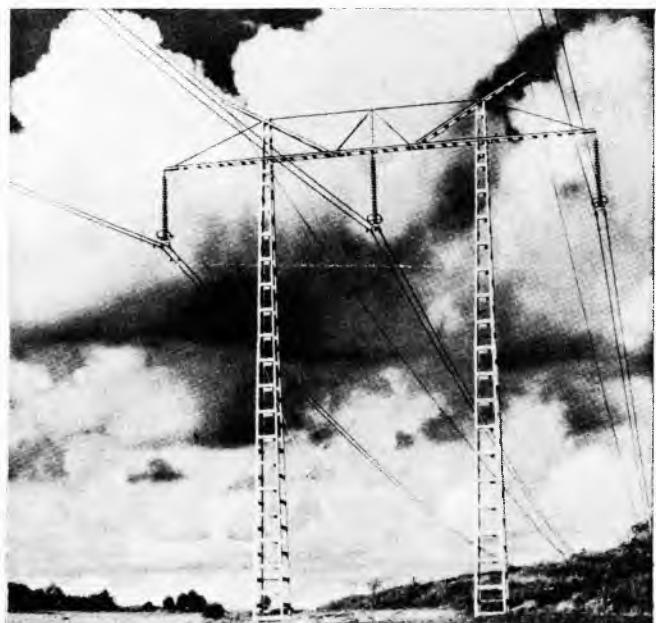
Sl. 45. Presjek betonskog stupa sa šupljinom

postići i tako da se u kalup za lijevanje umeće jezgra koja se izvuče nakon stvrđnjavanja betona. Tako se obično izrađuju stupovi s četverokutnim presjekom (sl. 45). Stupovi koji se izrađuju na terenu ili se rade s punim presjekom ili im je presjek sa šupljinama koje se lakše izrađuju (sl. 46).



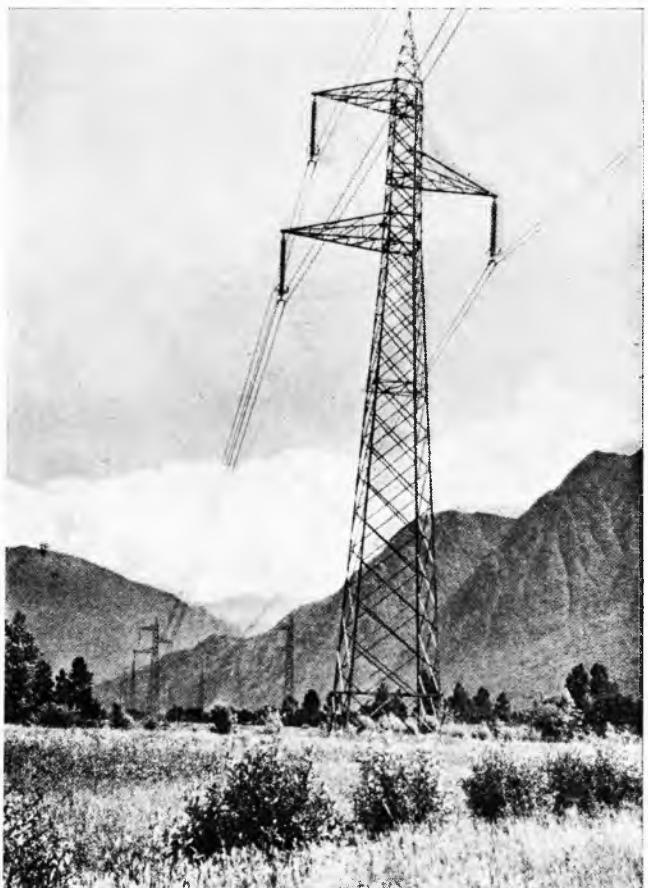
Sl. 46. Presjeci betonskih stupova izrađenih na terenu

**Dimenzioniranje stupova na čvrstoću.** U pogledu dimenzioniranja stupova na mehaničku čvrstoću razlikuju se nosivi i zatezni stupovi. *Nosivi stupovi* služe za nošenje vodiča i zaštitnih užeta koji neprekinuto prolaze kraj stupa i nisu odvojeno pričvršćeni na stup s jedne i druge strane. Ako se stup nalazi u pravcu trase (linijski stup), onda se vlačne sile vodiča s jedne i druge strane stupa poništavaju i ne prenose na stup. Ako se pak stup



Sl. 47. Dalekovod 380 kV (Švedska)

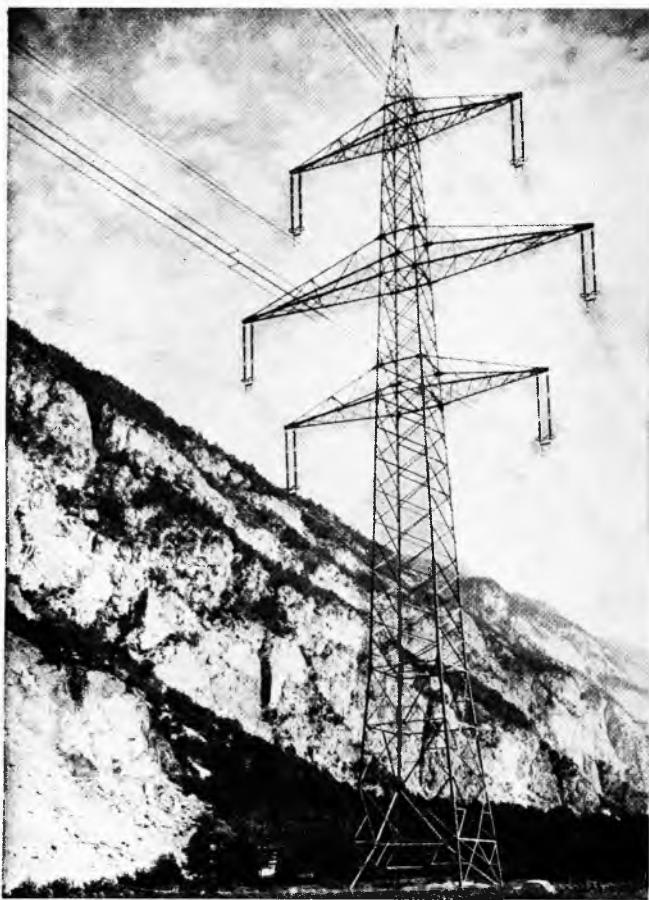
nalazi u kutu trase (kutni stup), na stup se prenosi samo rezultanta vlaka vodiča (i zaštitnih užeta). Zatezni stupovi služe ne samo za nošenje nego također, i prvenstveno, za zatezanje vodiča i zaštitnih užeta, koji su s jedne i druge strane odvojeno pričvršćeni na stup. Vlačna sila u vodiču prenosi se direktno na stup, pa općenito te sile s jedne i druge strane stupa ne moraju biti jednakе. *Zatezni stupovi* postavljaju se najmanje na svakih 5 kilometara ili na 30 raspona radi lakše montaže i radi ograničenja smetnja prilikom eventualnog prekida vodiča u pogonu.



Sl. 48. Dalekovod 380 kV Italija)

Stupovi moraju biti dimenzionirani tako da ni u jednom dijelu stupa naprezanje materijala ne prekoračuje propisima predviđenu dozvoljenu granicu, pri čemu kontrolu treba provesti za sve predviđene slučajevе opterećenja. Naši propisi razlikuju normalne i izvanredne slučajevе opterećenja, od kojih se neki odnose samo na zatezne stupove.

*Normalni slučajevi opterećenja* koje treba uzeti u račun kako za nosive tako i za zatezne stupove jesu ovi: a) slučaj koji uzima u obzir dodatni teret uslijed leda, pa treba istodobno uzeti u račun težine svih dijelova dalekovoda uključivo led i eventualnu rezultantu vlaka vodiča i zaštitnih užeta; b) slučaj koji uzima u obzir poprečni vjetar, pa treba računati sa svim težinama ali bez leda, uz istodobni pritisak vjetra u smjeru poprečno na trasu voda i eventualnu rezultantu vlaka vodiča i zaštitnih užeta, pri čemu se računa samo sa  $\frac{2}{3}$  punog vlaka; c) slučaj koji uzima u obzir uzdužni vjetar, pa treba računati jednako kao u slučaju b, ali s vjetrom u smjeru trase voda. Za zatezne stupove treba uzeti

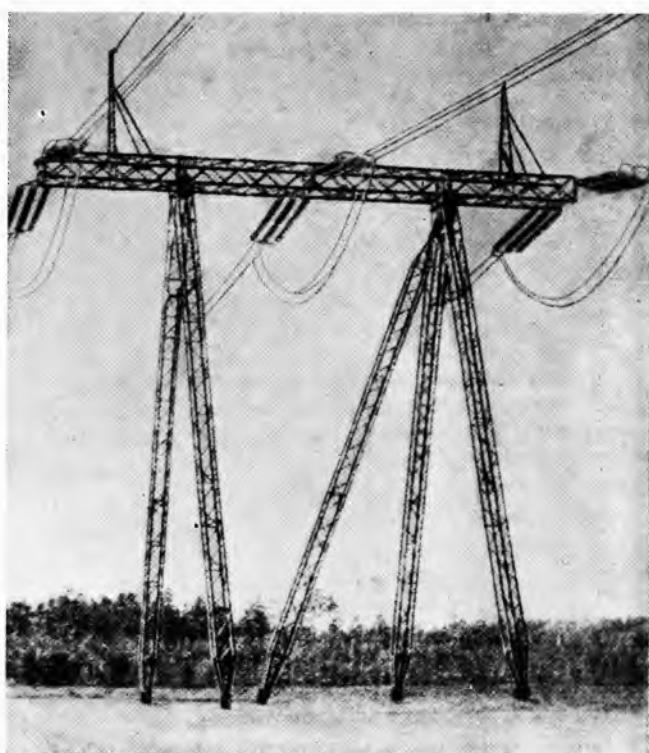


Sl. 49. Dalekovod 380 kV (Njemačka)

u račun i slučaj d) koji uzima u obzir osnovni zadatak zateznog stupa, pa osim s težinom svih dijelova dalekovoda bez leda treba računati sa  $\frac{2}{3}$  vlaka svih vodiča i zaštitnih užeta s jedne strane stupa.

*Izvanredni slučajevi opterećenja* uzimaju u obzir stanje dalekovoda u slučaju prekida vodiča. Za nosive stupove imamo slučaj e) pri kojem se uzima u račun težina svih dijelova dalekovoda i dodatnog tereta uz istodobno djelovanje  $\frac{1}{2}$  vlaka jednog vodiča, odnosno jednog zaštitnog užeta, s jedne strane stupa (računa se s otklonom izolatorskog lanca odnosno s popuštanjem veze na potpornom izolatoru). Za zatezne stupove imamo slučaj f) pri kojem se osim težine kao gore uzima puni vlak svih vodiča i zaštitnih užeta osim jednog s jedne strane stupa.

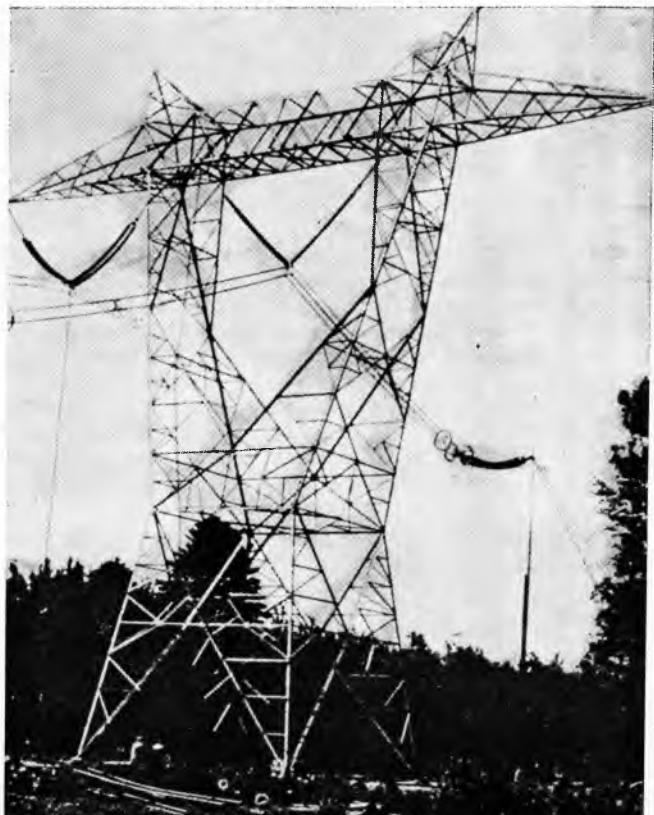
*Pritisak vjetra* na stupove računa se kao što je rečeno kod mehaničkog proračuna vodiča, jedino je koeficijent djelovanja vjetra drugačiji i zavisi od vanjskog oblika stupa. Naši propisi daju u tom pogledu detaljne podatke, pa npr. koeficijent za četverokutne stupove iznosi 1,4, za okrugle stupove 0,7 itd.



Sl. 50. Dalekovod 500 kV (SSSR)

Za razne materijale od kojih se grade stupovi dalekovoda naši propisi također daju detaljne odredbe o minimalnim dimenzijama, metodama proračuna, dozvoljenim naprezanjima posebno za normalne i posebno za izvanredne slučajevе opterećenja, itd.

**Temelji stupova.** Stupovi moraju biti dobro ukopani u zemlju. Jednostavnii drveni stupovi mogu se ukopati direktno ili im se ukop pojačava nogarima od drveta ili armiranog betona. Ako



Sl. 51. Dalekovod 700 kV (Kanada)

se čelični stupovi ukopaju direktno, ukop im se pojačava na dnu ukopa horizontalnom rešetkom izrađenom od čeličnih profilnih štapova ili od hrastovih pragova. Za čelične i armiranobetonске stupove se obično upotrebljavaju betonski temelji u obliku blokova. Temelji se izljuju u iskopanom tlu i u njih se ubetoniraju donji dijelovi stupa. Već prema obliku i konstrukciji, stup može imati temelj od jednog, dva ili četiri betonska bloka.

Primjeri izvedenih stupova i dalekovoda u raznim zemljama prikazani su na slikama 47...51.

#### PROJEKTIRANJE DALEKOVODA

*Projektni zadatak* kojim investitor naručuje izradu projekta sadrži osnovne zahtjeve i podatke za novi dalekovod. Međutim, broj tih podataka je relativno malen. Njime su svakako određeni početak i kraj dalekovoda, a po potrebi i neke određene međutačke kroz koje dalekovod mora proći, npr. radi povezivanja s budućim većim potrošačima. Zadatkom su utvrđene također osnovne karakteristike dalekovoda kao što su: napon, broj i presjek vodiča, prenošena snaga itd., a ponekad se daju projektantu i sugestije u pogledu materijala za stupove, tipa izolatora, zaštitnih užeta i drugo.

Na osnovi projektnog zadatka pristupa se izradi *projekta*. Rad na projektu obuhvaća: studij karte, pregled terena, odabiranje trase, utvrđivanje fiksnih tačaka, postavljanje piramide, geodetsko utvrđivanje simetrale, iskolčenje i tačno definiranje trase, snimanje profila, utvrđivanje položaja i visine pojedinih stupova, proračun i utvrđivanje sila, cijene pojedinih varijanata, ekonomsku analizu i, konačno, izbor najpovoljnije varijante na osnovu procjene svih faktora koji utječu na cijenu izgradnje i održavanja i na sigurnost u eksploraciji.

Karakteristično je za projekte dalekovoda da se radovi protežu često i na više stotina kilometara. Iz prednjeg se vidi da se mora velik dio posla u vezi s projektom obaviti na terenu i da upravo terenski radovi čine osnovni i najvažniji dio projekta. Zbog toga treba terenskom dijelu posla pridati veliku važnost i taj posao obaviti najsavjesnije, jer svako naknadno vršenje preinaka veoma je teško i skupo.

**Izbor trase.** Za izbor trase dalekovoda mjerodavni su određeni početak i kraj voda i eventualni zahtjevi o tome kroz koja mjesta dalekovod mora da prođe radi mogućnosti povezivanja s kasnije izgrađenim objektima. Unutar tih zahtjeva valja odabrati najpovoljniju trasu, vodeći računa o količini materijala, opsegu radova i mogućnosti transporta, pa prema tome i cijeni dalekovoda, nadalje o utjecaju munja, leda, vjetra, onečišćenju i o svemu od čega zavisi kvalitet dalekovoda u pogonu, a konačno i o mogućnosti nadzora i održavanja dalekovoda.

