S V E U Č I L I Š T E U Z A G R E B U

Dr ing. Božidar Stefanini

PRIJENOS ELEKTRIČNE ENERGIJE I

i

DODATAK 1 (PRELAZNE POJAVE U DUGIM VODOVIMA)

ZAGREB 1966

Odobreno rješenjem Komisije za udžbenike i skripta Sveučilišta u Zagrebu
broj 08-148/1 od 27. I 1966.

Cijena za studente Sveučilišta u Zagrebu
N. din 20,50—

Umnoženo u tiskari Izdavačkog odjela Sveučilišta u Zagrebu Trg M. Tita 14
Broj 663

S A D R Ž A J

Strana

Predgovor

Glava I UVOD

1. Općenito o prijenosu električne energije 1

Značaj prijenosa električne energije, postrojenja za prijenos električne energije, sistemi prijenosa električne energije, razvoj napona za prijenos električne energije, mreža 11o kV u Jugoslaviji, problematika trofaznog prijenosa električne energije.

2. Izvedba nadzemnih vodova i kabela 7

Nadzemni vodovi, sastavni dijelovi nadzemnih vodova, kabeli, vodiči i zaštitna užeta, materijal za vodiče, izvedba vodiča.

Glava II KONSTANTE VODA

3. Općenito o konstantama voda 13

4. Otpor voda 14

Općenito o otporu, utjecaj materijala i temperature, utjecaj izvedbe vodiča, utjecaj frekvencije - skinefekt, pretpostavke za proračun skinefekta, proračun raspodjele struje, faktor skinefekta, praktični proračun utjecaja skinefekta, utjecaj skinefekta kod čeličnog užeta, efekat blizine.

5. Induktivitet voda 25

Općenito o induktivitetu, magnetsko polje oko vodiča, magnetsko polje unutar vodiča, ulančeni tok oko vodiča, ulančeni tok unutar vodiča, vod od dvije žice, koncentriranje struje unutar vodiča, opća formula za ulančeni tok, primjer za primjenu opće formule, simetrični trofazni vod, metoda srednjih geometrijskih udaljenosti, neke vrijednosti za SGU homogenih užeta, SGU za ostale izvedbe vodiča, dvostruki simetrični vod, nesimetrični trofazni vod, dvostruki vod djelomično prepleten, dvostruki vod potpuno prepleten, primjer - Švedski vod 38o kV, induktivitet kabela.

6. Kapacitet voda 38

Općenito o kapacitetu, električno polje oko vodiča, proračun kapaciteta, vod s dvije žice, simetrični trofazni vod, prepleteni nesimetrični vod, utjecaj zemlje na kapacitet, proračun kapaciteta s utjecajem zemlje, vod s dvije žice, metoda SGU za proračun kapaciteta, dvostruki simetrični vod, trofazni prepleteni vod i zemlja, parcijalni kapaciteti, dozemni kapacitet trofaznog voda, utjecaj oblika vodiča, utjecaj dozemnih užeta i uzemljenih dijelova, kapacitet kabela.

7. Odvod voda i korona 51

Odvod, općenito o koroni, jakost polja na površini vodiča, kritični napon, stvarni kritični napon, gubici korone, sprečavanje korone, jakost polja kod snopova vodiča.

Strana

8. Konstante za nesimetrične prilike 68

Metoda simetričnih komponenata, uzdužne impedancije voda, poprečne kapacitivne susceptancije.

Glava III TEORIJA PRIJENOSA

9. Približne ekvivalentne sheme voda 61

Električni proračun prijenosa, kratki vod manjeg napona, kratki vod višeg napona, električni proračun po Pi-shemi, električni proračun po T-shemi, primjer proračuna po Pi-shemi, primjer proračuna po T-shemi, granica tačnosti približnih shema, dugi vod višeg napona, primjer proračuna pomoću lanca četveropola.

lo. Prilike na idealnom vodu 71

Električne prilike na dugom vodu, prazni hod idealnog dugog voda, Ferrantijev efekat, kratki spoj idealnog dugog voda, diskusija električnih prilika u idealnom vodu, njihanje energije u idealnom vodu, prirodna snaga u dugom idealnom vodu, uslovi za prirodnu snagu prijenosa, momentalne vrijednosti napona i struje kod prirodne snage.

11. Putni valovi na dugim vodovima 79

Putni val u idealnom vodu, karakteristike putnog vala, promjena amplitude vala, putni val izmjenične struje i napona, putni val u kabelu, refleksija vala na otvorenom kraju voda, refleksija vala na kratko spojenom kraju voda, superpozicija putnih valova.

12. Prijenosne jednadžbe voda 87

Izvod prijenosnih jednadžbi, diskusija općeg rješenja, prvi oblik prijenosnih jednadžbi, ostali oblici prijenosnih jednadžbi, dijagrami za očitavanje hiperbolnih faktora, primjer proračuna po dijagramu Woodruffa, primjer proračuna sa hiperbolnim funkcijama, primjer proračuna s prijenosnim jednadžbama, primjer kad su zadane prilike na oba kraja voda, prijenosne jednadžbe za vod bez gubitaka, pogonske prilike u idealnom vodu, karakteristike prijenosa prirodne snage, prijenos snage bez povratnog vala, prilagodjenje pogona prijenosu prirodnom snagom.

13. Prilike na stvarnom vodu 99

Prilike kod prijenosa bez povratnog vala, prilike kod prijenosa prirodne snage, prilike kod prijenosa snage manje od prirodne, prilike kod prijenosa snage veće od prirodne, prilike na vodu dugom looo km.

14. Tačne ekvivalentne sheme voda 1o4

Tačna ekvivalentna shema za dugi vod, parametri tačne Pi-sheme, parametri tačne T-sheme, korekcioni faktori za tačne ekvivalentne sheme, primjer proračuna tačne Pi-sheme, primjer proračuna tačne T-sheme, usporedba rezultata.

15. Transformator i generator u prijenosu 1o8

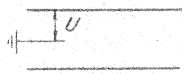
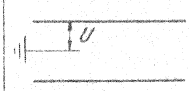
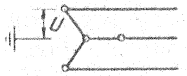
Ekvivalentne sheme za transformator, parametri ekvivalentne sheme za transformator, primjer, nulta reaktancija transformatora, impedancija u zvjezdištu, ekvivalentna shema za generator.

SISTEMI PRIJENOSA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Za prijenos energije električnim putem dolaze u obzir uglavnom tri sistema: (1) istosmjerni, (2) jednofazni, i (3) trofazni. Njihove glavne osebine prikazane su pregledno na slici 1.3,

a) Ako spomenuta tri sistema izgradimo za isti efektivni napon izmedju vodiča i neutralne tačke sistema, onda uz istu struju u vodičima dobijemo jednaku mogućnost prijenosa snage za sva tri sistema (uz pretpostavku da je faktor snage jednak 1). To znači, da se bilo koji od spomenuta tri sistema može jednako ekonomično upotrijebiti za prijenos električne energije. Medjutim, uz to dolaze u obzir i drugi momenti i tehnički uslovi, čemu pojedini sistemi prijenosa različito zadovoljavaju, pa i to treba uzeti u obzir. To je na slici prikazano tako, da je za prednost dotičnom sistemu dan znak (+) a za manu znak minus (-).

Sistemi prijenosa električne energije 354

	Istosmjerni	Jednofazni	Trofazni
Simbolički prikaz			
a) Prenosna snaga po 1 vodiču	UI	$UI \cos\varphi$	$UI \cos\varphi$
b) Visoki napon	−	+	+
c) Faktor snage	+	(−)	(−)
d) Okretno polje	−	−	+
e) Iskapčanje	−	+	+
f) Utjecaj L,C	+	−	−
g) Sinhronizam	+	−	−
h) Naprez. izolacije	+	−	−

Sl. 1.3

b) Prijenos iole većih količina energije na iole veću udaljenost zahtijeva primjenu visokih napona, koji danas u svijetu dosižu i 400 kV. U tom pogledu jednofazni i trofazni sistem, kao sistemi s izmjeničnom strujom, koju je lako transformirati na visoki napon, imaju prednost pred istosmjernim sistemom, gdje se istosmjerna struja dobiva tek ispravljanjem izmjenične struje visokog napona.

c) Faktor snage dolazi do izražaja samo kod izmjenične struje smanjujući prenesenu snagu uz odredjenu struju u vodiču, pa u tom pogledu istosmjerni sistem ima prednost pred ostala dva sistema. No kod prijenosa električne energije u većim količinama i na veću udaljenost se putem kompenzacije faktor snage redovito dovodi na vrijednost blizu jedinici, pa se ova mana sistema s izmjeničnom strujom time praktički eliminira.

d) Trofazni sistem ima tu prednost pred ostala dva sistema, što se trofaznim sistemom može lako stvoriti okretno magnetsko polje, a isto tako što se namot može povoljnije raspodijeliti duž oboda statora kod strojeva. Na taj način trofazni sistem omogućuje jednostavniju i ekonomičniju gradnju strojeva, a u prvom redu motora. Kod jednofaznog sistema se ova mana može donekle ublažiti time, što se okretno polje može proizvesti stvaranjem umjetne druge faze, npr. pomoću kondenzatora.

e) U pogledu iskapčanja prednost imaju sistemi s izmjeničnom strujom, i to s razloga što kod njih struja prirodno prolazi kroz nulu, te se stvoreni električni luk na mjestu prekida u tom momentu sam po sebi gasi, te je potrebno samo spriječiti ponovno paljenje luka. Kod istosmjernog sistema nema te povoljne okolnosti, pa kod iskapčanja treba električni luk stvarno ugasiti, što stvara velike poteškoće naročito kod viših napona.

f) Kako utjecaj induktiviteta i kapaciteta dolazi do izražaja samo kod promjenjljivih struja i napona, to istosmjerni sistem ima u tom pogledu pred-

nost pred ostala dva sistema, jer kod njega u stacionarnom pogonu induktivitet i kapacitet ne dolaze do izražaja. Kod sistema s izmjeničnom strujom,gdje se momentalna vrijednost napona i struje neprestano mijenja po zakonu sinusa, dolaze do izražaja štetne posljedice utjecaja induktiviteta i kapaciteta, kao što su npr. induktivni pad napona i kapacitivne struje nabijanja.

g) U pogledu održavanja sinhronizma u pogonu opet istosmjerni sistem ima prednost pred jednofaznim i trofaznim sistemom, kod kojih je potrebno rotaciju generatora (koji su izvedeni kao sinhroni strojevi) održavati u strogom sinhronizmu, na koju su vezani odredjenom frekvencijom, jer u protivnom dolazi do gubitka stabilnosti pogona i do ispadanja iz pogona. Kod istosmjernog sistema, naprotiv, problem stabilnosti u ovom smislu ne postoji.