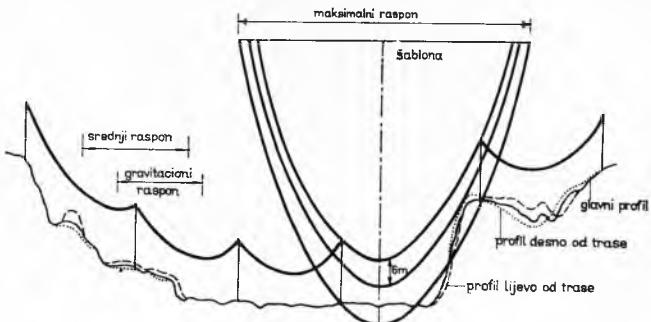
Na izbor trase utječu nadalje konfiguracija terena (ravnicišta ili brdovit teren), postojanje komunikacija (koje su potrebne radi transporta, mada im dalekovod ne smije biti preblizu), i eventualna ograničenja u raspoloživom materijalu za stupove (npr. trasa dalekovoda s betonskim stupovima zbog potrebe transportiranja velikih količina materijala ne smije ići daleko od komunikacija, a trasa stupova od aluminijskih legura može). Prilikom izbora trase mora se dakle na terenu izbjegavati sve što otežava transport, poskupljuje gradnju ili ima štetan utjecaj na dalekovod (naselja, močvare, vrijedne poljoprivredne kulture, križanja rijeka i željeznica, nepristupačne terene bez komunikacija, brda, industrijska područja sa zagadenom atmosferom itd.). Isto tako valja paziti i na štetne utjecaje koje vrši dalekovod na druge objekte, npr. na telekomunikacijske vodove.

Da bi se udovoljilo svim tim zahtjevima, trasa se vodi u lomljenoj liniji i sastavljena je od ravnih poteza dužine nekoliko kilometara (obično od jednog zateznog stupa do drugoga). Tako projektirana trasa dalekovoda prilagodit će se dobro terenu i neće biti mnogo duža od zračne linije između početka i kraja dalekovoda. Sve momente koji igraju ulogu pri izboru trase nemoguće je obuhvatiti teorijskim razmatranjima i utvrditi matematičkim proračunom, već je za takav posao potrebno i dugogodišnje iskuštovo.

Izbor trase počinje studijem najbolje raspoložive geografske karte (u nas vojne sekcije 1 : 50 000) ili avionskih fotografiskih snimaka, na temelju čega se utvrđuje glavni tok trase i eventualne varijante. Zatim dolazi pregled odabrane trase na terenu. Na te-

melju uvida u najnoviju situaciju na terenu utvrđuje se daje li odabrana trasa mogućnost za izgradnju voda. Na konačno odabranoj trasi utvrde se po potrebi i pojedine fiksne tačke, kao prelazi preko rijeke, važne kutne tačke i sl. Za pregled terena i označavanje fiksnih tačaka mogu se vrlo dobro koristiti i helikopteri. Iza toga slijedi iskolčenje trase, čime se trasa tačno definira i označi na terenu. Na markantne tačke voda, kao što su početak i kraj voda, kutne tačke i sl., postave se signali u obliku malih piramide od letava sa znakom na vrhu koji se vidi iz dovoljne daljine. Koristeći se geodetskim instrumentima utvrđuju se na terenu s pomoću tih tačaka pravci od kojih je sastavljena trasa dalekovoda. Ti se pravci na terenu označuju kolčićima zabitima u zemlju na prikladnim mjestima, npr. uz cestu, na granicama parcela i sl.

**Smještaj stupova.** Uzduž trase treba odrediti mjesto gdje će biti postavljeni stupovi. Zbog toga se najprije na terenu pomoću geodetskih instrumenata snima uzdužni profil trase, a zatim se on iscrtava u prikladnom mjerilu, npr. dužine u mjerilu 1 : 2000 a visine u mjerilu 1 : 500. Ujedno se snima i iscrtava situacija u horizontalnoj projekciji, na kojoj se označuju i pojedini objekti u blizini trase (rijeke, željeznice, ceste, kuće itd.). U brdovitom



Sl. 52. Uzdužni profil dalekovoda i šabloni s oblikom vodiča

terenu s nagibima poprečnim na smjer trase crtaju se pored glavnog profila u simetriji voda još i bočni profili, koji su toliko odmaknuti ulijevo i udesno od glavnog profila koliko su udaljeni krajnji vodiči od sredine stupa (sl. 52).

Na temelju uzdužnog profila utvrđuje se položaj pojedinih stupova i njihova visina. Pri tome moraju biti ispunjeni ovi uvjeti: a) mora postojati mogućnost postavljanja stupa na izabranom mjestu, tj. tu ne smije postojati nikakav objekt na terenu niti velika strmina i sl.; b) visina vodiča iznad tla mora svagdje biti jednakna sigurnosnoj visini ili veća od nje; c) nijedan raspon (aako se radi o strmom rasponu, onda njemu odgovarajući totalni raspon) ne smije biti veći od graničnog raspona.

Osim toga treba težiti za tim da u što većoj mjeri bude ispunjeno ovo: a) da stupovi budu smješteni na pogodnom mjestu, npr. na granicama parcela; b) da se rasponi mnogo ne razlikuju po veličini, jer inače dolazi do uzdužnih sila koje djeluju na nosive stupove; c) da rasponi ne budu veoma strmi, kako naprezanja u ovjesištu ne bi bila velika; d) da visine stupova budu podjednake i što bliže normalnoj visini stupa koja je izabrana kao najekonomičnija; e) da ukupna cijena stupova bude što manja.

Taj se zadatak obično rješava pomoću celluloidne šablone u kojoj je izrezan oblik vodiča pri maksimalnom provjesu (sl. 52). Na šabloni se obično nalazi i druga isto takva krivulja pomaknuta za iznos sigurnosne visine, i treća krivulja koja odgovara normalnoj visini stupa. Pomoću šablone može se ucrtati oblik vodiča, kontrolirati da nije preblizu zemlji i naći gdje bi trebalo smjestiti stup ako ima normalnu visinu. Pokušavanjem može se naći zadovoljavajuće rješenje. Za svaki potez između fiksnih tačaka, a to su najčešće kutni stupovi, treba izraditi nekoliko varijanata i konačno usvojiti najjeftiniju.

U profil se ucrtaju ne samo stupovi nego i vodiči, a osim toga se unesu i ostali potrebni podaci, tako da profil dalekovoda sadrži sve osnovne podatke potrebne za daljnju razradu projekta i gradnju dalekovoda. Iz profila određuje se ne samo položaj i visina pojedinih stupova nego i stvarni raspon između stupa i stupa, srednji raspon za svaki stup i konačno tzv. gravitacioni raspon, a to su podaci koji služe za proračun stupova (sl. 52).

O stvarnom rasponu zavisi veličina provjesa pa prema tome i razmak između vodiča i prema zaštitnim užetima. Srednji raspon je suma polovinā susjednih raspona, on pomnožen s pritiskom vjetra po metru dužine daje silu koja djeluje na stup zbog pritiska vjetra na vodič. Gravitacioni raspon je udaljenost najnižih tačaka vodiča s jedne i druge strane stupa; on pomnožen s težinom po metru vodiča daje vertikalnu silu kojom vodič djeluje na stup.

Na temelju podataka iz uzdužnog profila vrše se svi potrebnii proračuni za pojedine sastavne dijelove i konačno predmjer materijala i radova s predračunom troškova za izgradnju dalekovoda. Umjesto snimanja na terenu pomoću klasičnih geodetskih instrumenata mogu se primijeniti fotogrametrijske i stereofotogrametrijske metode za obradu avionskih snimaka. Smještaj stupova u uzdužnom profilu trase može se dobiti i proračunom pomoću elektroničkih digitalnih računala.

#### GRADNJA I MONTAŽA DALEKOVODA

Gradnja i montaža dalekovoda obuhvaća niz različitih radova koji se mogu svrstati u više faza i to: pripremne radove na terenu, radove u vezi s izradom, dopremom i podizanjem stupova, montažu izolatora i dalekovoda i, konačno, završne radove.

**Gradnja dalekovoda.** Gradnja dugih dalekovoda zahtijeva s obzirom na specifične uvjete rada pažljivu pripremu i dobru organizaciju toka gradnje i montaže. Obično se ukupna dužina dalekovoda podijeli na dionice duge nekoliko desetaka kilometara, pa se gradnja i montaža organizira posebno za svaku dionicu. Tipičan način organizacije jest podjela radova u pojedine faze koje vremenski slijede jedna iza druge, što naročito dolazi do izražaja u gradevnom dijelu posla, tj. pri izradi temelja i stupova. Pojedine faze rada treba dakako prilagoditi prilikama na terenu, materijalu i načinu gradnje stupova itd. Počinje se s prvom fazom rada na jednom stupnom mjestu, zatim se na slijedećem stupnom mjestu započne s prvom fazom rada, a na prvom stupnom mjestu se istodobno radi druga faza. Iza toga se istodobno radi prva faza kod trećeg stupa, druga faza kod drugog stupa i treća faza kod prvog stupa. Na taj način se nastavlja rad, i gradnja jednolikou teče duž trase dalekovoda.

U okviru pripremnih radova vrši se detaljno iskolčenje stupnih mjesta, eventualno krčenje šuma i organizacija transporta (npr. dotjeravanje pristupnih puteva i sl.). Za transport materijala se koriste različita sredstva: u normalnim prilikama željeznice, kamioni i specijalna vozila, kao što su posebne prikolice za stupove, gusjeničari, cisterne i sl. Na teškom terenu i u posebnim prilikama upotrebljavaju se bilo primitivna sredstva: životinje i ljudi, bilo mehanizirana sredstva: specijalne montažne žičare ili eventualno helikopteri.

Za ukop stupova jame se najčešće kopaju ručno, a u kamenom terenu se po potrebi vrši i miniranje. Ako se stup ukopa direktno, posebna pažnja mora se posvetiti zatrpanju jame i nabijanju zemlje. Pri izradi betonskih temelja može iskopana jama poslužiti i kao oplata za temelj. Ako se stup usadije u temelj, treba predvidjeti i posebnu oplatu za rupu u temelju. Za ukop jednostavnih drvenih stupova mogu se upotrijebiti mehanizirana svrdla (sl. 53).



Sl. 53. Srvdlo za kopanje jama



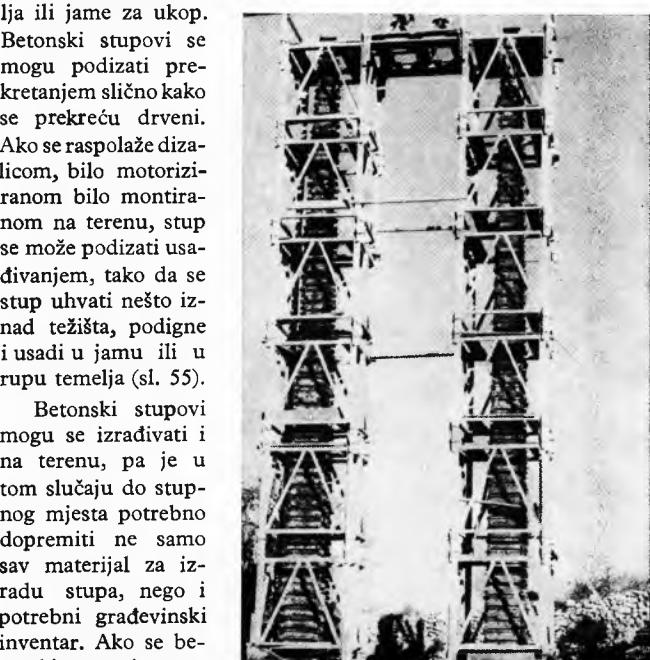
Sl. 54. Podizanje drvenog stupa prekretanjem

Drveni stupovi se impregniraju radi zaštite od truljenja, insekata i gljivica u posebnim postrojenjima za impregnaciju (v. Drvo, kemijska prerada), a za sastavljanje na terenu se obično pripremaju u privremenim terenskim radionicama. Izrađeni dijelovi dopremaju se na teren i od njih se sastavlja stup u horizontalnom položaju tik uz iskopanu jamu tako da bude odmah spreman za podizanje. Podizanje se najčešće vrši prekretanjem oko najniže tačke stupa na taj način da se gornji dio stupa podigne pomoću vitla s užetom koje je prebačeno preko pomoćnog, obično dvojnožnog stupa za dizanje (sl. 54). Pri podizanju osigurava se stup od pada pomoću usirednih užeta, koja se po potrebi zatežu ili popuštaju. Betonski stupovi koji su izrađeni u tvornici dopremaju se na teren specijalnim prikljacima. Na terenu je redovito

potrebno stup sastaviti, npr. sastaviti portal ili, u najmanju ruku, montirati konzole. To se radi u horizontalnom položaju u blizini pripremljenog temelja ili jame za ukop.

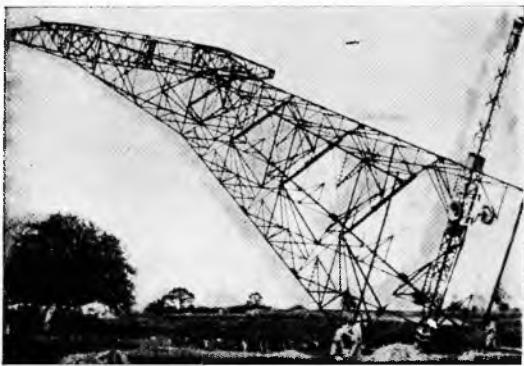
Betonski stupovi se mogu podizati prekretanjem slično kako se prekreću drveni. Ako se raspolaže dizalicom, bilo motoriziranom bilo montiranim na terenu, stup se može podizati usadijanjem, tako da se stup uhvati nešto iznad težista, podigne i usadi u jamu ili u rupu temelja (sl. 55).

Betonski stupovi mogu se izradivati i na terenu, pa je u tom slučaju do stupnog mjesta potrebno dopremiti ne samo sav materijal za izradu stupa, nego i potrebni građevinski inventar. Ako se betonski stupovi na terenu izrađuju u hori-



Sl. 55. Podizanje betonskog stupa usadijanjem

zontalnom položaju, što je rijetko, oni se podiže na način koji je opisan za drvene stupove. Češće se stupovi izrađuju u definitivnom vertikalnom položaju, što je neophodno ako su preteški za dizanje. Tada se najprije postavlja skela, unutar nje se sastavi čelična armatura a oko nje postavlja oplata u koju se lijeva beton (sl. 56).



Sl. 57. Podizanje čeličnog stupa prekretanjem

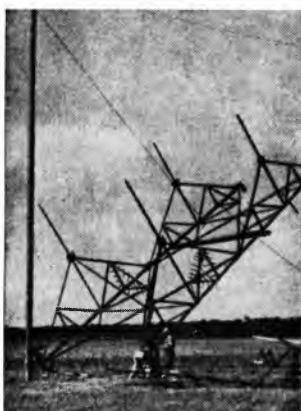
Čelični stupovi se izrađuju u tvornicama ili u posebnim radionicama, a na teren se dopremaju prethodno montirani njihovi dijelovi ili čak nemontirani pojedini štapovi. Stup se na terenu sastavlja u horizontalnom položaju, a podiže se bilo prekretnjem oko zglobova što ih sačinjavaju donji krajevi stupa i nastavci ubetonirani u temelj (sl. 57), bilo usadišvanjem pomoću dizalice (sl. 58). Čelični stupovi mogu se sastavljati i u vertikalnom položaju. To se može vršiti u dijelovima (etažama, sl. 59) sastavljanjem pojedinih zidova stupa (sl. 60) ili sastavljanjem pojedinih štapova (sl. 61). Pri tome se za podizanje daljnjih komada koristi montažna igla koja se pričvršćuje na već izgrađeni dio stupa.