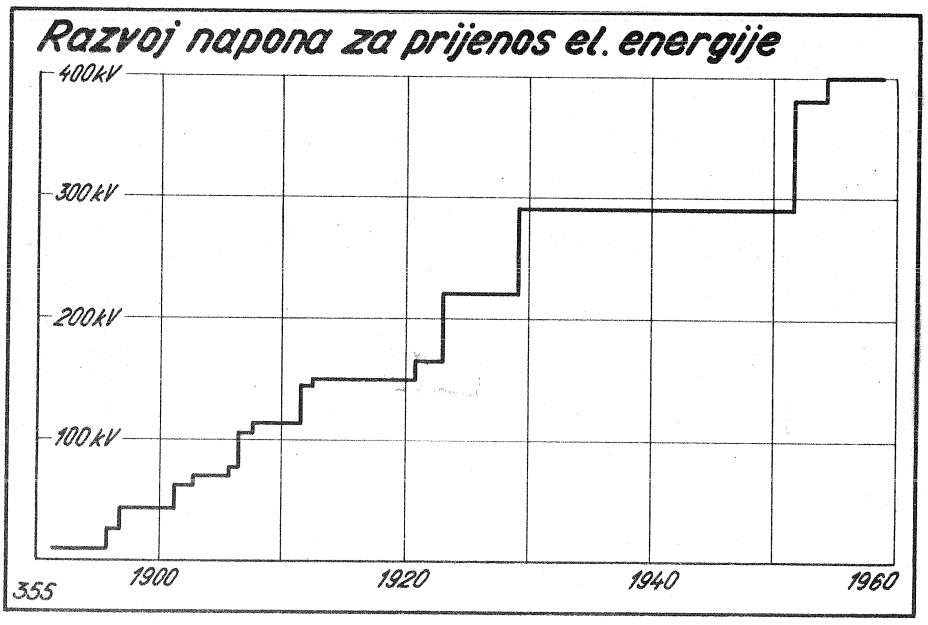
h) I u pogledu naprezanja izolacije istosmjerni sistem ima prednost pred sistemima s izmjeničnim naponom. Kod istosmjernog sistema, naime, izolacija je naprezana jednolično i to naponom koji ima vrijednost efektivnog napona u prijenosu energije. Kod jednofaznog i trofaznog sistema električno naprezanje izolacije (zbog sinusoidalnog oblika napona) dosiže naprotiv 1,41 puta veću vrijednost, a osim toga se to naprezanje sinusoidalno mijenja 5o puta u sekundi, što ima daljnje loše posljedice.

Iz gornjeg pregleda vidimo, da istosmjerni sistem ima veći broj prednosti od trofaznog, a pogotovu od jednofaznog sistema, pa je razumljiva prilično jaka tendencija u tehnici prijenosa električne energije, da se u tu svrhu koristi istosmjerni sistem prijenosa. Ipak zbog dviju velikih mana, i to zbog poteškoća u proizvodnji istosmjerne struje vrlo visokog napona a naročito zbog poteškoća kod iskapčanja, istosmjerni sistem nije uspio prodrijeti u tehnici prijenosa električne energije.

Danas se, dakle, za prijenos električne energije upotrebljava praktički jedino trofazni sistem, pa ćemo se u daljnim razmatranjima jedino njime i baviti. Jednofazni sistem se upotrebljava samo tamo, gdje je prednost imati samo dva vodiča umjesto tri, a to je slučaj kod željeznica. Istosmjerni sistem se upotrebljava zasada samo za prijenos energije podmorskim kabelima, gdje bi inače kapacitivne struje nabijanja dosegle daleko veću vrijednost nego što bi sam kabel mogao izdržati.

RAZVOJ NAPONA ZA PRIJENOS ELEKTRIČNE ENERGIJE

Prijenos električne energije u današnjem smislu riječi, tj. trofazni sistem prijenosa s naponima iznad loo kilovolta, razvio se u posljednjih pedesetak godina. Kako se u svijetu razvijala upotreba visokih napona za prijenos električne energije u praktične svrhe, prikazano je na slici 1.4.



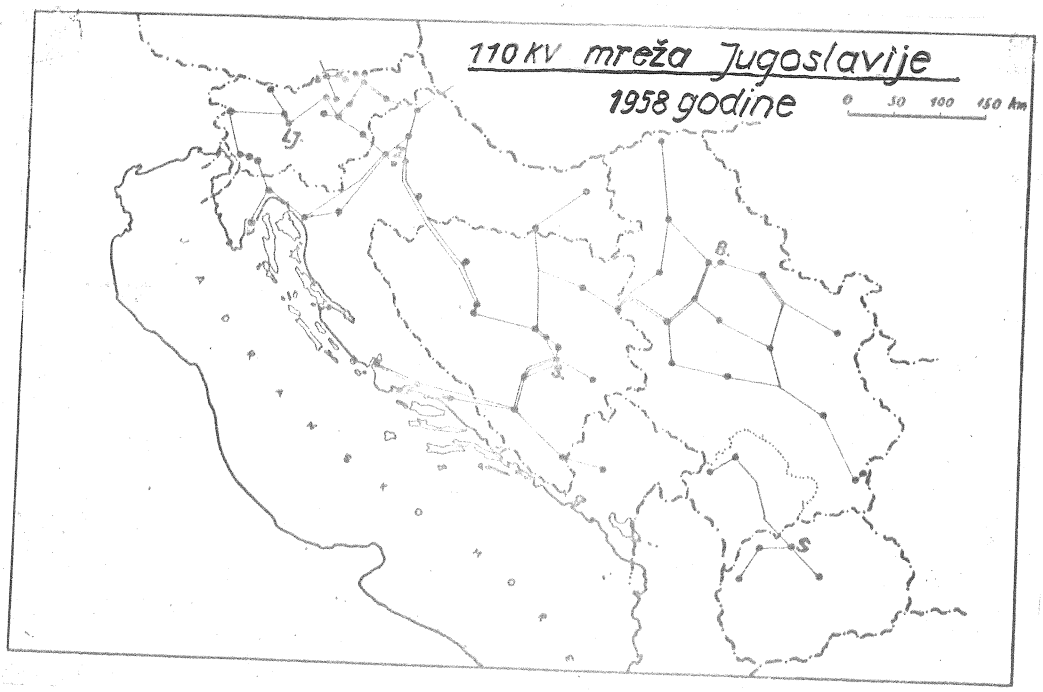
Sl. 1.4

Vidimo da početkom stoljeća u svijetu još nije bio u upotrebi niti napon od 5o kV, a da je upotrijebljeni napon prekoračio granicu od 1oo kV tek pred nekih pedeset godina. Pred nekih trideset godina upotrijebljen je napon od 287 kV na vodu Boulder Dam - Los Angeles (USA), i to je dugo vremena bio najviši napon na svijetu, sve dok u Švedskoj nisu početkom ovog decenija staviti u pogon svoj znameniti prijenos na dužini od hiljadu kilometara s naponom 38o kV. Brzo iza toga stavljen je u pogon prijenos s naponom od 4oo kV u SSSR-u, no to je praktički isti napon kao i u Švedskoj. Pogon s tolikim naponom postoji još u Francuskoj i Njemačkoj.

Kao što vidimo iz slike, upotreba sve viših napona u svijetu razvijala se doduše u stepenicama, ali ipak prilično jednolično. Do kojih napona će dosegnuti praksa trofaznog prijenosa električne energije i kada, to će pokazati budućnost. Danas je već prilično sigurno da će u SSSR-u kroz koju godinu prijeći na napon od 5oo kV, dok u Švedskoj danas studiraju prijenos s naponima do 65o kV.

MREŽA 11o kV U JUGOSLAVIJI

Da se dobije uvid u situaciju o 11o kV-mreži Jugoslavije, prikazano je na slici 1.5 stanje naše mreže za prijenos električne energije 1958 godine. Treba napomenuti, da prije Drugog svjetskog rata u Jugoslaviji nije bilo ni vodova ni stanica od 11o kV. Najviši napon bio je 8o kV, i to samo na jednom potezu (Fala - Laško u Sloveniji). Poslije rata je nakon perioda obnove uslijedila brza izgradnja 11o kV-mreže, i danas 11o kV-mreža prekriva čitav teritorij naše zemlje. Vodovi i stanice od 11o kV čine već jedan jedinstveni elektro-energetski sistem za čitavu zemlju, jedino još Makedonija i Kosmet nisu povezani s ostalom mrežom, ali će i to doskora biti. Osim vodova prikazanih



Sl. 1.5

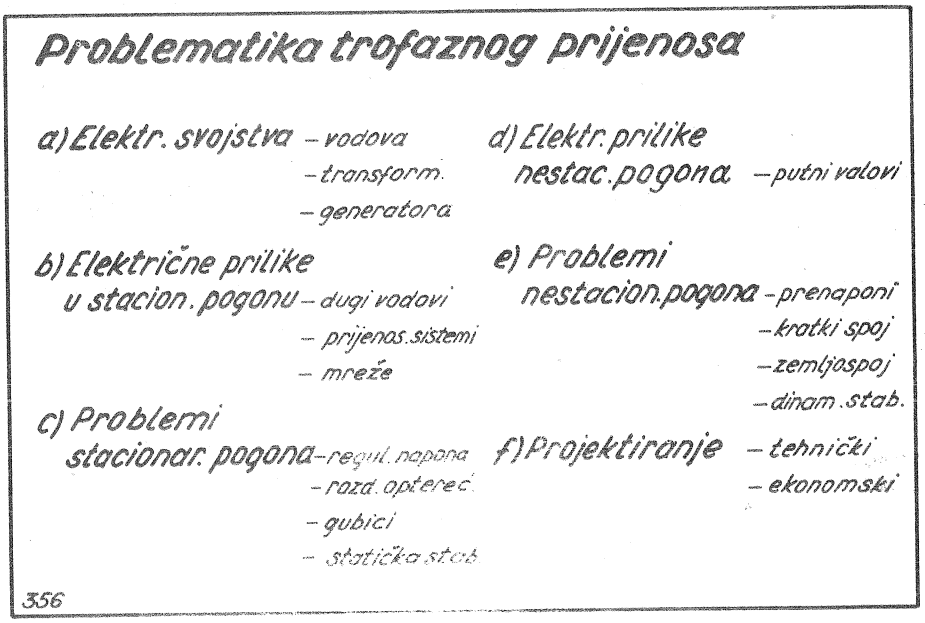
na slici, a koji su već svi u pogonu (iako nekoliko njih s manjim naponom od 11o kV), imamo u izgradnji još veliki broj vodova, koji će vrlo brzo biti stavljeni u pogon. Danas smo već u fazi izgradnje prvih vodova buduće 22o kV mreže, te su neki vodovi već i izgradjeni, ali se danas nalaze u pogonu još sa 11o kV.