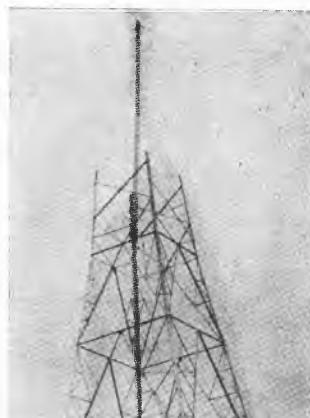
Sl. 58. Podizanje čeličnog trupa usadišvanjem



Sl. 59. Podizanje čeličnog stupa u dijelovima

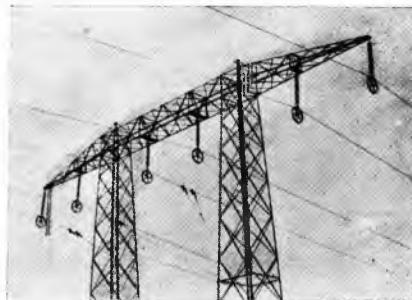


Sl. 60. Podizanje čeličnog stupa sastavljanjem stijena



Sl. 61. Podizanje čeličnog stupa sastavljanjem štapova

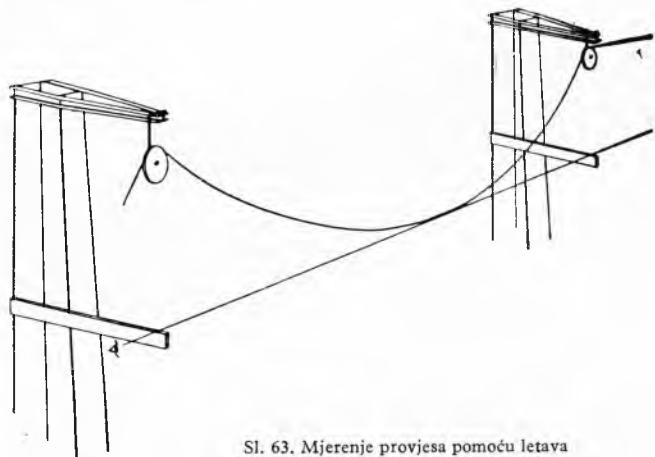
**Montaža dalekovoda** obuhvaća radove na električnom dijelu dalekovoda, a to su izolatori, vodiči, zaštitna užeta i pripadni pribor. *Izolatorski lanci* montiraju se tako da se sastave na tlu ispod stupa, a zatim pomoću užeta podignu i pričvrste na stup. U nekim slučajevima, kad se stupovi sastavljaju na terenu u horizontalnom položaju, mogu se odmah na njih pričvrstiti izolatorski lanci i podići zajedno sa stupom. *Vodiči* (slično vrijedi i za zaštitna užeta) montiraju se po zateznim poljima između dva zatezna stupa. Vodiči se dopreme na teren namotani na bubnjeve. Najprije se vrši razvlačenje vodiča; u tu svrhu bubanj se s vodičem postavi na pogodne nogare u blizini zateznog stupa. Vodič se odmotava s bubnja i razvlači prema slijedećem zateznom stupu preko kotura koji su obešeni na nosivim stupovima (sl. 62). Time se sprečava oštećenje vodiča zbog struganja po tlu. Vodič se razvlače jedan po jedan ili se razvlači više vodiča u isto vrijeme, i to pomoću traktora ili pomoću motornog vitla s pomoćnim čeličnim užetom, koje se prethodno razvuče i objesi na koture. Da vodič ne bi strugao po zemlji, potrebno je kočiti bubanj s kojeg se odmotava vodič. To se postiže sasvim jednostavnim, direktno na bubnju



Sl. 62. Koturi na nosivom stupu za razvlačenje vodiča

učvršćenim kočnicama ili posebnim napravama za kočenje vodiča, pri čemu se istodobno mijere sile zatezanja. Na teškom terenu ili u posebnim slučajevima, za razvlačenje vodiča upotrebljavaju se helikopteri. Ukoliko su proizvedene dužine pojedinih užeta manje od dužine zateznog polja, koja može iznositi i do 5 km, po isteku svakog bubnja užeta se spajaju.

Pošto su vodiči razvučeni, vrši se zatezanje vodiča. Vodič se s jedne strane učvrsti u zateznu stezalku, a s druge strane zateže pomoću vitla. Sila zatezanja mora biti u skladu s podacima mehaničkog proračuna vodiča i odgovarati stanju (temperaturi) kod



Sl. 63. Mjerenje provjesa pomoću letava

kojeg se vrši montaža. Zbog toga se mjeri temperatura vodiča i utvrđuje njegovo stanje prilikom montaže. Ispravno zatezanje kontrolira se bilo mjerjenjem provjesa bilo mjerjenjem sile u vodiču. Provjes se najčešće mjeri pomoću mjernih letava (sl. 63) koje se učvrstaju na dva susjedna stupa na visini potrebnog provjesa. Viziranjem od jedne letve na drugu može se postići da najniža tačka vodiča dođe u pravac vizure. Za mjerjenje provjesa mogu se koristiti i geodetski instrumenti. Ako se ispravnost zatezanja kontro-

lira mjeranjem sile u vodiču, mjerjenje se vrši pomoću za to priлагodenih dinamometara (sl. 64).



Sl. 64. Dinamometar za mjerjenje sile u vodiču

Kad su vodiči ispravno zategnuti, oni se učvršćuju u stezaljke, i to najprije u zateznu stezaljku s druge strane, a zatim u nosive stezaljke. Istovremeno se po potrebi montiraju prutovi ili prigušivači vibracija. Ako dalekovod ima snopove vodiča, nakon nekoliko dana dotjera se njihovo zatezanje, a zatim se montiraju odstojnici. Budući da se odstojnici mogu montirati tek nakon



Sl. 65. Kolica za montažu odstojnika

zatezanja i učvršćenja vodiča, a montiraju se na nekoliko mesta unutar raspona, to se za pristup do mjesta gdje se montira odstojnik upotrebljavaju kolica objesena na same vodiče (sl. 65).

**Završni radovi gradnje i montaže dalekovoda** obuhvaćaju sve što je još potrebno učiniti prije nego što se dalekovod stavi u pogon, kao npr.: eventualno premazivanje stupova, izrada uzemljenja, postavljanje pločica za upozorenje i za numeraciju stupova i različni sitni poslovi, već prema izvedbi dalekovoda. Nakon posljednjeg pregleda najprije se grubo izmjeri izolacija voda, a zatim se vod probno stavi pod napon i optereti strujom. Prije definitivnog stavljanja u pogon korisno je izmjeriti električne konstante dalekovoda.

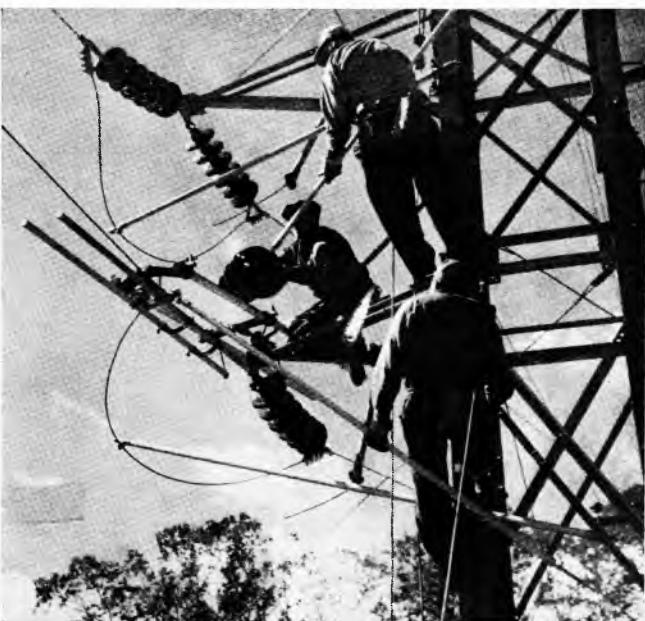
#### POGON DALEKOVODA

Pogon dalekovoda je jednostavan i ne zahtijeva nikakve posebne manipulacije. On se svodi samo na nadzor radi pronađenja eventualnih oštećenja, na redovna ispitivanja i održavanja, kao i na popravak pronadjenih oštećenja.

Oštećenja mogu nastati na svim dijelovima dalekovoda. Do oštećenja vodiča može doći iz više razloga: prilikom kratkog spoja dolazi uslijed pojave električnog luka do pregaranja i termičkog oštećenja (užarenja) vodiča; odron kamenja i padanje stabala mogu također izazvati mehanička oštećenja i prekide vodiča; nepredviđeno debeli sloj leda koji se stvara na vodičima može u kombinaciji s event. pojačanim vjetrom dovesti do trajnog neelastičnog produženja vodiča ili čak do njegova prekida; kočnica mogu i vibracije uzrokovane vjetrom zamoriti materijal i dovesti do djelomičnog ili potpunog prekida vodiča.

Medu najčešća oštećenja na izolatorima idu: mehanička oštećenja zbog udaraca kamenja i drugih tijela, električni proboci jednog ili više članaka izolatorskog lanca, termička oštećenja uslijed pojave električnog luka i oštećenja površine izolatora zbog preskoka duž njegove površine, što se dešava obično zbog nečistoća. Na stupovima može doći do loma pojedinih dijelova ili cijelog stupa, do propuštanja ukopa, rđanja čeličnih dijelova ili truljenja drvenih. Kod uzemljenja može također doći do rđanja i do prekida. Ova oštećenja većinom ne dovode do prekida pogona, ali predstavljaju stalnu opasnost da uslijed njih kod prve nepovoljne prilike dalekovod ispadne iz pogona na kraće ili duže vrijeme.

**Redovno održavanje dalekovoda** obuhvaća u prvom redu redovni nadzor, kojemu je svrha da se uoče vidljiva oštećenja na dalekovodu. *Nadzor* se može vršiti jednostavnim obilaskom duž trase, ali se za otkrivanje težih oštećenja mogu veoma dobro upotrijebiti helikopteri i avioni. Za utvrđivanje mesta na kome je dalekovod oštećen predviđeni su u podstanicama često specijalni radarski uređaji. *Redovnim ispitivanjima* je svrha da se utvrde oštećenja koja nisu izravno vidljiva okom. Tako se npr. redovno mjeri otpor uzemljenja pojedinih stupova i ispituju kapasti izolatori da nije koji članak u izolatorskom lancu probit. Za održavanje



Sl. 66. Rad pod naponom s izoliranim alatom

dalekovoda potrebni su i različni *periodički radovi*, kao npr. premazivanje čeličnih stupova, čišćenje izolatora ili eventualno i njihovo premazivanje silikonskim mastima.

*Popravi* na dalekovodu obuhvaćaju dovodenje u red svega što je na dalekovodu oštećeno. Ako je uslijed oštećenja došlo do



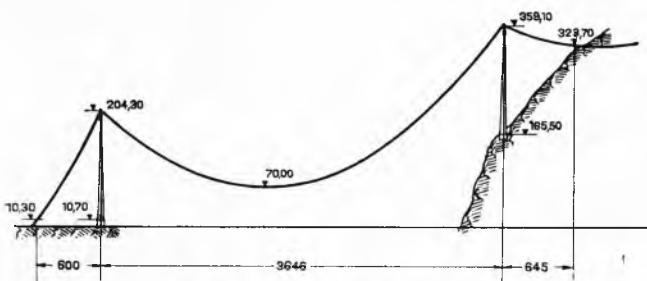
Sl. 67. Rad pod naponom u izoliranoj košari

prekida pogona, popravak treba izvršiti što prije i zatim dalekovod staviti u pogon. Ako je oštećenje manje i nije dovelo do prekida pogona, popravci se planiraju za najzgodniji moment. U većini zemalja takvi popravci se vrše na dalekovodu izvan pogona, pa treba čekati mogućnost za iskapčanje dalekovoda, npr. nedjelju prije podne kad je opterećenje manje. U nekim zemljama se radovi na dalekovodima vrše i pod naponom za vrijeme pogona (npr. USA), ali i tu treba čekati na povoljne atmosferske prilike. Postoje dvije tehnike rada pod naponom: jedna kod koje je monter izoliran od vodiča i radi s alatom koji se nalazi na kraju duge izolacione motke (sl. 66) i druga kod koje je monter u direktnom dodiru s vodičem pod naponom, ali je izoliran od zemlje jer se nalazi u košari na kraju izolacione poluge (sl. 67).

#### POSEBNE IZVEDBE DALEKOVODA

U većini se slučajeva dalekovodi izgrađuju na uobičajeni način uz primjenu ustaljenih standardnih izvedaba stupova, vodiča i izolatorskih lanaca. Povremeno se ipak javlja potreba za posebnim izvedbama, naročito u slučajevima veoma velikih ili naročito strmih raspona. Neke od tih posebnih izvedaba bit će ovdje ukratko prikazane.

*Prelaz dalekovoda preko Mesinskog tjesnaca* vjerojatno je najpoznatiji veliki raspon u svijetu. On je nastao iz potrebe da se elektroenergetski sistem Sicilije poveže pomoću voda 220 kV s električnom mrežom na kopnu Italije. Zbog jakih morskih struja na tom mjestu odbačena je varijanta veze pomoću podmorskog energetskog kabela i izgrađen je nadzemni dalekovod. Udaljenost



Sl. 68. Profil prelaza Mesinskog tjesnaca

Sicilije od kopna iznosi preko 3 km, ali je problem bio otežan još i zahtjevom da se zbog pomorskog saobraćaja vodiči podignu 70 metara iznad morske površine. Za izvedbu ovog prelaza iskoristena je strma obala kopna Italije, na kojoj je stup postavljen na visini od 165,50 m nad morem, a raspon do drugog stupa na obali Sicilije iznosi 3646 m (sl. 68). Stupovi su izgrađeni za 6 vodiča (dvostruki vod), ali je zasada montirano samo 4 vodiča, od čega jedan služi kao rezervni. Sva četiri vodiča su na istoj visini na razmaku od 25 m jedan od drugog, a visina stupova do njihovog ovjesišta iznosi  $\sim 200$  m. Stupovi su izvedeni kao nosivi stupovi, a vodiči su zategnuti i učvršćeni na tačkama koje leže  $\sim 600$  m dalje, nevisoko iznad zemlje. Vodiči, koji se sastoje pretežno od čeličnih žica i nešto aluminijskih, nisu fiksirani s obje strane raspona nego samo sa strane kopna. Sa strane Sicilije su zategnuti pomoću utega koji se nalaze u posebnoj građevini. Time je osiguran uvjek isti vlasti vodič, pa je time povoljnije riješen problem uskladjenja provjesa i naprezanja. Za ovješenje vodiča upotrijebjeni su višestruki izolatorski lanci sastavljeni od kapastih izolatora. Na nosivim stupovima svaki vodič pričvršćen je pomoću 8, a zategnut pomoću 12 izolatorskih lanaca.

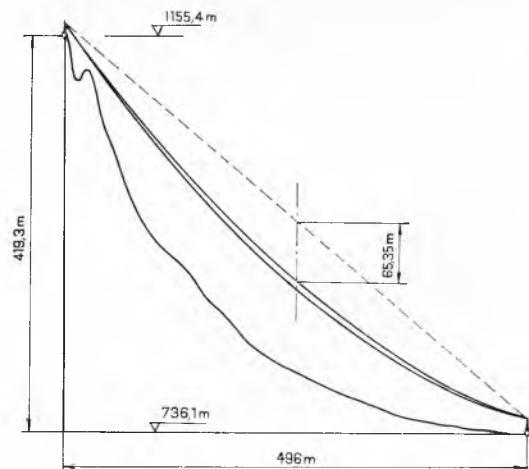
Najveći raspon na svijetu iznosi 4880 metara i nalazi se na *prelazu dalekovoda 60 kV iznad Sognefjorda* u Norveškoj. Najmanja visina vodiča iznad mora iznosi 61 m. Iako je raspon tako velik, nije bilo pri izgradnji naročitih poteškoća zahvaljujući veoma strmim obalama fjorda, što je omogućilo visoko zavješenje vodiča bez upotrebe visokih stupova. Prelaz ima 4 čelična vodiča presjeka 300 mm<sup>2</sup>, od kojih jedan služi kao rezervni. Izolacija je izvedena za 150 kV sa 6 izolatorskih lanaca za svaki vodič, koji su upotrijebjeni kao zatezni lanci. Visina ovjesišta iznad najniže tačke vodiča na jednoj strani fjorda iznosi 720 m, a na drugoj strani 420 m.



Sl. 69. Prelaz preko Sognefjorda u Norveškoj

Stupovi su izrađeni od armiranog betona a visina im je samo 10 m, stoga je za svaki vodič izgrađen posebni stup (sl. 69).

*Veliči raspon ispod Komne* je jedan primjer posebne izvedbe dalekovoda u nas, pa iako je taj raspon razmjerno skroman, ipak je interesantan za naše prilike. To je dio voda 10 kV koji se iz doline Bohinjskog jezera penje na Komnu. Pri tome je trebalo premostiti raspon s horizontalnim razmakom 496 m i visinskom razlikom 419 m (sl. 70), pri čemu poteškoće nastaju prvenstveno zbog velike visinske razlike. Kao vodič je odabранo čelično uže 50 mm<sup>2</sup> s najvećim naprezanjem u gornjem ovješištu 32 kp/mm<sup>2</sup>, i to pri dvostrukom dodatnom teretu uslijed leda. Tome odgovara kod +10 °C provjes od 65 m, što ujedno zahtijeva razmake vodiča od 14 m. Stupovi su izgrađeni s horizontalnim rasporedom



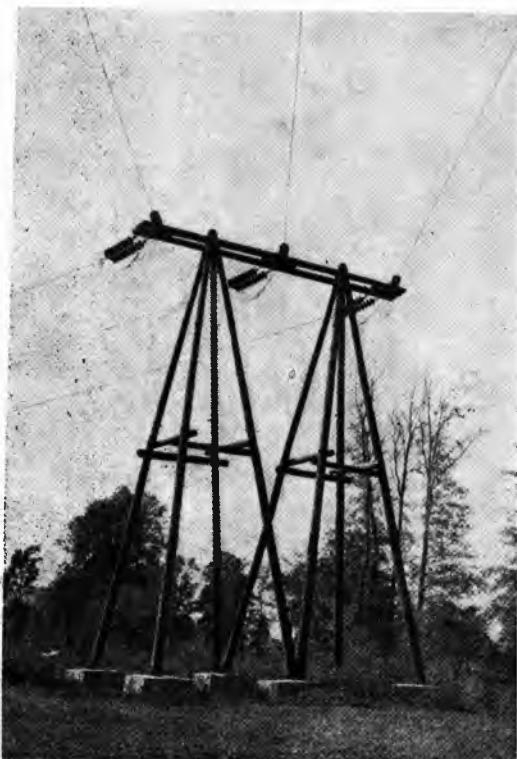
Sl. 70. Profil raspona ispod Komne

ovjesišta na razmaku od 7 m, a vanjski vodiči su manje zategnuti i imaju toliko veći provjes da se postigne potrebiti razmak između vodiča.

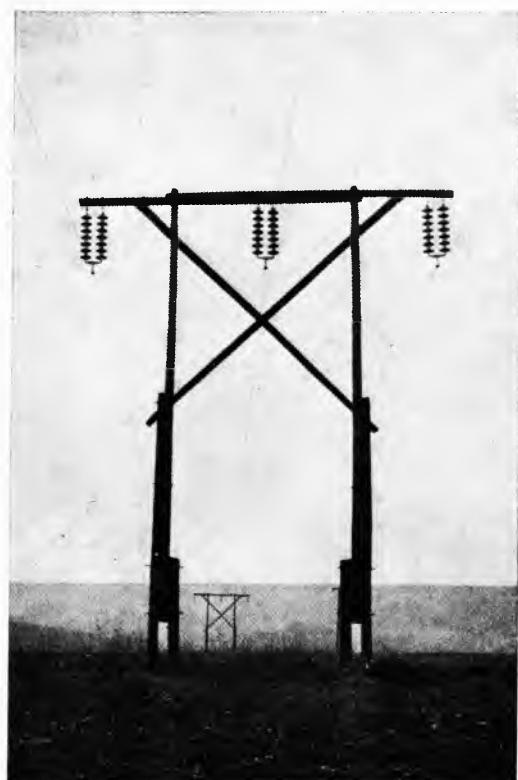
#### DALEKOVODI U JUGOSLAVIJI

Dalekovodna mreža Jugoslavije bila je prije drugog svjetskog rata nerazgranata, a po upotrijebljenim naponima nije imala neko naročito značenje. Najviši napon bio je 80 kV, i to samo na jednom vodu (Fala—Laško). Osim toga postojalo je još nešto vodova od 60 kV i 50 kV, sve ostalo bili su vodovi sa naponima do 30 kV. Pri tome je bio u upotrebi razmjerno velik broj različitih napona.

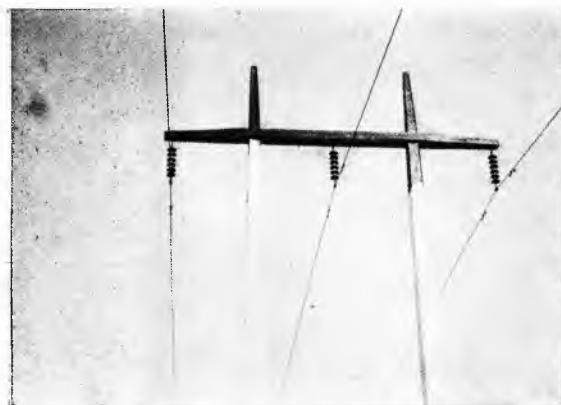
Nakon oslobođenja, iza perioda obnove, prišlo se sistematskoj izgradnji dalekovodne mreže, te je izgradnja prvenstveno bila



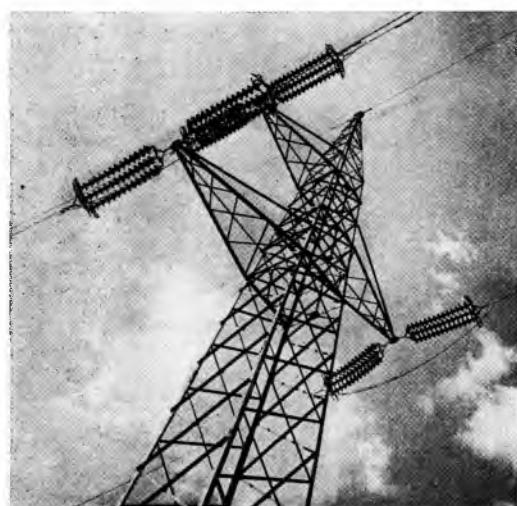
Sl. 71. Drveni zatezni stup 110 kV



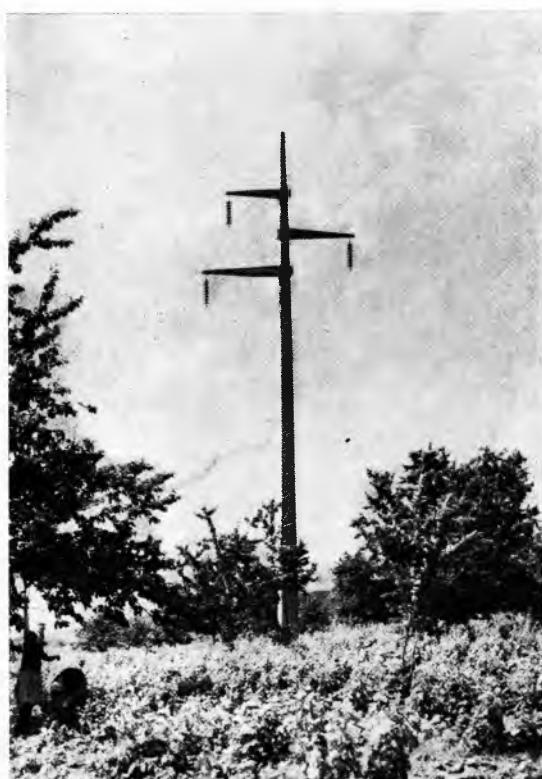
Sl. 74. Drveni nosivi stup 110 kV



Sl. 72. Betonski nosivi stup 110 kV (portal)



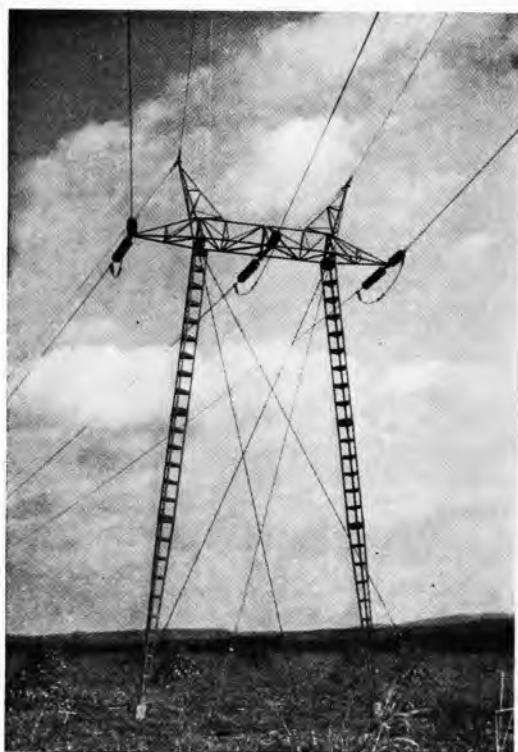
Sl. 73. Čelični zatezni stup 220 kV



Sl. 75. Betonski nosivi stup 110 kV (jela)

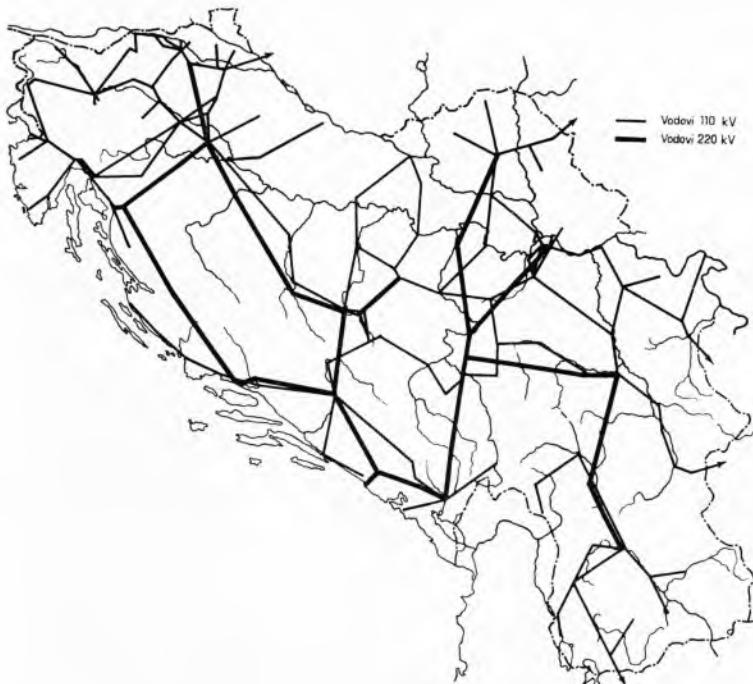
orientirana na izgradnju vodova s naponom 10, 35 i 110 kV. Vodovi koji su dotada radili s drugačijim naponom nastojali su se prilagoditi za pogon s jednim od ova tri napona. Najveća pažnja posvećena je izgradnji dalekovoda od 110 kV, jer je na tom naponskom nivou trebalo stvoriti jedinstveni i čvrsti elektroenergetski sistem zemlje.

Dalekovodi 110 kV u Jugoslaviji gradili su se u početku većim dijelom s bakrenim vodičima presjeka 95 ili 150 mm<sup>2</sup>, a kasnije



Sl. 76. Čelični zatezni stup 110 kV sa sidrima

se sve više prelazilo na vodiče od alučela s presjekom 150/25 i 240/40 mm<sup>2</sup>. To, dakako, nisu bili jedini upotrijebljeni vodiči; treba npr. spomenuti vodiče od čistog aluminija s presjekom 500 mm<sup>2</sup>. Za izolaciju upotrebljavane su u početku sve tri vrste porculanskih izolatora: kapasti, masivni i štapni, a kasnije se prešlo isključivo na kapaste porculanske izolatore. Stupovi su u početku bili od armiranog betona, radi uštede na deficitarnom profilnom čeliku. Pojavile su se mnoge različite konstrukcije takvih stupova, ali se malo njih duže održalo. Nakon toga je slijedio kraći period upotrebe drvenih stupova, dok se konačno nije prešlo na čelične stupove. I tu je bilo pokušaja s posebnim izvedbama, pa su neki dalekovodi izgrađeni na stupovima od čeličnih cijevi ispunjenih betonom, no konačno su osvojile teren normalne čelične rešet-



Sl. 77. Geografska karta dalekovoda u Jugoslaviji 1966 godine

kaste konstrukcije. Posljednjih godina uveli su se i usidreni čelični rešetkasti stupovi, koji daju izvjesnu uštedu na količini materijala.

Dalekovodi 220 kV pojavili su se u nas prvi put 1957 godine, a danas već predstavljaju povezanu mrežu preko čitave Jugoslavije. Za njih su prvenstveno upotrijebljeni vodiči od alučela s presjekom 360/60 mm<sup>2</sup>, ali ima i dalekovoda sa snopovima koji sadrže po 2 vodiča od alučela s presjekom 240/40 mm<sup>2</sup>. Izolatorski lanci su sastavljeni uglavnom od porculanskih kapastih izolatora, ali ima i staklenih kapastih izolatora (dalekovod Split-Zagreb). Stupovi su najvećim dijelom čelične rešetkaste konstrukcije oblika jednostrukih jela, a neki dalekovodi (u Srbiji) građeni su s usidrenim čeličnim stupovima.

Elektroenergetska veza sa susjednim zemljama ostvaruje se u nas na nivou 110 kV.

Krajem 1966 bila je u Jugoslaviji situacija ova: vodova 110 kV bilo je ~7000 km, vodova 220 kV ~2500 km, a već se projektiraju i prvi vodovi od 400 kV za prenos električne energije iz hidrocentralne Đerdap.

Tipične izvedbe dalekovoda 110 i 220 kV u nas prikazane su na slikama 71...76.

Geografska karta vodova 110 kV i 220 kV prikazana je na sl. 77.

#### TROŠKOVI IZGRADNJE DALEKOVODA

Troškovi izgradnje dalekovoda zavise od napona, od broja vodiča, njihovog presjeka i materijala od kojeg su izvedeni, od broja zaštitnih užeta i njihove izvedbe, od materijala i oblika stupova, od karakteristika terena. Mogu se podijeliti na dvije glavne grupe: gradevne troškove i montažne troškove. No osim tih troškova, koji su direktno povezani za dalekovod, postoji i grupa troškova koji su vezani za druge objekte, ali su neophodni prilikom izgradnje dalekovoda.

Ovdje će biti navedeni troškovi izgradnje dalekovoda 110 i 220 kV u izvedbi kako se danas grade u Jugoslaviji i sa cijenama prema stanju krajem 1966. godine. Za sve ove dalekovode pretpostavljeno je da imaju čelične rešetkaste stupove (oblik jela) s jednim zaštitnim užetom na vrhu. Što se tiče terena pretpostavljeno je da dalekovod prolazi kroz normalni, laki ravničasti teren. Grupe gradevnih i montažnih troškova razbiti su na nekoliko faza radi boljeg uvida u njihov udio u ukupnim troškovima izgradnje. Troškovi za dalekovode 110 kV prikazani su u tablici 9, a troškovi za dalekovode 220 kV u tablici 10.

U tablicama prikazani su troškovi materijala i pojedinih faza radova. Kod gradevnih troškova, pripremno-završni radovi sadrže iskolčenje stupova, krčenje i eventualnu pripremu terena za

transport; izrada temelja, sadrži kopanje jama i betoniranje; izrada stupova, sadrži materijal i izradu u tvornici ili radionici; transport i podizanje odnosi se na transport materijala do mesta gradnje i podizanje stupova; izrada uzemljenja, sadrži kopanje jama i polaganje uzemljivača. Kod montažnih radova, pripremno-završni radovi sadrže pripremu materijala za montažu i na kraju pregled i konačno dotjerivanje uz potrebna ispitivanja; montaža izolatorskih lanaca, sadrži sastavljanje, podizanje i pričvršćenje na stupove; montaža užeta sadrži razvlačenje, zatezanje i pričvršćenje vodiča i zaštitnih užeta.