PROBLEMATIKA TROFAZNOG PRIJENOSA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Kao što je rečeno, danas se općenito u svijetu za prijenos električne energije upotrebljava trofazni sistem, pa ćemo se i mi u našim daljnjim razmatranjima baviti isključivo njime, ukoliko nije izričito drugačije rečeno. Problematika s kojom ćemo se pri tome baviti dana je pregledno na slici 1.6.

a) U prvom redu treba se pozabaviti električnim svojstvima pojedinih dijelova prijenosnih sistema, i to nadzemnih vodova i kabela, a zatim transformatora i generatora. Budući da transformatori i generatori izlaze iz okvira prijenosa električne energije u užem smislu, a pogotovu zato, jer se njima detaljnije bave neka druga područja elektrotehnike, mi ćemo se ovdje prvenstveno i opširnije baviti samo vodovima, i to nadzemnim vodovima, koji se najčešće upotrebljavaju za prijenos, a zatim donekle i kabelima.

b) Nakon toga treba se pozabaviti električnim prilikama u stacionarnom pogonu, pri čemu naročitu važnost treba položiti na specifičnost dugih vodova, koji upravo zbog svoje dužine unose sasvim nove momente u električne prilike duž samog voda. Zatim se dakako treba pozabaviti i električnim prilikama u složenim prijenosnim sistemima te konačno i u mrežama najvišeg napona.



c) Vodjenje pogona donosi sa sobom svoje probleme, pa makar se radi samo o stacionarnom pogonu. Tu se radi o regulaciji napona, za kojeg želimo da se ne razlikuje mnogo od nazivnog napona ni na kojem mjestu mreže, i o razdiobi opterećenja na pojedine vodove u mreži, pri čemu ta razdioba može biti više ili manje povoljna. Nadalje se radi o gubicima snage i gubicima energije u mreži, s kojima se treba baviti, jer oni utječu na ekonomičnost čitavog pogona, i konačno o statičkoj stabilnosti tj. o granici stabilnog prijenosa snage u stacionarnom pogonu.

d) Osim stacionarnog pogona treba dakako proučavati i električne prilike u nestacionarnom pogonu, jer će nam to omogućiti da shvatimo razne pojave za vrijeme pogona u mreži i da se zaštitimo od njihovih štetnih posljedica. Pri tome u dugim vodovima dolazi do pojava, koje se brzinom svjetlosti šire duž vodova u obliku putnih valova, pa se njihovim izučavanjem treba naročito pozabaviti.

e) Nestacionarne prilike u pogonu donose sa sobom svoje probleme, to su u prvom redu prenaponi, kratki spojevi i zemljospojevi, što sve skupa predstavlja smetnje u pogonu, pa se moramo pozabaviti ne samo tim smetnjama dijelova nego i mogućnostima, kako da se od njih zaštitimo. Ovdje se nadalje pojavljuje i problem dinamičke stabilnosti, gdje se radi o tome, kako da održimo stabilan pogon usprkos nestacionarnih prilika u mreži.

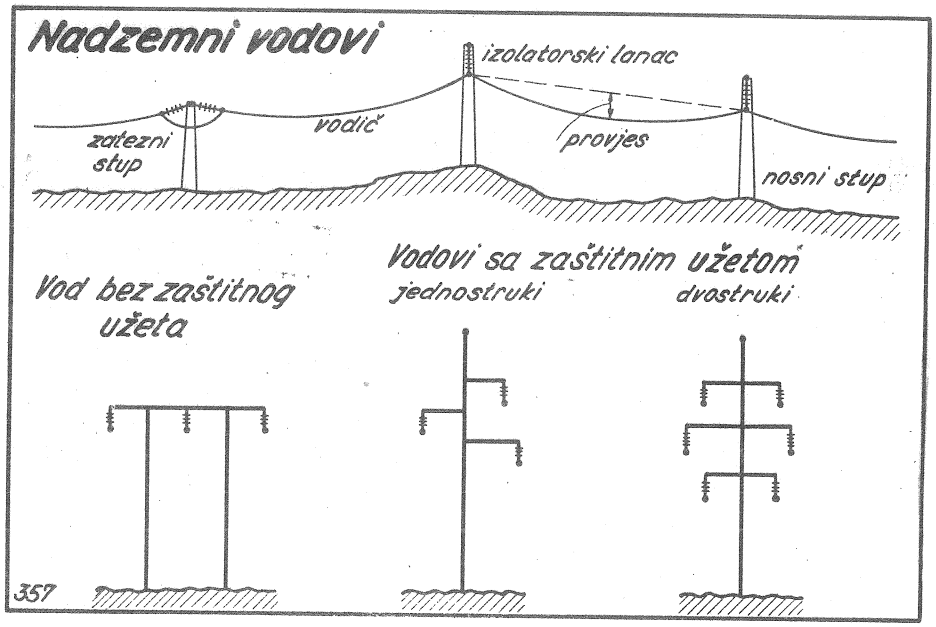
f) Konačno se treba pozabaviti i problemima u vezi s projektiranjem postrojenja za prijenos električne energije, pri čemu treba uvažiti ne samo svu tehničku nego i ekonomsku problematiku.

2. IZVEDBA NADZEMNIH VODOVA I KABELA

Da bismo mogli s većim razumijevanjem pratiti izlaganja o električnim problemima koja slijede, moramo se u potrebnoj mjeri upoznati s konstruktivnom izvedbom vodova za prijenos električne energije. Zbog toga ćemo u glavnim crtama opisati nadzemne vodove i njihove sastavne dijelove te kabele za prijenos energije. Potanje će biti opisana jedino izvedba vodiča, koliko to zahtijevaju daljnja razmatranja. Potanje razmatranje konstruktivne izvedbe nadzemnih vodova i kabela čini materiju posebnog predmeta.

NADZEMNI VODOVI

Kod nadzemnih vodova vodiči su izdignuti iznad zemlje izvan dohvata, te su preko izolatorskih lanaca obješeni na stupove. Stupove, koji samo nose vodiče, zovemo nosni stupovi, a stupove, koji osim toga služe i za zatezanje vodiča, zovemo zatezni stupovi (vidi sliku 2.1). Zatezanje vodiča je potrebno,



Sl. 2.1

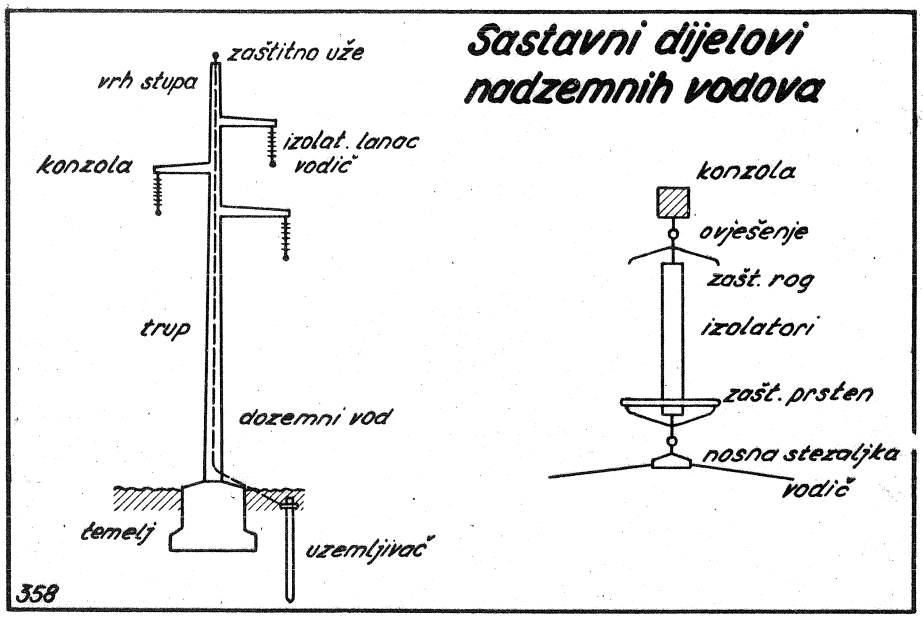
jer se vodič uslijed težine provjesi, i to tim više što je zatezanje manje. Najveću udaljenost vodiča i spojnice ovjesišta zovemo provjes. Visine stupova i provjesi moraju biti usklađeni tako, da vodič nigdje ne bude preblizu zemlji. Na gornjem dijelu slike dana je skica uzdužnog profila voda, na kojem se vide opisani odnosi.

Na donjem dijelu slike dane su kao primjer skice nekih stupova, kako ih vidimo u poprečnom presjeku voda. Stupovi su redovito gradjeni za tri ili za šest vodiča, odnosno za jednostruki ili za dvostruki vod. Jednostruki vod ima jednu "trojku" (tj. jedanput po tri vodiča), a dvostruki vod ima dvije "trojke" (tj. dva puta po tri vodiča). Osim toga vod može biti snabdjeven s jednim ili više zaštitnih užeta, koja su postavljena iznad vodiča i uzemljena, tako da štite vod od direktnog udarca munje u vodiče i uopće od atmosferskih prenapona. Raspored vodiča može biti različit, kao što se donekle vidi iz prikazanih primjera.