Cijene koje su ovdje dane odnose se na normalne klimatske prilike i normalni ravničasti teren. Kad su klimatski uvjeti i teren teži, bit će troškovi izgradnje veći. Tako, npr., ako dalekovod prolazi kroz brdovit teren s pritiskom vjetra 90 kp/m<sup>2</sup> i ledom 1,6 puta većim od normalnog, navedene troškove treba povećati otprilike za 15%: to povećavanje se najvećim dijelom odnosi na troškove za gradevni dio.

Troškovi koji nisu direktno vezani za sam dalekovod sadrže: odštetu za zemljište; radove na drugim objektima koje treba zaštiti od utjecaja dalekovoda, kao što je premještanje dojavnih vodova, pregradnja nadzemnih dojavnih vodova u kabelske, poduzimanje zaštitnih mjera na drugim objektima itd. Ti troškovi zavise od specifičnih uvjeta na koje

Tablica 9  
TROŠKOVI IZGRADNJE DALEKOVODA 110 kV  
jednostruktih i dvostruktih, Nd/km (1966)

Vodiči (alučel):	3 × 150/25 1 × 50	3 × 240/40 1 × 50	6 × 240/40 1 × 50
<i>Gradevni troškovi:</i>			
pripremno-završni radovi	3 500	3 500	3 500
izrada temelja	21 000	28 000	36 500
izrada stupova	28 000	31 500	55 500
transport, podizanje	11 000	13 000	22 500
izrada uzemljenja	3 500	3 500	3 500
ukupno	67 000	79 500	121 500
<i>Montažni troškovi:</i>			
pripremno-završni radovi	3 000	3 000	3 000
montaža izolatora	8 500	8 500	17 000
montaža užeta	36 500	47 000	92 000
ukupno	48 000	58 500	112 000
Sveukupno	115 000	138 000	233 500

Tablica 10  
TROŠKOVI IZGRADNJE DALEKOVODA 220 kV  
s jednostrukim vodičima i vodičima u snopu, Nd/km (1966)

Vodiči (alučel):	3 × 360/60 1 × 95	3 × 2 × 240/40 1 × 95
<i>Gradevni troškovi:</i>		
pripremno-završni radovi	3 500	3 500
izrada temelja	33 000	35 000
izrada stupova	44 500	54 500
transport, podizanje	21 000	25 000
izrada uzemljenja	3 500	3 500
ukupno	105 500	121 500
<i>Montažni troškovi:</i>		
pripremno-završni radovi	3 000	3 000
montaža izolatora	13 000	14 000
montaža užeta	66 500	85 500
ukupno	82 500	102 500
Sveukupno	188 000	224 000

se nailazi prilikom projektiranja i gradnje dalekovoda, a ne zavise od izvedbe dalekovoda.

#### PROPSI ZA DALEKOVODE

Sve industrijski razvijene zemlje imaju svoje propise za dalekovode, ali se propisi različitih zemalja među sobom prilično razlikuju. Razlike postoje u prvom redu u tome u kojoj su mjeri ti propisi obaveznici: to mogu biti preporuke, ili propisi stručnih udruženja, ili zakonom propisane odredbe. Nadalje se propisi mnogo razlikuju po tome koliko široko obuhvaćaju problematiku gradnje, pa eventualno i održavanja dalekovoda. Konačno i tretiranje istog problema može u raznim propisima biti prilično različito, što uostalom može zavisiti od specifičnih prilika (npr. odredbe o dodatnom teretu uslijed leda). Ipak se može reći da uglavnom svi propisi daju potrebne odredbe u pogledu sigurnosti ljudi i okoline dalekovoda. Propisi većine zemalja vode računa i o sigurnosti pogona i sigurnosti samog dalekovoda. Neki propisi sadrže i odredbe koje se odnose na ekonomičnost i na eventualnu štednju deficitarnih vrsta materijala.

Osnovni propisi za dalekovode u Jugoslaviji jesu »Tehnički propisi za gradnju nadzemnih vodova jake struje«, Sl. list FNRJ 24/1960. Ti naši propisi veoma široko i detaljno obuhvaćaju problematiku u pogledu gradnje dalekovoda i to sa stanovišta sigurnosti ljudi i okoline, sigurnosti pogona i samih dalekovoda. Donošenjem tih propisa stavljeni su van snage do tada važeći privremeni propisi iz 1949 i tehnički propisi za fundiranje stupova iz 1950. Osim toga se i u »Tehničkim propisima za izvođenje postrojenja jake struje za pogonski napon iznad 1000 V«, Sl. list FNRJ 6/1957, nalaze i neke odredbe koje se tiču dalekovoda.

U vezi odnosa dalekovoda prema drugim objektima na terenu u nas su na snazi »Tehnički propisi za gradnje električnih vodova na mjestima ukrštanja sa željezničkim prugama«, Sl. list FNRJ

68/1950, i propisi »Zaštita vodova elektroveza od električnih vodova«, izdanje Glavne direkcije PTT, Beograd 1952. Ti se propisi, međutim, smatraju u izvjesnoj mjeri zastarjelima, pa se predviđa izrada novih propisa za tu problematiku.

U vezi s propisima treba spomenuti i Jugoslavenske standarde (JUS) od kojih neki tretiraju i materiju u vezi s dalekovodima, npr.: napone, dimenzije izolatora, ispitivanje izolatora, materijal za vodiče, drveni materijal za stupove, čelični materijal za stupove, čelične profile, vijke itd.

#### ELEKTRIČNE KONSTANTE DALEKOVODA

Vodiči dalekovoda predstavljaju prostorno ograničen medij: bakarna ili aluminijска užeta kojima se vodi električna energija. Taj medij očituje neka osnovna električna svojstva koja se izražavaju tzv. električnim konstantama dalekovoda, a koja zavise od materijalnih i geometrijskih svojstava voda. Među te konstante idu: otpor, induktivitet, kapacitet i odvod električnog voda.

Za vrlo kratak odsječak električnog voda mogu se pomenute veličine prikazati u koncentriranom obliku. U tom se slučaju otpor i induktivitet crtaju u seriji s faznim vodičem (sl. 78), a kapacitet i odvod kao poprečne komponente koje leže između faznog i zamisljenog neutralnog vodiča. Međutim, kod stvarnog i duljeg homogenog voda sve su ove veličine podjednako podijeljene duž cijelog vodiča, pa ih stoga posmatramo po jedinici dužine, obično po 1 km. Tako govorimo o otporu ( $R'$ ) u  $\Omega/km$ , o induktivitetu ( $L'$ ) u  $H/km$ , o kapacitetu ( $C'$ ) u  $F/km$  i odvodu ( $G'$ ) u  $S/km$ . Ponekad se umjesto toga govorи i o linijskom otporu, induktivitetu itd. (v. *Električni vodovi — Teorijski osnovi*).

Električne konstante dalekovoda zavise: a) od svojstava materijala, npr. od specifičnog otpora materijala vodiča, b) od geometrijskog oblika i dimenzija, npr. od izvedbe vodiča, rasporeda i razmakâ, i c) od okolnih prilika, npr. od temperature.

**Otpor voda** po jedinici dužine ( $R'$ ) izražava se redovito u omima po kilometru ( $\Omega/km$ ), a izračunava se uz pretpostavku jednolične raspodjеле struje po presjeku (kao kod istosmjerne struje), prema izrazu  $R' = \rho/A$ , gdje je  $\rho$  specifični otpor materijala vodiča, a  $A$  površina presjeka vodiča.

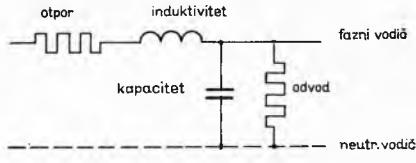
Na otpor voda utječe *materijal* vodiča, jer od njega zavisi specifični otpor. Tako je npr. na  $20^\circ C$  specifični otpor tvrdog bakra  $\rho_{20} \approx 18 \Omega \text{ mm}^2/\text{km}$  a tvrdog aluminija  $\rho_{20} \approx 29 \Omega \text{ mm}^2/\text{km}$ . Daljnji utjecaj ima *temperatura*: promjena specifičnog otpora po stupnju Celsiusa iznosi za bakar 0,068, a za aluminij 0,11  $\Omega \text{ mm}^2/\text{km}^\circ C$ . *Izvedba* vodiča također utječe na veličinu otpora. U prvom redu treba računati sa stvarnim presjekom, a ne s nazivnim, koji ima zaokruženu vrijednost. Nadalje kroz vodič u obliku užeta struja teče duž pojedinih žica, koje zbog sukanja imaju veću dužinu, pa to povećava otpor za 2 do 3%. Kod izmjenične struje dolazi do izražaja i *skin-efekt*, tj. pojava da struja nije jednolično raspoređena po presjeku, nego se gustoća struje povećava od sredine prema površini vodiča. Zbog tog istiskivanja struje iz sredine vodiča otpor je veći, a to povećanje kod dalekovoda može iznositi nekoliko postotaka. Za vodič od nemagnetskog materijala, kod frekvencije izmjenične struje  $f$ , povećanje otpora  $\Delta R$  uslijed skin-efekta može se računati prema izrazu:

$$\Delta R = R - R_0 = \frac{(2f\mu)^2}{192 R_0} - \frac{(2f\mu)^4}{46080 R_0^3},$$

gdje znači  $R$  zbog skin-efekta povećani otpor,  $R_0$  otpor kod istosmjerne struje a  $\mu$  permeabilnost.

Otpor vodiča izrađenih od feromagnetskih materijala povećava se i zbog magnetskih gubitaka unutar vodiča. Veličina tih gubitaka zavisi od jačine struje.

**Induktivitet dalekovoda** ( $L'$ ) izražava se redovito u henrima po kilometru ( $H/km$ ). Ako su vodiči od nemagnetskog materijala, induktivitet dalekovoda zavisi samo od geometrijskih uslova. Za proračun je veoma prikladna *metoda srednjih geometrijskih udalje-*

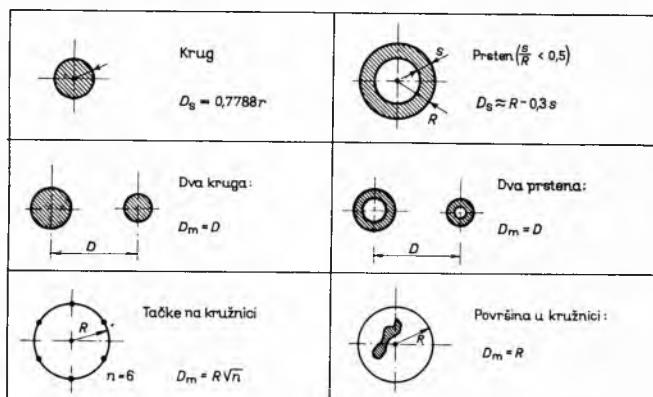


Sl. 78. Konstante dalekovoda, ekvivalentna shema

*nosti* (SGU). Kad je raspored vodiča simetričan, induktivitet se računa prema izrazu:

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_m}{D_s},$$

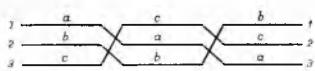
gdje  $D_m$  znači *međusobnu* SGU (srednju geometrijsku udaljenost među vodičima),  $D_s$  *vlastitu* SGU (srednju geometrijsku udaljenost žica u užetu ili skupu vodiča). Formula daje induktivitet za čitav skup polaznih vodiča, čemu kod trofaznog dalekovoda odgovaraju svi vodiči priključeni na istu fazu. Vlastita SGU se računa kao geometrijska sredina svih udaljenosti između pojedinih vodiča polaznog skupa, uvezvi u račun i vlastitu udaljenost svakog pojedinih vodiča, tj. udaljenost vodiča od samog sebe. SGU među vodičima računa se kao geometrijska sredina svih udaljenosti od vodiča polaznog skupa do ostalih vodiča, koji predstavljaju skup povratnih vodiča. Neke vrijednosti za vlastite i međusobne SGU koje se mogu upotrebljavati u primjeni gornje formule prikazane su na sl. 79. Za homogene vodiče u obliku užeta vlastita SGU ovisi



Sl. 79. Neke vrijednosti za vlastite i međusobne SGU

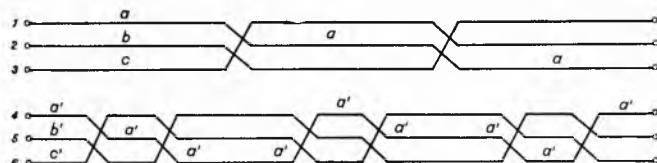
o broju žica, te iznosi  $0,727 r$  za 7 žica,  $0,757 r$  za 19 žica,  $0,770 r$  za 37 žica,  $0,7735 r$  za 61 žicu,  $0,775 r$  za 91 žicu,  $0,776 r$  za 127 žica, gdje je  $r$  vanjski radijus vodiča.

Kod nesimetričnog rasporeda vodiča redovito se vrši preplet, kao što je za jednostruki vod prikazano na sl. 80. Pri tome svaki



Sl. 80. Preplet jednostrukog dalekovoda

fazni vodič (a, b, c), kroz jednaku dužinu trase zauzima svaki položaj na stupu (1, 2, 3). Na taj način se geometrijski odnosi svih triju vodiča među sobom izjednačuju, pa su im i induktiviteti jednaki. U ovom slučaju se međusobna SGU računa kao geometrijska sredina svih triju udaljenosti između vodiča. Kod dvostrukog voda vrši se potpuni preplet prema sl. 81, čime se ujedno poništava



Sl. 81. Potpuni preplet dvostrukog dalekovoda

utjecaj jedne trojke na drugu (inače bi induktivitet bio nešto veći), pa se induktivitet računa kao da druga trojka ni ne postoji.

Kod snopova vodiča može se međusobna SGU računati iz udaljenosti između središta snopova, a vlastita SGU snopa prema izrazu

$$D_s = \sqrt[n]{d_s n R^{n-1}},$$

gdje je  $d_s$  vlastita SGU jednog vodiča,  $n$  broj vodiča u snopu,  $R$  radijus kružnice po kojoj su smješteni vodiči u snopu.

**Kapacitet dalekovoda ( $C'$ )**, koji se redovito mjeri faradima po kilometru (F/km), zavisi samo od geometrijskih uvjeta, a za proračun se i ovdje može upotrijebiti metoda srednjih geometrijskih udaljenosti. Kad je raspored vodiča simetričan, za kapacitet dalekovoda vrijedi izraz:

$$C' = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D_m}{D_{ss}}},$$

gdje je  $D_m$  međusobna SGU, a  $D_{ss}$  vlastita SGU. Formula se primjenjuje na isti način kao u proračunu induktiviteta i daje kapacitet čitavog skupa vodiča. Razlika je jedino u proračunu vlastite SGU iz razloga što se električni naboј nalazi na površini vodiča, dok je električna struja (koja je mjerodavna za induktivitet) raspoređena po presjeku vodiča. Kao vlastita SGU jednog vodiča uzima se u ovom slučaju njegov vanjski radijus, pa se s tim računa i kod određivanja vlastite SGU čitavog skupa vodiča. Kod prepletene voda s nesimetričnim rasporedom vodiča međusobna SGU računa se jednako kao za induktivitet, tj. kao geometrijska sredina svih triju udaljenosti između vodiča. Kod dalekovoda sa snopovima također se postupa analogno kao pri proračunu induktiviteta.

U tačnjem proračunu kapaciteta treba uzeti u račun i *utjecaj zemlje* jer se na njezinoj površini na određeni način rasporedi električni naboј, i to kao posljedica naboja na vodičima dalekovoda. Zbog tog se utjecaja kapacitet dalekovoda nešto malo poveća. Pri tome je najzgodnije koristiti se *metodom zrcaljenja*, tako da se zemlja nadomjesti zamisljenim slikama vodiča (kao u zrcalu) koje imaju istu količinu električnog naboja kao stvarni vodiči, ali sa suprotnim predznakom.

**Ovod (G')** je svojstvo dalekovoda koje omogućuje da od električne struje što teče uzduž dalekovoda jedan mali dio protjeće poprečno kroz izolaciju. On ima dimenziju vodljivosti po jedinici dužine i izražava se redovito u simensima po kilometru dužine dalekovoda (S/km). Odvod je posljedica nesavršenosti izolacije, te u normalnim prilikama na dalekovodu dolazi do izražaja uglavnom zbog struje po površini izolatora, naročito ako su onečišćeni. Kako su te struje veoma male, to je i odvod malen, te se grubo može procijeniti na  $10^{-7}$  S/km. Mnogo jače dolazi do izražaja u nenormalnim prilikama, ako na dalekovodu postoji *korona*, tj. pojava tinjavog izbijanja oko vodiča, zbog toga što je jakost električnog polja prekoračila električnu čvrstoću uzduha. Uslijed korone dolazi do dodatnih gubitaka snage i energije, a ona izaziva i smetnje na visokofrekventnim uređajima koji se nalaze u blizini dalekovoda (v. *Električna pražnjenja u plinovima*).

Da li će na dalekovodu doći do korone može se utvrditi ako je poznat *kritični napon* za konkretnu izvedbu dalekovoda. Korona će postojati ako je pogonski napon dalekovoda veći od kritičnoga. Za trofazni dalekovod s jednostručnim vodičima u simetričnom rasporedu kritični napon iznosi:

$$U_{kr} = \sqrt{3} g_0 r \ln \frac{D}{r} \varrho m,$$

gdje je  $g_0$  kritični gradijent (uzima se  $21,1 \text{ kV/cm}$ ),  $r$  radijus vodiča,  $D$  razmak vodiča,  $\varrho$  relativna gustoća uzduha,  $m$  faktor hravavosti vodiča ( $0,7\cdots 1,0$ ). Grubo se može računati da je kritični napon u kilovoltima 9 puta veći od promjera vodiča u milimetrima.

Korona se najefikasnije može sprječiti povećanjem promjera vodiča ili upotrebom snopova vodiča. Jakost električnog polja na površini vodiča u snopu, sa simetričnim rasporedom faza, može se izračunati iz izraza

$$E = \frac{U_t}{n r \ln \frac{D_m}{D_s}},$$

gdje je  $U_t$  fazni napon dalekovoda,  $n$  broj vodiča u snopu,  $r$  radijus pojedinog vodiča,  $D_m$  SGU između snopova,  $D_s$  vlastita SGU snopa, računata kao za kapacitet. Ova formula daje prosječnu jakost polja na površini vodiča i mjerodavna je za određivanje gubitaka.

Zbog nejednolične raspodjele naboja na površini vodiča (zbog međusobnog utjecaja vodiča u snopu) ni polje na površini nije

svagdje isto. Maksimalna jakost električnog polja na površini vodiča iznosi

$$E_{\max} = E \left[ 1 + (n - 1) \frac{r}{R} \right],$$

gdje je  $R$  radijus kružnice po kojoj su razmješteni vodiči snopa, a  $E$  prosječna jakost električnog polja.

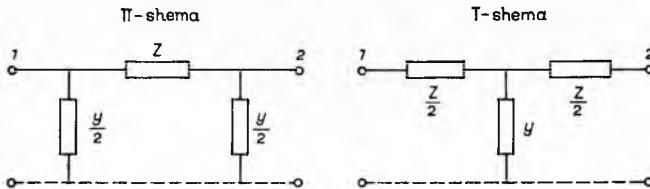
Korona se može pojaviti i na dobro projektiranom vodu, u prvom redu pri kiši i za vrijeme olujnih nepogoda.

#### STACIONARNI POGON DALEKOVODA

Stacionarni pogon dalekovoda je stanje u kojem su se električne prilike u pogledu struje i napona već ustalile jer je proteklo dovoljno vremena od posljednje promjene stanja koja se dogodila u pogonu dalekovoda. U trofaznim sistemima mogu u stacionarnom pogonu vladati simetrične ili nesimetrične prilike. U prvom slučaju su naponi i struje u sve tri faze jednaki po veličini, a po faznom kutu jednak razmaknuti; kod nesimetričnih prilika taj uvjet nije ispunjen: stoga je kod simetričnih prilika dovoljno promatrati električne veličine samo u jednoj fazi.

**Simetrične prilike.** U trofaznom sistemu s frekvencijom  $f$  svode se kod stacionarnog pogona električna svojstva dalekovoda na svega dva parametra, a to su uzdužna impedancija po jedinici dužine  $Z' = R' + j \omega L'$  i poprečna admitancija po jedinici dužine  $Y' = G' + j \omega C'$ , gdje je  $j = \sqrt{-1}$ ,  $\omega = 2 \pi f$  kružna frekvencija. Ovi parametri po jedinici dužine dalekovoda dani su obično po kilometru, a smatra se da su jednolično raspodijeljeni duž dalekovoda.

Približne ekvivalentne sheme dalekovoda omogućuju jednostavan proračun električnih prilika s dovoljnom tačnošću ako dalekovod nije duži od nekih 200 km. Dalekovod se nadomješće bilo II-shemom bilo T-shemom (sl. 82), a njihovi parametri se računaju



Sl. 82. Približne ekvivalentne sheme dalekovoda

prema izrazima:  $Z = Z'l$  i  $Y = Y'l$ , gdje je  $Z$  ukupna impedancija,  $Y$  ukupna admitancija, a  $l$  dužina dalekovoda.

Proračun električnih prilika se vrši pomoću poznatih postupaka za proračun strujnih krugova, idući od jednog kraja ekvivalentne sheme do drugoga. Ako je dalekovod duži od 200 km, može se ovaj približni ali jednostavni postupak primijeniti na taj način da se dalekovod nadomjesti većim brojem ekvivalentnih shema spojenih u lanac.

Prenosne jednadžbe omogućuju tačan proračun električnih prilika za dalekovod bilo koje dužine. One daju napon ( $U$ ) i struju ( $I$ ) u bilo kojoj tački voda ako su dani napon i struja na početku (indeks 1) ili na kraju dalekovoda (indeks 2). Prenosne jednadžbe glase:

$$U = U_1 \operatorname{ch} \Theta - I_1 Z \frac{\operatorname{sh} \Theta}{\Theta},$$

$$I = I_1 \operatorname{ch} \Theta - U_1 Y \frac{\operatorname{sh} \Theta}{\Theta},$$

odnosno

$$U = U_2 \operatorname{ch} \Theta + I_2 Z \frac{\operatorname{sh} \Theta}{\Theta},$$

$$I = I_2 \operatorname{ch} \Theta + U_2 Y \frac{\operatorname{sh} \Theta}{\Theta}.$$

Pri tome je

$$Z = Z'x, \quad Y = Y'x, \quad \Theta = \sqrt{Z'Y},$$

gdje je  $x$  dužina od početka (odnosno kraja) do promatrane tačke. Hiperbolne funkcije mogu se izračunati razvijanjem u red:

$$\operatorname{ch} \Theta = 1 + \frac{\Theta^2}{2} + \frac{\Theta^4}{4} + \frac{\Theta^6}{6} + \dots,$$

$$\frac{\operatorname{sh} \Theta}{\Theta} = 1 + \frac{\Theta^2}{3} + \frac{\Theta^4}{5} + \frac{\Theta^6}{6} + \dots.$$

Tačne ekvivalentne sheme mogu se postaviti za dalekovod bilo koje dužine, ali se njihovi parametri tada računaju po ovim izrazima:

$$\text{II-shema: } \text{uzdužna grana} = Z \frac{\operatorname{sh} \Theta}{\Theta}, \quad \text{poprečna grana} = \frac{Y \operatorname{th} \Theta/2}{2 \operatorname{sh} \Theta/2},$$

$$\text{T-shema: } \text{uzdužna grana} = Y \frac{\operatorname{sh} \Theta}{\Theta}, \quad \text{poprečna grana} = \frac{Z \operatorname{th} \Theta/2}{2 \operatorname{sh} \Theta/2},$$

**Karakteristična pogonska stanja** dalekovoda mogu se najjednostavnije promatrati na tzv. idealnom vodu bez gubitaka, kojemu su zanemareni otpor i dovod. U *praznom hodu*, koji je karakteriziran time što je struja na kraju dalekovoda jednaka nuli, napon se od kraja dalekovoda prema početku mijenja po zakonu kosinusa, a struja po zakonu sinusa. Posljedica toga jest da je napon na kraju voda viši od napona na početku, što može biti opasno kod dugih vodova pri malom opterećenju. Kod *kratkog spoja*, kad je napon na kraju jednak nuli, struja se od kraja dalekovoda prema početku mijenja po zakonu kosinusa, a napon po zakonu sinusa. Veoma povoljan način prenosa snage je stanje kad se dalekovodom prenosi tzv. *prirodna snaga*, u kojem su slučaju napon i struja duž dalekovoda po iznosu konstantni i jedan s drugom u fazi. Pri tome je odnos napona i struje jednak valnom otporu, koji se računa iz izraza:

$$Z_v = \sqrt{\frac{L'}{C'}}.$$

Valni otpor dalekovoda s jednostrukim vodičima iznosi  $\sim 400 \Omega$ . Tome kod 110 kV odgovara  $\sim 30 \text{ MW}$ , a kod 220 kV prirodna snaga od  $\sim 120 \text{ MW}$ . Kod vodiča u snopu je valni otpor manji, pa je prirodna snaga veća, što je povoljno, jer to povećava prenosnu moć dalekovoda. U praksi se prenose, već prema potrebi, snage i veće i manje od prirodne.

**Nesimetrične prilike.** Kod stacionarnog pogona u trofaznom sistemu s nesimetričnim prilikama obično se za proračun upotrebljava *metoda simetričnih komponenata*. Pri tome se umjesto s impedancijom, kao kod simetričnih prilika, računa sa tri različite impedancije: direktnom, inverznom i nultom. Direktna i inverzna impedancija dalekovoda su jednakne impedanciji za simetrične prilike. Treba dakle posebno odrediti samo nultu impedanciju. Analognog vrijedi i za poprečnu admitanciju. Nulta impedancija dalekovoda bez zaštitnih užeta može se izračunati iz izraza

$$Z_0 = R' + 0,05 m + j m \cdot 0,0628 \ln \frac{93 \sqrt{\varrho}}{D_a} (\Omega/\text{km}),$$

gdje je  $R'$  otpor po kilometru u  $\Omega/\text{km}$ ,  $m$  broj vodiča, tj. 3 kod jednostrukog a 6 kod dvostrukog dalekovoda,  $\varrho$  specifični otpor tla u  $\Omega \text{ m}$ ,  $D_a$  vlastita SGU skupa svih vodiča, računajući s vlastitom SGU pojedinog vodiča kao kod induktiviteta, u metrima. U formulu ulazi i specifični otpor tla jer se s nultom impedancijom računa u slučaju kad struja teče i kroz zemlju.

Kod nulte admitancije se obično zanemaruje dio koji odgovara odvodu, pa se proračun svodi samo na nulli kapacitet, koji se može izračunati iz izraza

$$C_0 = \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{18 \cdot 10^6 \ln \frac{H}{D_a}} (\text{F/km}),$$

gdje je  $m$  broj vodiča (kao gore),  $H$  medusobna SGU od svih stvarnih vodiča do svih zrcalnih slika,  $D_a$  vlastita SGU skupa svih vodiča, računajući s radijusom kao s vlastitom SGU pojedinog vodiča (kao kod kapaciteta).

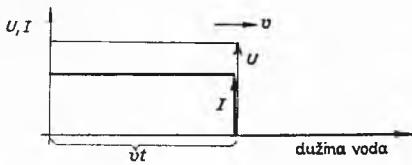
Kod dalekovoda koji imaju zaštitr.a užeta nulta impedancija i nulli kapacitet izračunavaju se prema izrazima koji nisu tako jednostavni, jer treba uzeti u račun i struje, odnosno naboje, zaštitnih užeta.

#### PUTNI VALOVI

Prilikom prelaska dalekovoda iz jednog stacionarnog pogonskog stanja u drugo, npr. prilikom iskopčanja, struja i napon ne

mijenjaju se skokovito, već postepeno; taj postepeni prelaz naziva se *prelaznom pojavom*. Na tok prelazne pojave najviše utječe induktivitet i kapacitet dalekovoda, dok otpor i odvod uglavnom samo dovode do prigušenja, tako da prelazna pojava traje veoma kratko vrijeme. Kod vrlo dugih dalekovoda (nekoliko stotina kilometara) tipična je pojava putnih valova. Promjena stanja ne zahvaća naime istodobno čitav dalekovod, nego se širi duž voda postepeno u vidu elektromagnetskog vala, iako veoma velikom brzinom od  $\sim 300\ 000$  km/sekcija. Putni valovi sa strmim čelom pojavljuju se npr. na dalekovodima kod proboga između dva vodiča ili kod udara groma i šire se na obje strane od mjesta postanka. Najjednostavnije je promatrati putne valove na tzv. *idealnom vodu bez gubitaka*, koji nema ni otpora ni odvoda.

**Nastajanje putnih valova** može se lijepo promatrati na primjeru ukapčanja idealnog dalekovoda na izvor s konstantnim istosmjernim naponom  $E$ . U momentu ukapčanja još je čitav dalekovod bez napona i bez struje. Od tog momenta dalje napon prodire u vod konstantnom brzinom  $v$ , koja iznosi  $\sim 300\ 000$  km/sekcija; to je *naponski val*. Nakon vremena  $t$  dio dalekovoda od početka pa do tačke do koje je stigao putni val nalazi se pod naponom  $U$  koji je jednak naponu izvora (sl. 83). Istodobno s naponskim valom



Sl. 83. Nastajanje putnog vala kod ukapčanja

prodire u dalekovod i *strujni val*, koji putuje istom brzinom  $v$ , tako da na dijelu dalekovoda na kojem već postoji napon teče i struja  $I$ . Ta struja postepeno puni kapacitete dalekovoda ( $C'$ ), koji postoje na svakoj jedinici njegove dužine, i to redom kako čelo strujnog vala prodire u dalekovod. To se mora odvijati postepeno, jer se neglizno prodiranju struje protivi induktivitet dalekovoda ( $L'$ ), koji takođe postoji na svakoj jedinici njegove dužine. Pri tome dolazi do izražaja svojstvo dalekovoda koje nazivamo *valni otpor* i koji iznosi

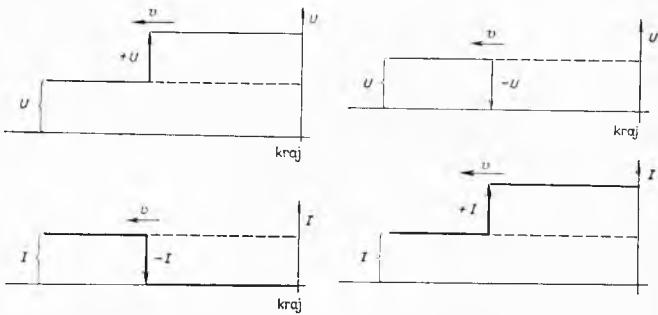
$$Z_v = \sqrt{\frac{L'}{C'}}.$$

Odnos napona i struje putnih valova koji jedan drugom pripadaju uvijek je jednak valnom otporu, pa se struja može izračunati iz izraza:  $I = U/Z_v$ . Valni otpor ne zavisi od dužine voda. Putni val prodire u dalekovod na opisani način bez obzira na to kolika je njegova dužina i bez obzira na to što ga na kraju dalekovoda čeka. Napon i struja postoje dakle samo na onom dijelu dalekovoda dokle je stigao putni val, a u ostalom dijelu u tom momentu nema ni napona ni struje.

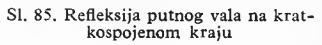
Ako se dalekovod priključi na izvor koji ima promjenljiv napon, u svakom će dijeliču vremena krenuti u vod naponski val s tolikim naponom koliki ima izvor. Nakon nekog vremena vladat će duž dalekovoda napon koji nije svagdje jednak, nego se prostorno mijenja po istom zakonu po kojem se vremenski mijenjao na izvoru, dok je val prodirao u vod. Analogno vrijedi i za strujni val, jer je struja u svakom momentu i u svakoj tački dalekovoda proporcionalna naponu (odnos napona i struje uvijek je jednak valnom otporu).

**Refleksija putnih valova** nastaje ako val dode do kraja dalekovoda i tamo ne može nastaviti svoj put. Pri tome mogu nastupiti različiti slučajevi, a krajnosti predstavljaju slučajevi kad je dalekovod na kraju otvoren i kad je na kraju kratko spojen.