Iz gornjeg opisa vidimo, da vod prilično tačno možemo zamisliti kao skup veoma dugih ravnih vodiča u stalnom medjusobnom rasporedu i na nekoj stalnoj (prosječnoj) visini nad zemljom.

SASTAVNI DIJELOVI NADZEMNIH VODOVA

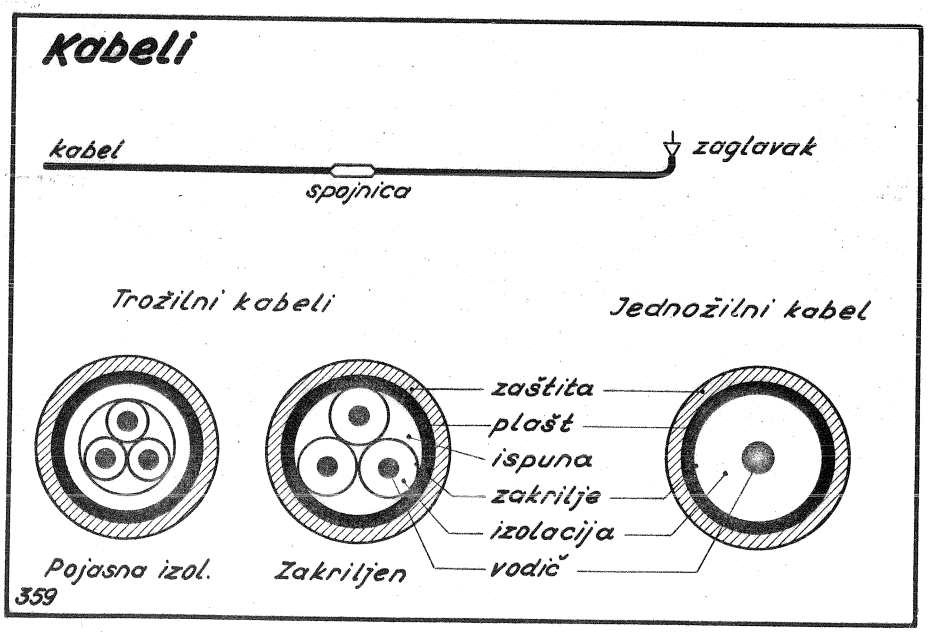
Na slici [illegible] prikazani su glavni sastavni dijelovi nadzemnih vodova. Kao što se vidi [illegible] lijevoj strani slike, stup se sastoji od vrha, trupa s konzolama i temelja. [illegible] stupa nosi zaštitno uže, a na konzolama su pričvršćeni



Sl. 2.2

izolatorski lanci s vodičima. Duž stupa je povučen dozemni vod, koji spaja zaštitno uže s uzemljivačem. Na dozemni vod su po potrebi priključeni i ostali dijelovi, koje treba uzemljiti, npr. ovješenja izolatorskih lanaca.

Na desnoj strani slike dani su detalji izolatorskog lanca, koji je na konzolu pričvršćen pomoću posebnog dijela za ovješenje. Izolatorski lanac se sastoji od potrebnog broja izolatora, a na donjem dijelu se nalazi stezaljka, pomoću koje je prihvaćen vodič. Izolatorski lanac često ima i zaštitnu armaturu, koja može biti izvedena ili u obliku rogova ili u obliku prstena. Rogovi služe da kod kvara udalje električni luk od izolatora, a prsten za jednoličniju razdiobu električnog naprezanja na pojedine izolatore u lancu.



Sl. 2.3

KABELI

Na slici 2.3 je u glavnim crtama prikazana izvedba kabela. Na gornjem dijelu slike su u skici uzdužnog profila kabela prikazani glavni dijelovi pribora, koji dolazi kod svih kabelskih instalacija. Tu imamo u prvom redu zaglavak na kraju kabela, koji služi za zatvaranje kabela na kraju i za prelaz vodiča iz kabela u instalaciju na otvorenom. Osim toga u kabelskoj instalaciji tedovito imamo i spojnice, koje služe za spajanje pojedinih dijelova kabela. Pojedine izvedbe kabela imaju još i daljnje dijelove pribora, koji su specifični za dotičnu izvedbu.

Na donjem dijelu slike prikazane su neke karakteristične izvedbe kabela u poprečnom presjeku. Za visoke napone kabeli se u pravilu izvode kao trožilni ili kao jednožilni. Kod trožilnih kabela za manje napone (npr. lo kV) upotrebljava se izvedba s pojasnom izolacijom, gdje se električno polje nesmetano proteže od jednog faznog vodiča do drugoga. Kod trožilnih kabela za više napone (3o kV i više) svaki fazni vodič ima svoju vlastitu izolaciju s uzemljenim metalnim zakriljem oko nje, pa su električne prilike kod takve izvedbe iste kao i kod jednožilnih kabela.

Izolacija visokonaponskih kabela se izvodi od impregniranog papira. Vodiči i izolacija nalaze se unutar plašta, koji se najčešće izvodi od olova, a oko plašta se redovito nalazi zaštita od mehaničkih i kemijskih utjecaja. Analogno kao i nadzemne vodove, i kabele možemo prilično tačno zamisliti kao skup veoma dugih ravnih vodiča u stalnom rasporedu medju sobom i prema uzemljenim dijelovima.

VODIČI I ZAŠTITNA UŽETA

Vodičima je svrha da vode struju, pa zbog toga od njih u prvom redu tražimo dobra električna svojstva, tj. da dobro vode električnu struju. No kako su vodiči nadzemnih vodova slobodno obješeni na stupove, te u stvari sami sebe nose, to se od njih traže i dobra mehanička svojstva, prvenstveno velika prekidna čvrstoća. Ovaj se zahtjev ne stavlja kod vodiča za kabele, jer kod njih ne dolazi do takvih mehaničkih naprezanja. Nadalje vodiči moraju biti kemijski postojani prema vanjskim utjecajima (što opet prvenstveno vrijedi kod nadzemnih vodova), da ne bi korodirali i tako s vremenom propali. I konačno, vodiči moraju zadovoljavati i u ekonomskom pogledu, što znači da udovoljavajući prije navedenim zahtjevima ujedno ne smiju biti preskupi.

Zaštitna užeta služe za zaštitu voda od atmosferskih prenapona, a na vodu su montirana na isti način kao i vodiči. Zbog toga se na njih postavljaju isti zahtjevi kao i na vodiče, samo zahtjev za dobro vodjenje struje nije tako jako izražen kao kod vodiča. Zbog toga se često zaštitna užeta izvode sa znatno većim električnim otporom nego vodiči, naročito u mrežama koje nemaju direktno uzemljeno zvjezdište. Inače se zaštitna užeta izvode na isti način kao i vodiči, tako da ono što ubuduće bude rečeno za vodiče, vrijedi i za zaštitna užeta, ukoliko nije izričito drugačije navedeno.

MATERIJAL ZA VODIČE

Na slici 2.4 dan je pregled materijala, koji se u praksi upotrebljavaju za vodiče nadzemnih vodova. Ujedno su navedeni i podaci o njihovim glavnim svojstvima, i to: električna vodljivost, specifična težina, ispitna čvrstoća i cijena prema stanju 1958 godine. Što se tiče postojanosti prema vanjskim utjecajima, ti podaci nisu dani, nego se može reći da su svi navedeni materijali dovoljno postojani prema vanjskim utjecajima, jer inače ne bi ni došli u obzir da se upotrijebe za vodiče nadzemnih vodova.

a) Od čistih kovina upotrebljavaju se bakar i aluminij, koji oba imaju dobru električnu vodljivost. U pogledu mehaničke čvrstoće bakar stoji mnogo bolje nego aluminij, ali aluminij ima u pogledu specifične težine znatnu prednost pred bakrom. Ipak se kod vodova za prijenos električne energije čisti bakar danas redovito ne upotrebljava, makar u pogledu električkih i mehaničkih svojstava sasvim zadovoljava. Razlog leži s jedne strane u cijeni, a s druge strane u činjenici da vodiči od bakra imaju razmjerno mali promjer, a to je nepovoljno u pogledu korone (o čemu će biti govora kasnije). Čisti aluminij se također razmjerno rijetko upotrebljava kod vodova za prijenos električne energije zbog razmjerno male prekidne čvrstoće.

b) Legure se kao materijal za vodiče upotrebljavaju onda, kad želimo imati veću mehaničku čvrstoću, ali to dakako ide na račun smanjenja električne vodljivosti. Od legura na bazi bakra upotrebljavaju se razne vrste bronca, ali to dolazi u obzir samo za pojačane dijelove voda, koji je inače izgradjen s

bakrenim vodičima, dakle kod vodova za prijenos električne energije veoma rijetko. Od legura na bazi aluminija u Srednjoj Evropi je najpoznatiji aldrej, od kojega su u nekim zemljama izvedeni čitavi vodovi. Kod nas se takvi vodiči ne upotrebljavaju, jer bi ih trebalo uvoziti iz inostranstva.