Kad putni val stigne do kraja dalekovoda kojemu je kraj *otvoren*, dolazi do potpune refleksije, pri čemu se naponski val reflektira s istim iznosom i istim predznakom, a strujni val s istim iznosom i suprotnim predznakom. Tako reflektirani valovi putuju u suprotnom smjeru, od kraja dalekovoda prema početku, i to istom brzinom  $v$ . Naponsko i strujno stanje na bilo kojoj tački voda dobiva se sumiranjem osnovnih i reflektiranih valova (sl. 84). Zbog te pojave se napon podvostručuje, a struja padne na nulu, i takvo se stanje na vodu širi prema njegovu početku. Da je struja



Sl. 84. Refleksija putnog vala na otvorenom kraju



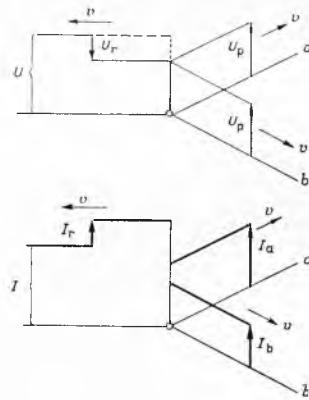
Sl. 85. Refleksija putnog vala na kratkospojenom kraju

moralna pasti na nulu, to je razumljivo, jer na kraju otvorenog voda ne može teći nikakav struja.

Ako putni val stigne do kraja dalekovoda kojemu je kraj *kratko spojen*, dolazi opet do potpune refleksije ali obrnuto: naponski val se reflektira sa suprotnim predznakom a strujni s istim predznakom (sl. 85). Sada napon padne na nulu (što je razumljivo, jer na kratko spojenom kraju ne može postojati nikakav napon), a struja se podvostručuje.

U ova promatrana slučaja dolazi do potpune refleksije jer putni val na kraju dalekovoda ne može predati ništa od energije koju nosi sobom. Snaga, tj. umnožak struje i napona, na kraju je dalekovoda naime u ova slučaju jednaka nuli, jer je u prvom slučaju struja jednaka nuli, a u drugom slučaju je napon jednak nuli. Ako se na kraju dalekovoda priključi otpornik s iznosom valnog otpora, taj će otpornik preuzeti tačno onu energiju koju putni val nosi sobom, pa uopće neće biti nikakve refleksije putnih valova. Ako je otpornik veći ili manji od valnog otpora, nastat će samo djelomična refleksija, i to kod većeg otpornika slična kao kad je kraj voda otvoren, a kod manjeg otpornika slična kao kad je kraj voda kratko spojen.

**Račvanje putnih valova** nastaje ako putni val stigne do tačke gdje se sastaje veći broj dalekovoda. Osnovni val stiće će do tačke račvanja, iza koje se nalaze ostali dalekovodi u paralelnom spoju sa znatno manjim ukupnim valnim otporom. Zbog toga će nastati djelomična refleksija na vodu kojim je osnovni val stigao, ali će se pojaviti i prolazni valovi u ostalim dalekovodima (sl. 86).



Sl. 86. Račvanje putnog vala

**Faktor refleksije ( $r$ )** je omjer napona reflektiranog vala ( $U_r$ ) i napona osnovnog vala ( $U$ ), a može se izračunati iz izraza

$$r = \frac{U_r}{U} = \frac{Z_p - Z_v}{Z_p + Z_v},$$

gdje je  $Z_v$  valni otpor voda kojim dolazi osnovni val, a  $Z_p$  valni otpor ostalih vodova zajedno, u paralelnom spoju. **Faktor prolaza ( $p$ )** je omjer napona prolaznih valova ( $U_p$ ) i napona osnovnog vala ( $U$ ), a može se izračunati iz izraza

$$p = \frac{U_p}{U} = \frac{2Z_p}{Z_p + Z_v}.$$

Pomoću tih faktora mogu se izračunati naponi reflektiranog vala

i prolaznih valova. Struje tih valova računaju se iz općeg uvjeta da je odnos napona i struje jednak valnom otporu dotičnog dalekovoda. Pri tome struji reflektiranog vala treba promijeniti predznak.

**Prigušenje putnih valova.** Opisani putni valovi u idealnim dalekovodima nisu prigušeni, pa bi doveli do prelaznih pojava koje nikad ne prestaju. U stvari, međutim, u dalekovodima nastaju uvek gubici zbog djelovanja otpora i odvoda, uslijed čega se napon i struja brzo prigušuju, pa putni valovi kratko vrijeme nakon svog postanka iščeznu. Tačna analiza putnih valova u dalekovodu s otporom i odvodom ne može se provesti na jednostavan način. Prilike postaju još složenije uslijed toga što otpor i odvod u slučaju prolaza putnog vala nisu konstantni, nego se tokom same pojave mijenjaju u širokim granicama, i to otpor zbog skinefekta a odvod zbog korone.

#### GUBICI SNAGE I ENERGIJE NA DALEKOVODIMA

**Gubici snage** postoje u svakom pogonskom stanju dalekovoda. Najveći dio gubitaka nastaje u otporu dalekovoda, a manji dio u odvodu. Ako se odrede električne prilike u dalekovodu za neko određeno pogonsko stanje, može se izračunati snaga na početku i na kraju dalekovoda. Razlika tih snaga daje gubitke snage u dalekovodu. Ako je dalekovod prikazan ekivalentnom shemom, gubici snage mogu se odrediti kao suma gubitaka snage u pojedinim granama sheme. Gubici snage u jednoj grani računaju se iz izraza  $\Delta P = I^2 R$ , gdje je  $I$  efektivna vrijednost struje u grani,  $R$  otpor cijele grane.

Kapacitet i odvod *dalekovoda bez izrazitih poprečnih konstanta* mogu se zanemariti (pogreška neće biti velika kad su dužina i napon dalekovoda mali), a gubici snage se mogu izračunati iz izraza  $\Delta P = 3 I^2 R$ , gdje je  $I$  struja dalekovoda,  $R$  otpor dalekovoda po fazi.

Uz pretpostavku konstantnog napona i konstantnog faktora snage, gubici će biti proporcionalni kvadratu prenesene snage. Ako se ništa ne prenosi, neće biti ni gubitaka snage. Ako se umjesto jednog uzmu dva paralelna dalekovoda, otpor će biti za polovicu manji, pa će i gubici snage biti za polovicu manji.

Na *dalekovodu sa poprečnim konstantama* prilike su složenije. Tu postoje gubici i u pogonskom stanju praznog hoda, iako se nikakva snaga ne prenosi. Čim je, naime, dalekovod pod naponom, poprečni kapaciteti uzimaju struje koje teku kroz uzdužni otpor i tu stvaraju gubitke. Ako umjesto jednog uzmemo dva paralelna dalekovoda, gubici praznog hoda bit će dva puta veći. Tek kod većih snaga prenosa smanjiti će se gubici snage ako se umjesto jednog uzmuh dva paralelna dalekovoda.

Gubici snage iznose obično na dalekovodima 1,5–5% prenosne snage.

**Gubici energije** se dobiju tako da se gubici snage množe s vremenom kroz koje ti gubici snage traju. Obično se računaju gubici kroz godinu dana, tj. kroz 8760 sati. Poteškoća je u tome što se tokom vremena snaga prenosa mijenja, pa se mijenjaju i gubici snage.

Na *dalekovodu bez poprečnih konstantata* gubici energije kroz godinu dana mogu se odrediti na način opisan u nastavku. Polazi se od poznatog pojma koji se zove *vrijeme maksimalnog opterećenja* ( $t_p$ ): to je vrijeme kroz koje bi se morala prenositi maksimalna snaga (koja se pojavljuje unutar godine dana) da bi se prenesla ona energija koja se stvarno prenosi kroz godinu dana uz promjenljivu snagu. Analognog tome uvedi se pojam koji se zove *vrijeme maksimalnih gubitaka* ( $t_g$ ): vrijeme kroz koje bi morali trajati maksimalni gubici snage (koji odgovaraju maksimalnoj snazi prenosa), da bi se dobili oni gubici energije koji stvarno nastaju kroz godinu dana. Gubici energije kroz godinu dana mogu se onda računati iz izraza

$$\Delta W = 3 I_{\max}^2 R t_g,$$

gdje je  $I_{\max}$  struja dalekovoda koja odgovara maksimalnoj snazi,  $R$  otpor dalekovoda po fazi.

Vrijeme maksimalnih gubitaka moglo bi se tačno izračunati ako je poznato kako se mijenja snaga prenosa tokom godine, ali to bi bio dugotrajan posao koji se upravo želi izbjegći. Može se upotrijebiti približna formula:

$$\left(\frac{t_g}{8760}\right)^2 = k \left(\frac{t_p}{8760}\right) + (1 - k) \left(\frac{t_p}{8760}\right)^2,$$

gdje je  $k$  koeficijent koji iznosi 0,2–0,5, već prema energetskim prilikama dotičnog područja, a može se odrediti analizom statističkih podataka;  $t_p$  se uvrštava, a  $t_g$  dobiva u satima. Veoma grubo može se računati sa  $t_g \approx \frac{2}{3} t_p$ .

*Gubici energije dalekovoda sa poprečnim konstantama* kroz godinu dana mogu se odrediti na slijedeći način. Iz ukupne u godinu dana prenesene energije ( $W$ ) i maksimalne snage prenosa ( $P_{\max}$ ), koje su obično poznate, može se izračunati vrijeme maksimalnog opterećenja  $t_p = W/P_{\max}$  i srednja snaga prenosa  $P_{sr} = W/8760$ . Onda se promatra jedan ekstremni način prenosa, tj. takav da se kroz vrijeme  $t_p$  prenosi snaga  $P_{\max}$ , a kroz ostalo vrijeme ništa. Tome odgovaraju gubici energije

$$\Delta W_{\max} = G_{\max} t_p + G_0 (8760 - t_p),$$

gdje su  $G_{\max}$  gubici snage pri snazi prenosa  $P_{\max}$ , a  $G_0$  gubici snage pri snazi prenosa jednakoj nuli. Drugi ekstremni način prenosa je onaj pri kojem se srednja snaga prenosi kroz čitavu godinu. Tome odgovaraju gubici energije

$$\Delta W_{\min} = G_{sr} \cdot 8760,$$

gdje su  $G_{sr}$  gubici snage pri snazi prenosa  $P_{sr}$ . Stvarni gubici energije kroz godinu dana računaju se kao aritmetička sredina za gornja dva ekstremna slučaja:

$$\Delta W = \frac{\Delta W_{\max} + \Delta W_{\min}}{2}.$$

#### IZBOR NAPONA I PRESJEKA VODIČA DALEKOVODA

Napon i presjek vodiča osnovni su parametri dalekovoda koji moraju biti utvrđeni prije nego što se pristupi projektiranju i gradnji. Oni slijede iz tehničkih i ekonomskih zahtjeva koji moraju biti ispunjeni u pogonskim uvjetima u kojima se nalazi dalekovod kao dio prenosnog sistema, ili, još češće, kao dio visokonaponske mreže ili elektroenergetskog sistema.

Tehnički zahtjevi koji prvenstveno utječu na izbor napona jesu zahtjevi u pogledu režima napona i stabilnosti pogona. Režim napona mora biti takav da napon ne odstupa mnogo od vrijednosti nazivnog napona, jer su svi elementi mreže građeni tako da najpovoljnije rade pri nazivnom naponu. Stabilnost pogona zahtjeva takve električne prilike u mreži da ne postoji opasnost od gubitka sinhronizacija ni u stacionarnom pogonu ni pri naglim promjenama stanja mreže. Jednom i drugom zahtjevu dalekovod udovoljava to bolje što mu je napon viši, ali se potrebni proračuni ne mogu izvršiti odvojeno za sam jedan dalekovod, nego se moraju izvršiti za čitav elektroenergetski sistem u cjelini.

Tehnički zahtjevi koji utječu na izbor presjeka vodiča odnose se na zagrijavanje i koronu. Presjek vodiča mora biti tolik da ne dođe do opasnog zagrijavanja ni kod iznimnih pogonskih stanja u mreži, npr. ako neki drugi dalekovod ispadne iz pogona. Maksimalne trajno dozvoljene struje već su bile dane i tablicama 2 i 3, zavisno od materijala vodiča. Da bi se utvrdila maksimalna struja koja može eventualno teći u promatranoj dalekovodu, treba očito izvršiti proračune za čitavu mrežu. Korona utječe na izbor vanjskih dimenzija vodiča bez obzira na njegov materijal, i to mora biti uskladeno s odabranim naponom dalekovoda. I ovim zahtjevima dalekovod udovoljava to bolje što se izaberu veće dimenzije vodiča.

Osim tehničkih zahtjeva postoje i ekonomski zahtjevi, koji ne dozvoljavaju da se izabere previšok napon ili preveliki presjek vodiča. Ekonomski zahtjevi traže da ukupni godišnji troškovi, koji se sastoje od troškova izgradnje i troškova pogona, budu minimalni. Godišnji troškovi izgradnje sastoje se od anuiteta za amortizaciju uloženih investicionih sredstava, po određenoj stopi (10–12%). Godišnji troškovi pogona sastoje se od valoriziranih gubitaka snage i energije kroz godinu dana i troškova održavanja.

Za napon i presjek ne mogu se ni u naprijed navedenim granicama izabrati bilo koje vrijednosti, nego se treba držati i odgovarajućih standarda. Standardne vrijednosti za napone dane su u tablici 11, gdje su navedene vrijednosti nazivnih napona i maksimalnih pogonskih napona koje se mogu birati. Za napone do uključivo nazivnog napona 220 kV postoji jugoslavenski standard, a ostali naponi dani su prema međunarodnim preporukama IEC. Standardne vrijednosti za presjeke vodiča nalaze se u tablicama 2 i 3.

Tablica 11  
STANDARDNI NAPONI, kV

Nazivni napon	Maksimalni pogonski napon	Primjedba
3	3,6	JUS
6	7,2	
10	12	
20	24	
35	38	
60	72,5	
110	123	
220	245	
380 i 400	420	IEC
500	525	
700 i 750	765	

Budući da je broj standardnih napona i standardnih presjeka ograničen, to je ograničen i broj različitih izvedaba dalekovoda. Zbog toga se za izbor napona i presjeka u pogledu ekonomskih zahtjeva može prikladno upotrijebiti u nastavku navedeni postupak. Za različite izvedbe dalekovoda crta se dijagram cijene prenosa za 1 kWh u zavisnosti od maksimalne snage prenosa, dakako uz odredene uvjete (sl. 87). U cijenu prenosa treba uračunati troškove izgradnje i troškove pogona. Izabire se ona izvedba koja daje najnižu cijenu prenosa.

Ako je zadana maksimalna snaga prenosa, može se grubo, kao prva informacija, odrediti ekonomski napon iz izraza:

$$U_{ek} \approx 20\sqrt{P}$$

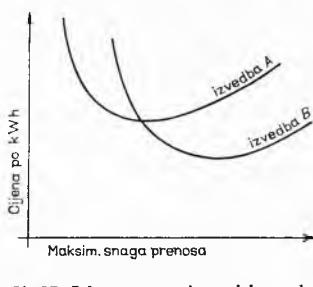
Ekonomski presjek vodiča od alučela može se također grubo odrediti iz uvjeta da pri maksimalnoj snazi prenosa gustoća struje u aluminijskom plaštu bude  $\sim 0,9 \text{ A/mm}^2$ .

#### UTJECAJ DALEKOVODA NA TELEKOMUNIKACIONE VODOVE

Dalekovodi mogu utjecati na bliske telekomunikacione vodove indukcijom i time što dolazi do izravnje galvanske veze među njima. Do direktnog galvanskog spoja može doći prilikom prekida vodiča na mjestima ukrštenja ili zbog povećanog potencijala uzemljenih dijelova, ako postoji zajedničko ili blisko uzemljjenje. Do pojava smetajućih a ponekad i opasnih napona može doći u telekomunikacionim vodovima djelovanjem električnih i magnetskih polja dalekovoda. U okolini dalekovoda postoji naime električno i magnetsko polje uzrokovano naponom dalekovoda, odnosno strujom koja u njemu teče. Kod simetričnih prilika pogona u trofaznom dalekovodu utjecaji se pojedinih faza među sobom poništavaju, pa je jakost električnog i magnetskog polja već u neposrednoj okolini dalekovoda praktički jednaka nuli. Kod nesimetričnih prilika u dalekovodu, naprotiv, postoji u okolini dalekovoda razmjerno jako električno i magnetsko polje. Za električno polje važno je koliki su naponi pojedinih faznih vodiča prema zemlji, a za magnetsko polje kolika struja teče kroz zemlju.

Najizrazitiji slučajevi nesimetričnih električnih prilika u dalekovodu nastaju ako dođe do kvara na izolaciji jedne faze. Ako se dalekovod nalazi u mreži koja nema kruto uzemljeno zvjezdiste, takav kvar (*zemljospoj*) dovodi do potpune nesimetrije napona prema zemlji, dok su struje kroz zemlju razmjerno male. Takvo stanje u pogonu može trajati duže vrijeme. Ako se dalekovod nalazi u mreži koja ima kruto uzemljeno zvjezdiste, takav kvar (*jednopolni kratki spoj*) dovodi do velikih struja kroz zemlju. Dalekovod u takvom stanju iz razloga sigurnosti mreže ne smije ostati u pogonu, nego se mora u najkraće vrijeme iskopčati.

Ako se u okolini dalekovoda nalaze telekomunikacioni (telefonski, telegrafski) vodovi, može električno i magnetsko polje dalekovoda dovesti do neželjenih velikih napona i struja u njima. Takvo štetno djelovanje dalekovoda na telekomunikacione vodove može dovesti do uništenja uređaja, može predstavljati životnu opasnost za lica koja rukuju uređajima ili se njima služe, a u manje



Sl. 87. Izbor napona i presjeka s obzirom na ekonomski zahtjeve

opasnim slučajevima ono se manifestira u bruhanju (50 Hz), iskrivljenju signala i u šumu koji je posljedica induciranih napona na višim harmoničkim frekvencijama. Dok do prvih pojava dolazi obično samo u slučaju nekog kvara, šumovi mogu nastupiti i u normalnom pogonu. Zbog toga treba trase dalekovoda položiti dovoljno daleko od telekomunikacionih vodova, a na ovima opet preduzeti sve potrebne zaštitne mjere, koje se sastoje u primjeni osigurača, iskrišta, relejnih zaštit, prenaponskih plinskih zaštitnih cijevi, specijalnih spregi itd.

U tom pogledu propisi pojedinih zemalja, pa tako i naši, daju odgovarajuće odredbe o tome koliki se utjecaj dalekovoda na telekomunikacione vodove smije dozvoliti a da se to ne smatra opasnošću ili smetnjom. Odredbe se odnose na utjecaj električnog polja i na utjecaj magnetskog polja, i to posebno za telefonske i posebno za telegrafske vodove, a sadrže i postupke za potrebne proračune. Ako je udaljenost dalekovoda od telekomunikacionog voda dovoljno velika, a to je propisima specificirano za različite slučajevе, smatra se da utjecaj ne prekoračuje dozvoljene granice.

#### PERSPEKTIVNI RAZVOJ GRADNJE DALEKOVODA

Tehnika gradnje dalekovoda prilagođivala se u prošlosti zahtjevima koje postavlja prenos električne energije, a morat će se njima prilagodivati i u budućnosti. Potreba da se prenose sve veće snage na sve veće udaljenosti imperativno zahtijeva da se upotrijebi sve viši prenosni naponi. Danas su već u pogonu u Kanadi dalekovodi napona 700 kV, čemu odgovara prirodna snaga prenosa od nekih 2000 MVA. Povišenjem napona znatno se povećava prenosna moć dalekovoda (koja raste s kvadratom napona), tako da jedan dalekovod od 700 kV može nadomjestiti 3 dalekovoda od 380 kV ili 12 dalekovoda od 220 kV.

Iza Kanade danas po visini napona dalekovoda koje imaju u pogon dolaze USA i SSSR s većim brojem dalekovoda napona 500 kV. Mnoge druge zemlje imaju već u pogonu znatne dužine dalekovoda napona 380 kV. No općenito se svadje u svijetu opaža tendencija uvođenja sve viših napona, pa se tako već grade ili planiraju dalekovodi od 500 odnosno 700 kV u Sjevernoj i Južnoj Americi, Australiji, Sjevernoj Africi, Francuskoj i Japanu, a u SSSR se grade dalekovodi i za 750 kV. Istovremeno se već studiraju mogućnosti prenosa, pa i izgradnja dalekovoda, s naponom od 1000 kV i više.

Nema naročitih tehničkih problema da se pri gradnji dalekovoda pređe na napone još više od onih koji su danas u upotrebi. Osnovni tehnički problem koji je proizlazio iz upotrebe vrlo visokih napona bila je korona na vodičima. Ali to je veoma elegantno i efikasno riješeno upotrebom snopa od nekoliko vodiča po fazi, pa će takvo rješenje zadovoljiti i kod daljnog povišenja napona. Drugi problem u vezi s vrlo visokim naponima je izolacija vodiča. Problem se sastoji u tome da dalekovod mora imati to duže izolatorske lance što je napon dalekovoda viši. Razdioba je naponu duž veoma dugih izolatorskih lanaca, međutim, tako nejednolična da povećanje broja članaka u izolatorskom lancu veoma malo doprinosi izolacionom nivou dalekovoda. Ipak se danas računa da u tom pogledu neće biti poteškoća ako napon dalekovoda bude čak iznad 1000 kV.

Na način izvedbe dalekovoda osim visine napona utječe i sistem prenosa električne energije za koji se taj dalekovod koristi. Trofazni sistem prenosa, koji se danas još uviјek gotovo isključivo upotrebljava, radi s izmjeničnim naponima i strujama, pa pri tome dolaze do izražaja štetne posljedice induktivitet i kapaciteta dalekovoda. Postoji doduše mogućnost da se induktivitet dalekovoda kompenzira (smanji ili potpuno poništi) uključivanjem serijskih kondenzatora u dalekovod, a kapacitet da se kompenzira priključivanjem porednih prigušnica, ali to spada u dijelove postrojenja izvan dalekovoda. S druge strane, upotreba snopova vodiča je korisna i u ovom pogledu, jer nešto smanjuje induktivitet (iako se pri tome nešto povećava kapacitet, ali to je manje neugodno). Da bi se potpuno kompenzirao induktivitet dalekovoda samim načinom njegove izvedbe, u SSSR su predložili izgradnju dalekovoda s tzv. razmaknutim vodičima, gdje se svaka faza dalekovoda sastoji od dva vodiča koji su ovješeni duž određene udaljenosti paralelno jedan do drugog a da pri tom nisu među sobom galvanski spojeni. Postrojenje na početku dalekovoda priključeno je galvanski na prvi od tih vodiča, a postrojenja na kraju na drugi

vodič. Kako između tih vodiča ne postoji galvanska veza, to se izmjenična struja prenosi kapacitivnim putem iz jednog vodiča u drugi, što djeluje kao ubacivanje serijskih kondenzatora u dalekovod, pa se time kompenzira induktivitet. To dolazi u obzir na veoma dugim dalekovodima (znatno iznad 1000 km), a budućnost će pokazati da li će ovaj prijedlog naći i praktičnu primjenu.

Da se izbjegnu poteškoće do kojih dolazi zbog upotrebe izmjenične struje, u posljednje vrijeme počinje se uvoditi sistem prenosa s istosmjernom strujom. Danas već postoji u pogonu nekoliko takvih sistema prenosa, a nekoliko ih je u gradnji, pri čemu se radi o naponima od nekoliko stotina kilovolta. Ukoliko se za ovakve prenosne sisteme budu htjeli upotrijebiti dalekovodi (zasada se uglavnom radi o kabelskim vezama), a za to ima izgleda već u neposrednoj budućnosti, njihova izgradnja neće postavljati nikakvih posebnih problema, pa se može očekivati i izgradnja dalekovoda s vrlo visokim istosmjernim naponima.

LIT.: R. Rüdenberg, Elektrische Hochleistungsübertragung auf weite Entfernung, Berlin 1932. — K. Girkmann, E. Königshofer, Die Hochspannungs-Freileitungen, Wien 1938. — M. Vidmar, Problemi prenosa električne energije, Ljubljana 1947. — P. Ilavački, Građenje elektrovdova za visoke napone, Beograd 1949. — A. J. Rjabkov, Električne mreže i dalekovodi (prijevod), Zagreb 1949. — P. Ilavački, Vodovi visokog napona u pogonu, Beograd 1950. — H. H. Skilling, Electric transmission lines, New York 1951. — P. Tucoulat, Construction des lignes aériennes, Paris 1952. — L. F. Woodruff, Principi prijenosa električne energije (prijevod), Zagreb 1954. — A. A. Glazunov, Električne mreže i sistemi, Moskva 1954. — R. W. P. King, Transmission-line theory, New York 1955. — H. Carpenter, Lignes électriques T. H. T., Paris 1955. — A. A. Glazunov, Osnovy mehaničke časti vozdusnih linija elektroprerečadi, Moskva 1956. — H. Bornemann, Bau und Berechnung von Leitungen und Leitungsnetzen, Berlin 1956. — H. Rieger, Der Freileitungsbau, Berlin 1960. — G. Heyn, Der Bau von Hochspannungsfreileitungen, Berlin 1962. — B. B. Gudenberg, M. M. Kastanov, D. B. Rabionov, M. A. Peym, Sooruzhene linijii elektroprerečadi, Moskva 1963. — Westinghouse Electric Corporation, Prenos i distribucija električne energije (prijevod), Beograd 1964. — E. B. Kurtz, The lineman's and cableman's handbook, New York, 1964.

B. Stefanini

**DALJINOMJERI (telemetri),** instrumenti za mjerjenje udaljenosti. Daljinomjeri imaju široku primjenu u geodetskoj praksi, a u armiji i ratnoj mornarici se upotrebljavaju za određivanje udaljenosti mete. Značaj primjene ovih instrumenata dolazi do izražaja na neravnom i nepristupačnom terenu, naročito kada je direktno mjerjenje udaljenosti između dvije tačke nemoguće. U geodetskim mjerjenjima daljinomjeri su zauzeli značajno mjesto zbog ekonomičnosti pri radu, a često i zbog velike preciznosti mjerjenja.

Danas postoji vrlo mnogo različitih vrsta takvih instrumenata od sasvim jednostavnih do vrlo složenih. Prema tehničkim rješenjima u načinu mjerjenja udaljenosti, daljinomjeri se dijele na dvije glavne grupe: *optičke* i *elektroničke* daljinomjere.

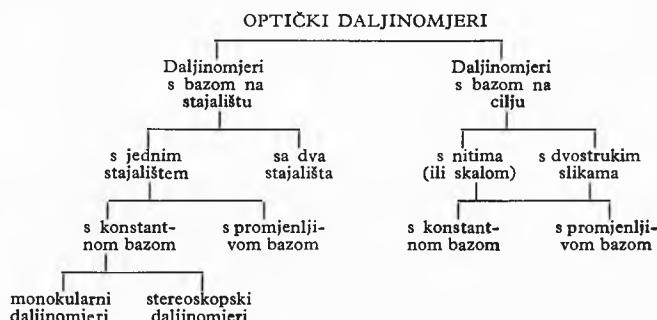
#### OPTIČKI DALJINOMJERI

U ovu najbrojniju grupu daljinomjera pripadaju svi oni instrumenti čiji optički elementi omogućavaju mjerjenje udaljenosti bilo neposredno, njihovom funkcijom, bilo samo posredno, služeći za promatrajanje ili viziranje.

Princip optičkog mjerjenja dužina zasnovan je na rješavanju trokuta (sl. 1) u kome su poznati ili mjereni jedna stranica ( $b$ ) i dva kuta. Na osnovu tih veličina može se nepoznata dužina ( $D$ ) izračunati pomoću jednostavnih trigonometrijskih formula. Stranica  $b$  je vrlo mala u odnosu na mjerenu dužinu  $D$  i naziva se bazom. Kut nasuprot ovoj bazi ( $\alpha$ ) također je malen; naziva se *paralaktičkim kutom*. Praktički je najčešće dovoljno poznavati, ili mjeriti, samo paralaktički kut ako je u paralaktičkom trokutu jedan od druga dva kuta ( $\beta$  ili  $\gamma$ )  $90^\circ$ , ili su oba kuta vrlo blizu  $90^\circ$ , odnosno, ako su oba kuta jednakana.

Vrh paralaktičkog kuta može biti na cilju ili na samom stajalištu instrumenta, već prema tome kakva je konstrukcija instrumenta. Ako je vrh paralaktičkog kuta na cilju, daljinomjeri (tzv. *daljinomjeri s bazom na stajalištu*) mogu biti s jednim stajalištem ili sa dva stajališta. Daljinomjeri s jednim stajalištem imaju jedan zajednički nosač optičkih dijelova, iako ti dijelovi mogu biti i prilično udaljeni jedan od drugog da bi se dobila veća baza. Daljinomjer sa dva stajališta ima dva zasebna instrumenta kojim

se istovremeno vizira na određeni cilj i mjere kutovi  $\beta$  i  $\gamma$ . Specijalni su daljinomjeri tzv. *depresioni daljinomjeri* kojima služi kao baza poznata visinska razlika između instrumenta i cilja. Baza je, dakle, u tom slučaju postavljena vertikalno. Primjenjuju se za određivanje udaljenosti brodova sa obalnih uzvisina. Prema različitim konstruktivnim osobinama daljinomjera može se njihova podjela prikazati ovom shemom:

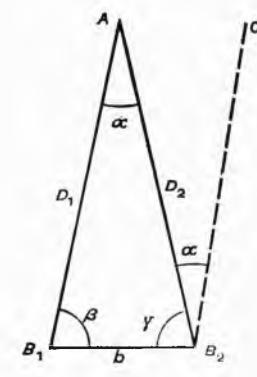


#### Daljinomjeri s bazom na stajalištu

**Daljinomjeri sa dva stajališta.** Njima se određuje nepoznata udaljenost cilja tako da se mjere kutovi sa dva stajališta, na razmaku obično većem od 1 km, koji je prethodno izmjerен (baza). Kutovi se mjere dvama teodolitima. Kako se najčešće radi o pokretnim ciljevima (npr. brodu, ciljevima u zraku), moraju kutovi  $\beta$  i  $\gamma$  biti izmjereni istovremeno, što se postiže telefonskom vezom ili putem električnog kontakta. Poznati suvremeni instrument ovog tipa je *kinoteodolit*. Naziv mu je po tome što se istovremeno dvama instrumentima kinematografski snima položaj cilja i odgovarajuća očitanja na limbovima.

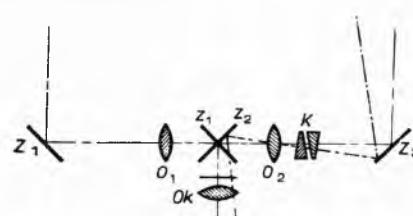
**Monokularni daljinomjeri** se u principu sastoje od dva čvrsto spojena durbina s paralelnim vizurnim osima, a s razmakom koji određuje bazu (sl. 2); ova je u prostoru horizontalna.

Vizira li se cilj jednim durbinom, npr.  $B_1A$ , drugi durbin pogodat će tačku  $C$ . Pomoću optičkog mikrometarskog uređaja (kutovi  $\alpha$  su vrlo mali) dovodi se i vizura  $B_2C$  u tačku  $A$ . Time je izmjerena kut  $\alpha$ . Kako su kutovi  $\beta$  i  $\gamma$  vrlo blizu  $90^\circ$ , a  $D_1 = D_2 = D$ , to je s dovoljnom tačnosti:  $D = b/\alpha$  ( $\alpha$  u radianima). Na odgovarajućoj podjeli mikrometra može se neposredno očitati preračunata udaljenost.



Sl. 2. Princip mjerjenja monokularnim daljinomjerom

Praktički su ovi daljinomjeri izvedeni tako da osi objektiva padaju u os cijevi, a pomoću zrcala ili prizama zrake se otiskljuju u zajednički okular. Na sl. 3 prikazana je optička shema



Sl. 3. Shema optičke građe monokularnog daljinomjera

jednog od starijih tipova ovakvog daljinomjera. Na kraju cijevi su glavna zrcala  $Z_1$  i  $Z_2$  koja otklanjaju zrake sa cilja u os objektiva. Unakrsna zrcala  $z_1$  i  $z_2$ , svako na pola visine okulara, otklanjaju zrake svjetlosti prema okularu  $Ok$ , tako da se u gornjem vidnom polju vidi slika koju je dao jedan objektiv  $O_1$ , a u donjem, slika koju je dao drugi objektiv  $O_2$ . Obje slike treba postaviti na verti-

Sl. 1. Geometrijska osnova optičkog mjerjenja dužina