Materijal za vodiče		El. vodlj. $m/\Omega \cdot mm^2$	Spec. tež. kg/dm^3	Isp. čv. kg/mm^2	Cijena Din/kg
a) Kovine	bakar	56	8,9	40	1140
	aluminij	34,8	2,7	17-18	703
b) Legure	bronca	48-18	8,65-8,9	50-70	
	aldrej	30	2,7	30	
	čelik (pocinčani)	oko 7	7,8	40-150	
c) Kombinir. vodiči	bakar-čelik (40%)	—	8,25	60-108	
	alučel (6:1)	—	3,45	17/120	650
	aldrej-čelik (6:1)	—	3,45	30/120	

360

Sl. 2.4

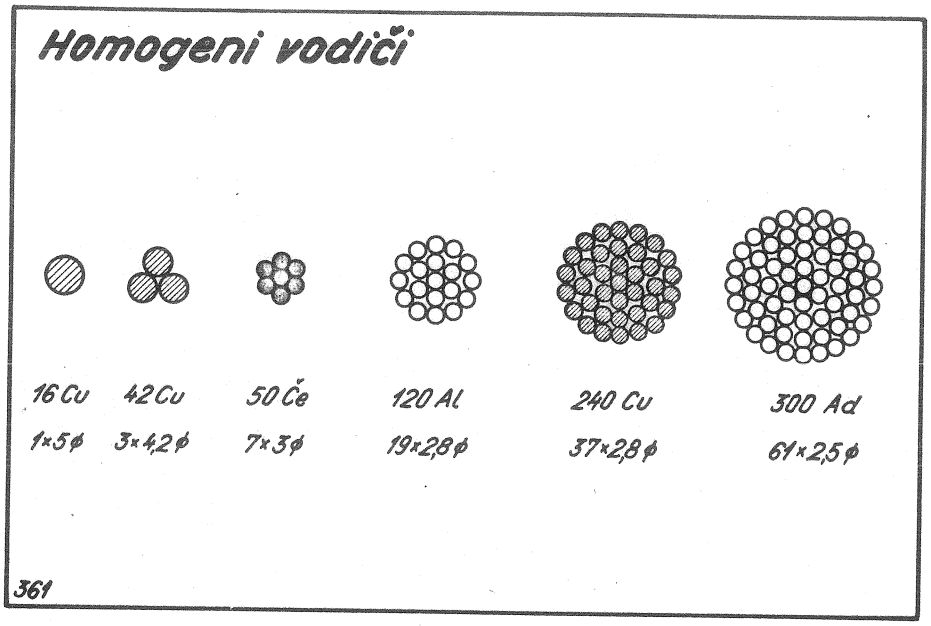
U grupu legura spada i čelik, koji se radi zaštite od korozije upotrebljava pocinčan. Čelik ima veoma veliku mehaničku čvrstoću ali malenu električnu vodljivost. Zbog toga se prvenstveno upotrebljava za zaštitna užeta. U iznimnim slučajevima upotrebljava se čelik i za vodiče, bilo kad je potrebna naročito velika mehanička čvrstoća, npr. kod velikih raspona preko dolina, rijeka, jezera ili moreuza (danas najveći raspon u svijetu iznosi 5 kilometara, a prelazi preko jednog fjorda u Norveškoj), bilo kad nije potrebna velika električna vodljivost, npr. kod sporenih odvojaka od vodova vrlo visokog napona, koji vode razmjerno malu struju, a zbog korone moraju imati veliki promjer (u rijetko naseljenim područjima SSSR-a i slično).

Osim vodiča od homogenog materijala (čiste kovine i legure) upotrebljavaju se i kombinirani vodiči, sastavljeni od dva razna materijala. Tu dolaze u obzir bakar-čelik, tj. žice od čelika obloženog bakrom ili užeta od takvih žica, zatim alučel (naziv nastao skraćivanjem od aluminij-čelik), tj. uže s jezgrom od čeličnih žica i plaštem od aluminijskih žica, i konačno aldrej-čelik, izveden analogno kao alučel. Kod svih ovih kombinacija čelik služi za mehaničko pojačanje. Od njih se najviše upotrebljava alučel, koji je danas u svijetu postao skoro isključivi materijal za vodove za prijenos električne energije. Bakar-čelik se upotrebljava u Americi, a aldrej-čelik se upotrebljava sasvim rijetko.

IZVEDBA VODIČA

Prema izvedbi možemo vodiče podijeliti na: (a) homogene vodiče, (b) kombinirane vodiče, i (c) specijalne vodiče.

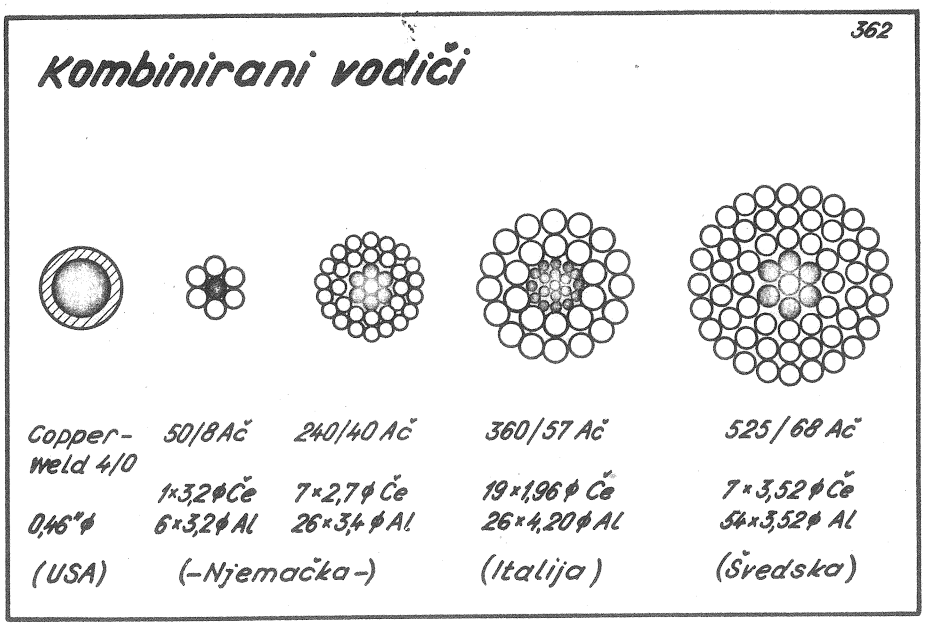
a) Izvedbe homogenih vodiča prikazane su na slici 2.5. Najjednostavnija je izvedba u obliku masivne žice, te je kao primjer takve izvedbe na slici prikazan bakreni vodič presjeka 16 mm^2 (skraćeno: 16 Cu), koja se sastoji od jedne žice promjera 5 mm (skraćeno: 1 x 5 Ø). Ovakva se izvedba upotrebljava samo za male presjeke, pa kod vodova za prijenos električne energije ne dolazi u obzir. Kod većih presjeka vodiči se izvode u obliku užeta sukanih od većeg broja žica, tako da se dobije vodič, koji je dovoljno gibak. Užeta od tri žice se rijetko upotrebljavaju. Normalno se užeta izvode od jedne srednje žice i šest žica sukanih oko nje, te po potrebi i daljnjih slojeva žice, pri čemu je svaki sloj sukan u drugom smjeru. Sve žice imaju isti promjer, pa iz geometrijskih razloga svaki slijedeći sloj ima šest žica više. Tako broj žica u užetu



Sl. 2.5

dobijemo, ako uzmemo odgovarajući broj članova iz slijedećeg niza: 1 + 6 + 12 + + 18 + 24 + 3o + ... Na slici su kao primjer prikazana takva užeta, i to: čelično uže od 5o mm^2, aluminijsko uže od 12o mm^2, bakreno uže od 24o mm^2 te uže od aldreja s presjekom 3oo mm^2.

b) Neke izvedbe kombiniranih vodiča prikazane su na slici 2.6. U prvom redu prikazan je vodič od čelika obloženog bakrom s oznakom "Copperweld 4/O" kakav se upotrebljava u Americi. Zatim su prikazane neke izvedbe alučela. Kod užeta od alučela koje ima ukupni presjek aluminija 5o mm^2 i presjek čelika 8 mm^2 (skraćeno 5o/8 Ač), čelična jezgra sastoji se samo od jedne žice promjera 3,2 mm, oko koje se nalazi šest žica od aluminija istog promjera. Općenito promjeri čeličnih i aluminijskih žica nisu isti, ako se želi postići određeni omjer presjeka aluminija prema čeliku, koji kod srednjoevropskih izvedaba obično

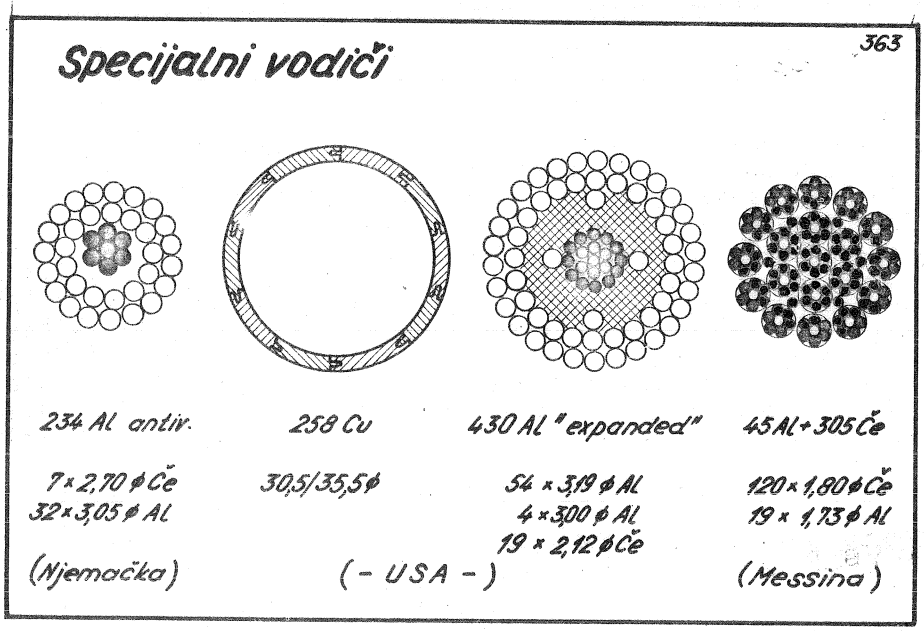


Sl. 2.6

iznosi oko 6:1. Kao primjer takvih izvedaba prikazan je vodič 24o/4o Ač (prema njemačkom standardu), koji se kod nas redovito upotrebljava za 11o kV-ne vodove, te vodič 36o/57 Ač (prema talijanskom standardu), koji je kod nas upotrijebljen za 22o kV-ni vod Mostar-Split. Konačno je na slici prikazana izvedba vodiča 525/68 Ač, koja je upotrijebljena na prvom 38o kV-nom vodu u Švedskoj.

c) Na slici 2.7 prikazane su neke specijalne izvedbe vodiča. U prvom redu prikazano je tzv. antivibraciono uže, kojoj izvedbi je svrha da smanji vibracije vodiča, od kojih u pogonu dolazi do umora materijala i prekida vodiča. Takvo je uže izvedeno slično kao obično uže od alučela, samo što je ostavljen zračni razmak izmedju čelične jezgre i aluminijskog plašta. Kod montaže se posebno zateže plašt a posebno jezgra, pa uslijed nejednake frekvencije vibracija dolazi do prigušenja. Zbog složenosti kod proizvodnje, montaže i uzdržavanja ovakva se užeta rijetko upotrebljavaju.

Dalje je prikazan šuplji vodič od bakra s presjekom od 258 mm^2 i vanjskim promjerom 35,5 mm. Takav je vodič upotrijebljen na 287 kV-nom vodu Boulder Dam - Los Angeles u Americi. Ova se izvedba sastoji od profiliranih spirala, koje zahvataju jedna u drugu i na taj način se dobiva oblik cijevi, koja je u izvjesnoj mjeri gipka. Ima i drugih izvedaba šupljih vodiča, npr. od jednog ili dva sloja okruglih žica oko šupljine, koja se održava posebnim umetkom. Šuplji vodiči nastali su u težnji da se dobije dovoljni promjer obzirom na koronu, a da se ne utroši više materijala nego što je potrebno za dobivanje dovoljno malenog električnog otpora. Šuplji vodiči se danas razmjerno malo upotrebljavaju zbog složene proizvodnje, montaže i uzdržavanja.



Sl. 2.7

Nadalje je prikazan tzv. ekspandirani vodič, koji izmedju jezgre od čelika i plašta od aluminija ima umetnut sloj papira. I ova je izvedba nastala u težnji da se dobije dovoljan promjer obzirom na koronu bez suvišnog utroška materijala za vodič. Takvi se vodiči upotrebljavaju u Americi pod nazivom "expanded", a imaju prednost pred šupljim vodičima, što se s njima barata kao i sa svakim drugim punim vodičem.

Konačno postoje još sasvim specijalne izvedbe vodiča za specijalne svrhe. Od tih je kao primjer prikazan vodič, koji je upotrijebljen za prelaz 22o kV-nog voda iznad Messinskog tjesnaca (izmedju kopna Italije i Sicilije, raspon oko 3,6 km). Čitav je vodič sastavljen od 19 (1 + 6 + 12) elementarnih užeta, koje se svako sastoji od jedne aluminijske žice u sredini i šest čeličnih žica oko nje, a u nastale medjuprostore umetnuto je daljnjih šest čeličnih žica. Uže se prema tome sastoji pretežno od čeličnih žica, tako da ima potrebnu mehaničku čvrstoću za ovako veliki raspon.

Glava II

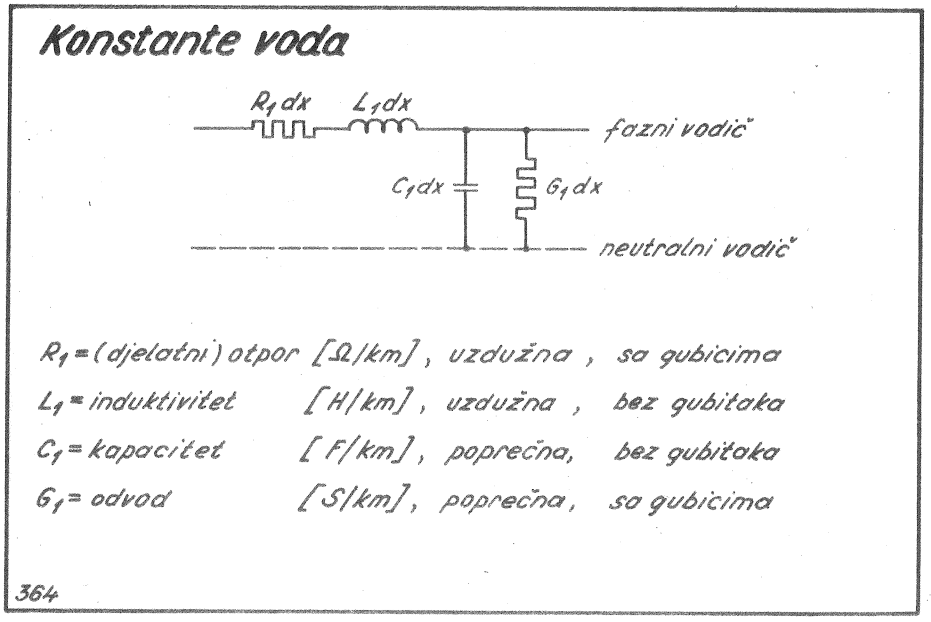
K O N S T A N T E V O D A

3. OPĆENITO O KONSTANTAMA VODA

Konstante voda su osnovna električna svojstva voda, te iz njih slije - de sva ostala njegova svojstva i karakteristike, o kojima će ovisiti električ - ne prilike u vodu. Konstante voda ovise (1) o svojstvima materijala od kojih je vod izveden (npr. specifični otpor materijala za vodiče, dielektričnost izolacije kod kabela), (2) o geometrijskim svojstvima voda (npr. dimenzije vodiča, udaljenosti i raspored medju vodičima), i (3) o okolnim prilikama (npr. temperatura, kiša). Vodovi, koji su inače izvedeni na isti način, općenito se razlikuju po dužini, pa zbog toga konstante voda definiramo po jedinici dužine, obično po kilometru.

Konstante voda su:(1) otpor, (2) induktivitet, (3) kapacitet, i (4) odvod, a mjerimo ih u omima, henrijima, faradima odnosno simensima, sve po kilometru. Kod trofaznih vodova konstante se daju po fazi, dakle za jedan fazni vodič, s time da se kao povratni dio strujnog kruga uzme zamišljeni neutralni vodič. Na slici 3.1 su za odsječak voda dužine "dx" konstante voda prikazane pomoću grafičkih simbola, i to otpor i induktivitet u faznom vodiču, a kapacitet i odvod izmedju faznog i neutralnog vodiča. Po položaju u takvoj shemi spoja možemo konstante voda podijeliti u uzdužne (otpor i induktivitet) i u poprečne (kapacitet i odvod). Po tome, da li u njima nastaju gubici energije ili ne, možemo ih podijeliti na one sa gubicima (otpor i odvod) i one bez gubitaka (induktivitet i kapacitet).

Sve četiri konstante voda ne uzimaju se uvijek u račun. Dok se kod vodova niskog napona računa često samo s otporom, a kod vodova srednjeg napona (do nekih 35 kV) s otporom i induktivitetom, dotle kod vodova za prijenos električne energije (11o kV i više) treba svakako uzeti u račun i kapacitet, a kod vodova najvišeg napona (22o i 38o kV) i odvod. Kod vodova za prijenos električne energije često se zanemaruje otpor i odvod, te se uzima u račun samo induktivitet i kapacitet, kad se istražuju električne prilike u dugim vodovima, da bi se pojednostavnio proračun i dobili pregledniji rezultati. Kod proračuna struja kvara često se sa zanemarenjem ide još i dalje, pa se za struju kratkog spoja uzima u račun samo induktivitet, a za struju zemljospoja samo kapacitet voda.



Sl. 3.1

Konstante voda daju se po jedinici dužine voda, te u njihovom utjecaju na prilike u vodu ima dužina voda veliki značaj. Zato treba i o njoj reći par riječi. Kao dužinu voda treba, naravno, uzeti stvarnu dužinu voda. Tu dužinu možemo izvaditi iz nacrta profila voda, u kojem su upisane stvarne dužine pojedinih raspona, izmjerene na terenu. Medjutim na ovaj način dobivamo dužinu horizontalne projekcije voda, a zbog neravnosti terena stvarna dužina je nešto veća, ali se ta razlika redovito zanemaruje. Budući da vodiči u rasponu imaju svoj provjes, to je dužina vodiča nešto veća od dužine voda, ali se i ova razlika redovito zanemaruje. Tu dužinu možemo eventualno dobiti i na taj način, da je izmjerimo duž trase ucrtane na karti. Zbog krivudanja trase po terenu dužina trase je veća od zračne udaljenosti izmedju krajnih tačaka. To povećanje iznosu u prosjeku 10%, i prema naravi terena varira otprilike izmedju 4 i 25%.

4. O T P O R V O D A

OPĆENITO O OTPORU

Otpor je svojstvo voda, koje dolazi do izražaja zbog toga, što se vod odupire protjecanju električne struje. Otpor voda po kilometru dužine označujemo sa "R_1". On je definiran padom napona po jedinici dužine voda, ako u vodu teče istosmjerna struja jakosti 1 amper. Isto tako može biti definiran gubitkom snage po jedinici dužine voda, u kojem teče struja od 1 ampera.

Uz pretpostavku da je otpor voda u danim prilikama konstantan, možemo ga definirati izrazima (1) u slici 4.1 .

Otpor

$$R_1 = \frac{U}{I} = \frac{P}{I^2} \quad [\Omega/km] \qquad \ldots(1)$$

U = pad napona [V/km]

I = struja (istosmjerna) [A]

P = gubitak snage [W/km]

$$R_1 = \frac{\rho}{A} \quad [\Omega/km] \qquad \ldots(2)$$

ρ = specifični otpor [$\Omega \cdot mm^2/km$]

A = presjek vodiča [mm^2]

365

Sl. 4.1

Vodič (od homogenog materijala) možemo zamisliti da je sastavljen od paralelnih niti presjeka 1 mm^2. Otpor takve niti duge 1 km ovisi samo o svojstvima materijala i naziva se specifični otpor. Pad napona u svim nitima mora biti medjusobno jednak, jer su one paralelno spojene. To znači, da kod istosmjerne struje u vodiču u svakoj niti teče isti dio ukupne struje. Drugim riječima struja je svugdje ista. Odatle slijedi da otpor možemo računati prema izrazu (2), ako u vodiču teče istosmjerna struja.

Kao što smo vidjeli, otpor voda utječe na razdiobu struje po presjeku vodiča tako, da gustoća struje bude svugdje ista. Kao što je poznato, takva razdioba struje dovodi do najmanjih gubitaka snage odnosno energije u vodu. Jednolična razdioba struje po presjeku homogenog vodiča postiže se samo kod istosmjerne struje, kod koje nema drugih utjecaja na razdiobu struje.

UTJECAJ MATERIJALA I TEMPERATURE

Specifični otpor je svojstvo materijala vodiča, kojim materijal utječe na otpor voda. Što je manji specifični otpor, to će biti manji i otpor voda.Na slici 4.2 dane su vrijednosti za vodljivost i za specifični otpor nekih materijala, koji se najčešće upotrebljavaju za vodove, i to kod temperature od 2o°C.

Utjecaj materijala i utjecaj temperature

Materijal	γ kod 20°C $m/\Omega \cdot mm^2$	ρ kod 20°C $\Omega \cdot mm^2/km$	$\Delta\rho$ $\Omega \cdot mm^2/km, °C$
Bakar, meki	57	17,54	
Bakar, tvrdi $\phi \geq 1mm$	56	17,86	0,068
Bakar, tvrdi $\phi < 1mm$	55	18,18	
Aluminij, meki	36	27,78	
Aluminij, tvrdi	34,8	28,75	0,11
Bronca I	48	20,85	
Bronca II	36	27,80	
Bronca III	18	55,60	
Aldrej	30	33,33	

366

Sl. 4.2

Temperatura ima utjecaj na specifični otpor, pa prema tome i na otpor voda, tako da se ovi povećavaju s temperaturom. U granicama, koje u praksi kod prijenosa električne energije dolaze u obzir, specifični otpor se mijenja linearno s temperaturom. Povećanje specifičnog otpora za neke materijale, i to za 1°C dano je takodjer na slici.

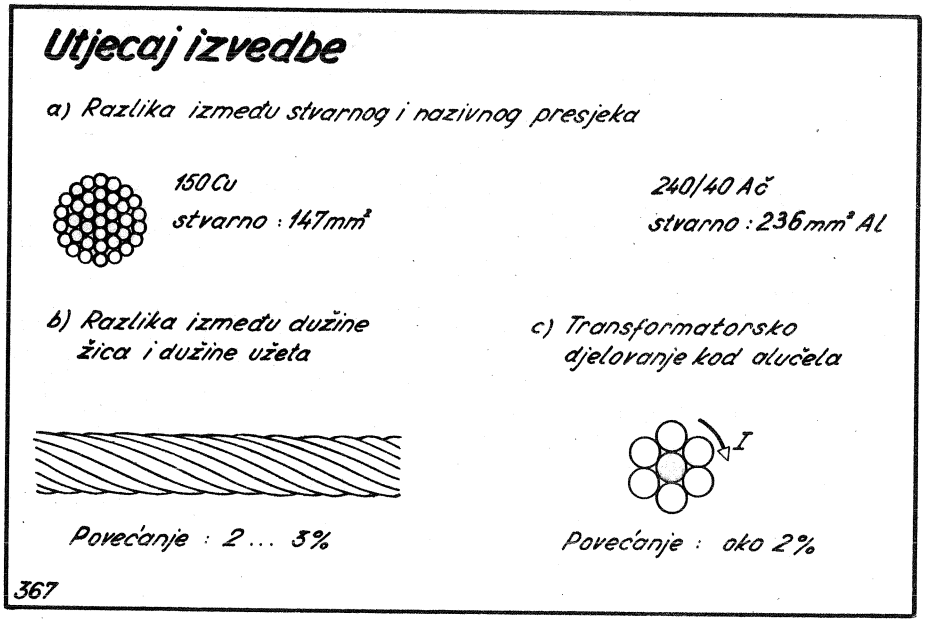
Temperatura vodiča, pa prema tome i njegov otpor, ovisi o temperaturi uzduha, o zagrijavanju uslijed sunčevog isijavanja, o zagrijavanju uslijed Džaulove topline i o hladjenju uslijed vjetra. Često računamo s nekom prosječnom temperaturom vodiča, npr. 2o°C. Ipak gdjekada moramo računati sa stvarnom temperaturom, jer to ima znatan utjecaj na otpor voda. Tako npr. specifični otpor bakra kod -2o°C iznosi 15,14 om.mm^2/km, a kod +8o°C iznosi 21,94 om.mm^2/km, što je za 45% više.

UTJECAJ IZVEDBE VODIČA

Razni utjecaji izvedbe vodiča na otpor prikazani su na slici 4.3.

a) U prvom redu treba voditi računa o razlici stvarnog i nazivnog presjeka vodiča, te u račun uzeti stvarni a ne nazivni presjek. Nazivni presjek je zaokružena vrijednost stvarnog presjeka. Tako npr. vodič 15o Cu, tj. bakreni vodič nazivnog presjeka 15o mm^2 ima stvarni presjek 147 mm^2. Stvarni presjek užeta dobivamo kao sumu presjeka pojedinih žica, od kojih je uže sastavljeno. Stvarni presjek užeta je znatno manji od presjeka kružnice opisane vodiču, i to zbog šupljina izmedju žica. Omjer izmedju ta dva presjeka nazivamo faktorom punjenja, i on za različite izvedbe vodiča iznosi 75-78%. Kod vodiča kombiniranih sa čelikom obično čelik ne uzimamo u račun za vodjenje struje, pa tako npr. kod alučela otpor računamo samo obzirom na aluminijski plašt.

b) Nadalje na veličinu otpora ima utjecaj razlika izmedju dužine žica i dužine užeta. Uže je naime sastavljeno od žica, koje su u pojedinim slojevima sukane, tako da imaju oblik spirale. Zbog toga je dužina pojedinih žica veća od dužine samog užeta. Struja pak teče kroz vodič držeći se pojedinih žica, jer se žice medjusobno dodiruju malom površinom, a osim toga se uslijed oksidacije na površini žica stvori loše vodljivi sloj. Struja prema tome mora preći duži put nego što je dužina užeta, pa to rezultira u povećanju otpora od 2-3%.



Sl. 4.3

c) Konačno kod užeta od alučela imamo povećanje otpora uslijed tzv.transformatorskog djelovanja. Struja, koja teče duž aluminijskih žica, teče u stvari oko čelične jezgre, u kojoj uslijed izmjeničnog magnetskog polja dolazi do gubitaka. To opet rezultira kao povećanje otpora. Ovo djelovanje dolazi najviše do izražaja kod užeta s jednim slojem aluminijskih žica, gdje sva struja teče oko jezgre u istom smislu vrtnje. Kod više slojeva se djelovanje struje u pojedinim slojevima medjusobno donekle poništava, jer su susjedni slojevi sukani u suprotnom smjeru. Povećanje otpora uslijed transformatorskog djelovanja kod alučela iznosi u prosjeku 2%.

Podatke o otporu pojedinih vodiča najbolje je uzeti iz tabela u priručnicima (koje su tabele izradjene prema standardima za vodiče odnosno prema podacima proizvodjača), gdje su redovito uzeti u račun i svi navedeni utjecaji izvedbe. Pri svemu tome treba imati na umu još jedan utjecaj izvedbe, a to je netačnost u proizvodnji, zbog čega mogu nastati odstupanja i do $\pm$ 1,5%.

UTJECAJ FREKVENCIJE - SKINEFEKT

Ako u vodiču teče istosmjerna struja, razdioba struje po presjeku bit će jednolična, kao što smo već prije rekli. Pri takvoj razdiobi struje po presjeku bit će Džaulovi gubici u vodiču minimalni, pa će prema tome i otpor vodiča biti minimalan. Kod nejednolične razdiobe struje po presjeku bit će Džaulovi gubici u vodiču veći, pa će zbog toga i otpor vodiča biti veći. Nejednoličnu razdiobu struje po presjeku imat ćemo npr. ako u vodiču ne teče istosmjerna nego izmjenična struja, kao što ćemo to u daljnjem razmatranju pokazati. Pri tome je gustoća struje najmanja u sredini vodiča a najveća na površini vodiča. Ta se pojava zove skinefekt (skin na engleskom jeziku znači koža, ljuska), jer struja kod jakog skinefekta teče uglavnom u ljuski ispod površine vodiča.

Skinefekt možemo objasniti na slijedeći način. Struja u vodiču stvara magnetski tok, a linije tog magnetskog toka su koncentrične kružnice sa središtem u središtu vodiča. Magnetski tok se nalazi djelomično izvan vodiča i djelomično unutar njega. Magnetski tok izvan vodiča ulančen je sa svim strujnicama u vodiču, pa prema tome nema utjecaja na raspodjelu struje u vodiču, i taj dio toka možemo iz daljnjeg razmatranja skinefekta izostaviti. Magnetski tok unutar vodiča, naprotiv, nije jednako ulančen sa svim strujnicama. Strujnica u sredini vodiča ulančena je sa svim linijama magnetskog toka, pa prema tome ima najveći induktivni otpor, a strujnica na površini vodiča nije ulančena ni sa jednom linijom toka, pa prema tome ima najmanji induktivni otpor. Impedancije pojedinih strujnica se, dakle, medjusobno razlikuju, i to i po iznosu i po faznom kutu. Ali pad napona duž svih strujnica mora biti isti, jer se radi o

jednom te istom vodiču. Zbog toga se struje u pojedinim strujnicama moraju međusobno razlikovati, i to po iznosu i po fazi. Što se strujnica nalazi bliže središtu vodiča, to će imati veći induktivni otpor, pa će struja u njoj biti manja po iznosu i više će zaostajati po fazi.

Navedeno tumačenje iskoristit ćemo kasnije za proračun skinefekta. Zasada možemo ipak već utvrditi, da će skinefekt to jače doći do izražaja što je: (1) presjek vodiča veći (jer je nejednolikost ulančenja linija magnetskog toka veća), (2) permeabilnost materijala vodiča veća (jer je induktivitet pojedinih strujnica veći), (3) frekvencija struje veća (jer je utjecaj induktiviteta zbog brže promjene struje veći, tj. induktivni otpor je veći), i (4) specifični otpor materijala vodiča manji (jer u impedanciji pojedinih strujnica jače prevladava induktivni otpor).

Na temelju rečenog možemo izvesti i ovaj zaključak. Impedancija svake strujnice sastoji se od dva člana, tj. od djelatnog otpora i od induktivnog otpora. Što jače dolazi do izražaja djelatni otpor, to će struja biti jednoličnije raspodijeljena po presjeku. U tom pogledu imamo krajnji slučaj kod istosmjerne struje, gdje induktivni otpor uopće ne postoji, pa dolazi do izražaja jedino djelatni otpor i raspodjela struje po presjeku je potpuno jednolična. Naprotiv, što jače dolazi do izražaja induktivni otpor, to će raspodjela struje biti manje jednolična. U tom pogledu imamo krajnji slučaj npr. kod stanja supravodljivosti, gdje djelatni otpor praktički padne na nulu, pa dolazi do izražaja jedino induktivni otpor i struja teče praktički samo po površini vodiča.

U stvarnim prilikama kod vodova za prijenos električne energije dolaze do izražaja oba utjecaja, i djelatni i induktivni otpor. Raspodjela struje po presjeku vodiča bit će dakle u izvjesnoj mjeri nejednolična. Djelatni otpor vodiča kod izmjenične struje ne smijemo dakle više računati prema formuli, koja vrijedi za istosmjernu struju. Makar su specifični otpor vodiča i presjek vodiča ostali isti, otpor vodiča kod izmjenične struje je veći nego kod istosmjerne struje, i to zbog nejednolične raspodjele struje po presjeku. Odnos djelatnog otpora vodiča kod izmjenične struje prema otporu vodiča kod istosmjerne struje nazivamo faktorom skinefekta.

PRETPOSTAVKE ZA PRORAČUN SKINEFEKTA

Pojavu skinefekta možemo obuhvatiti matematskim proračunom. Radi pojednostavnjenja postupka potrebno je uvesti neke pretpostavke i zanemarenja. Pretpostavke za proračun skinefekta i posljedice koje iz toga slijede pregledno su navedene na slici 4.4.

a) U prvom redu proračun ćemo izvršiti za struje (pa prema tome i napone), koje se sinusoidalno mijenjaju s vremenom. Ova pretpostavka uglavnom odgovara slučaju u praksi, koji nas zanima. Posljedica ove pretpostavke je ta, da se možemo koristiti simboličkim računom, što znatno pojednostavnjuje matematske izraze.

b) Nadalje ćemo račun provesti za vodič u obliku okrugle masivne žice od homogenog materijala. Ovo ograničenje je samo donekle opravdano, jer vodiči za prijenos električne energije redovito imaju oblik užeta. No mi ćemo kasnije ovdje dobivene rezultate proširiti i na užeta. Kod ovakvog oblika vodiča raspodjela struje u vodiču i slika magnetskog polja bit će centralno simetrične obzirom na središte vodiča, a zbog toga što je pretpostavljeno da je vodič masivan, dobit ćemo jednostavnije matematske izraze.

c) Kao daljnju pretpostavku uzet ćemo, da ista struja koja udje na jednom kraju u promatrani dio vodiča izadje na drugom njegovom kraju, tj. pretpostavit ćemo da nema odvajanja struje u poprečne grane, kao da vod nema ni kapaciteta ni odvoda. Ovo dakako nije sasvim tačno, ali nam znatno olakšava proračun, jer možemo smatrati da se struja duž promatrane strujnice u vodiču ne mijenja.

d) Dalje ćemo pretpostaviti da struja svugdje teče paralelno s osi vodiča. Ova se pretpostavka opravdava s prije uvedenom pretpostavkom da nema odvajanja struje. Posljedica ove pretpostavke je ta, da padovi napona postoje samo uzduž vodiča i da radijalnih padova napona nema.

e) Konačno ćemo pretpostaviti da svojstva materijala, od kojih je načinjen vodič, ne ovise o struji. U vezi s pretpostavkom o homogenosti materijala vodiča to znači da će i specifični otpor, i permeabilnost vodiča biti konstantni po presjeku i po vremenu. Ova pretpostavka donekle vrijedi za specifični otpor, a za permeabilnost vrijedi samo za nemagnetske materijale. Dobiveni rezultati neće se dakle moći direktno primijeniti na vodiče od magnetskih materijala, npr. na čelična užeta.

Skinefekt-pretpostavke za proračun

a) Struja sinusoidalno promjenljiva s vremenom – može se upotrebiti simbolički račun.

b) Vodič u obliku okrugle homogene žice – raspodjela struje i slika magnetskog polja centralno simetrične.

c) Nema odvajanja struje u poprečne grane – struja duž promatrane strujnice je konstantna.

d) Struja svugdje paralelna s osi vodiča – nema radijal. padova napona.

e) Svojstva materijala vodiča neovisni o struji – specifični otpor ρ i permeabilnost μ su konstantni po presjeku i po vremenu.

368

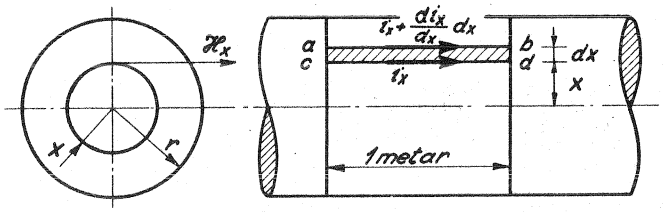
Sl. 4.4

PRORAČUN RASPODJELE STRUJE

Proračun raspodjele struje po presjeku vodiča prikazan je na slikama 4.5 do 4.7. Promatramo odsječak vodiča dužine 1 metar, slika 4.5, i na tom odsječku dvije strujnice "ab" i "cd". Jedna se strujnica nalazi na udaljenosti "x" od središta, a medjusobni razmak strujnica iznosi "dx". Na slici su ujedno prikazane gustoće struje na ove dvije strujnice.

Najprije ćemo provesti proračun u pogledu magnetskog polja na udaljenost "x" od središta. Jakost struje, gustoća struje i jakost magnetskog polja su kompleksne veličine, jer primjenjujemo simbolički račun. Prvo nam je potrebna jakost struje unutar radiusa "x", jer je ta struja obuhvaćena silnicom magnetskog polja. Tu struju dobijemo, ako gustoću struje integriramo od sredi-

Skinefekt-proračun raspodjele struje



i_x = gustoća struje na udaljenosti x

Struja unutar radijusa $x = \mathcal{J}_x = \int_0^x i_x 2\pi x \, dx$ ... (1)

Magn. polje na udaljenosti $x = \mathcal{H}_x = \frac{\mathcal{J}_x}{2\pi x} = \frac{1}{x}\int_0^x i_x x \, dx$ ... (2)

(2) množimo sa x ... $\mathcal{H}_x x = \int_0^x i_x x \, dx$

diferenciramo po x ... $\frac{d\mathcal{H}_x}{dx} x + \mathcal{H}_x = i_x x$

dijelimo sa x ... $\frac{d\mathcal{H}_x}{dx} + \frac{\mathcal{H}_x}{x} = i_x$ ... (3)

369

Sl. 4.5

šta do te silnice, izraz (1). Jakost magnetskog polja dobijemo, ako obuhvaćenu struju dijelimo s dužinom silnice (iz razloga simetrije jakost magnetskog polja duž čitave silnice ima istu vrijednost), izraz (2). Ako sada izraz (2) sredimo, i to tako da ga množimo sa "x", pa ga diferenciramo po "x", i konačno podijelimo sa "x", dobijemo izraz (3), koji nam daje medjusobni odnos jakosti magnetskog polja i gustoće struje na istoj udaljenosti od središta.

Skinefekt-proračun raspodjele struje(nastavak)

Magnetski tok kroz "abdca" = $\mu \mathcal{H}_x dx$ ... (4)

Inducirani napon u "abdca" = $\mu j\omega \mathcal{H}_x dx$ ... (5)

Razlika pada napona u "ab" i "cd" = $\rho i_{ab} - \rho i_{cd} = \rho \frac{di_x}{dx} dx$ ... (6)

(5) = (6) ... $\mu j\omega \mathcal{H}_x dx = \rho \frac{di_x}{dx} dx$

odatle ... $\mathcal{H}_x = \frac{\rho}{\mu j\omega} \frac{di_x}{dx}$ ... (7)

(7) u (3) ... $\frac{\rho}{\mu j\omega} \frac{d^2 i_x}{dx^2} + \frac{\rho}{\mu j\omega} \frac{1}{x} \frac{di_x}{dx} = i_x$

odatle ... $\frac{d^2 i_x}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{di_x}{dx} - j\omega \frac{\mu}{\rho} i_x = 0$ ... (8)

370

Sl. 4.6

Sad ćemo naći izraz za napon induciran u četverokutu "abdca", tj. u četverokutu što ga u promatranom odsječku voda čine odabrane strujnice "ab" i "cd". Prvo pišemo izraz (4), slika 4.6 za magnetski tok kroz spomenuti četverokut, i to kao umnožak magnetske indukcije i površine četverokuta (duzina četverokuta je 1 metar!). Traženi inducirani napon dobijemo u simboličkom računu tako, da taj ulančeni tok množimo s "jω", izraz (5).

Dalje ćemo odrediti razliku padova napona u strujnicama "ab" i "cd", i to uslijed djelatnog otpora. Kao što je poznato pad napona po jedinici dužine jednak je umnošku specifičnog otpora i gustoće struje. Kako promatrane strujnice imaju dužinu 1 metar, to za traženu razliku padova napona dobijemo izraz (6).

Suma svih napona (induciranih napona i djelatnih padova napona) duž opsega četverokuta "abdca" mora biti jednaka nuli, pa odatle slijedi da inducirani napon u četverokutu "abdca" mora biti jednak razlici djelatnih padova napona u strujnicama "ab" i "cd", jer radijalnih padova napona, kao što je pretpostavljeno, nema. Možemo dakle izjednačiti izraze (5) i (6), pa ako to učinimo i sredimo, dobijemo izraz (7), koji nam daje još jedan medjusobni odnos jakosti magnetskog polja i gustoće struje.

Izrazi (3) i (7) predstavljaju dvije jednadžbe s dvije nepoznanice, koje možemo riješiti. Ako izraz (7), koji nam daje jakost magnetskog polja, uvrstimo u izraz (3), eliminiramo iz računa jakost magnetskog polja, pa ako to sredimo, dobijemo izraz (8), koji predstavlja diferencijalnu jednadžbu za gustoću struje na udaljenosti "x" od središta.

U način rješavanja diferencijalne jednadžbe prema izrazu (8) nećemo ovdje ulaziti. Njeno rješenje dano je izrazom (9), na slici 4.7, te sadržava tzv. Besselovu funkciju prve vrste nultog reda, koja je dana izrazom (1o). Ako koristimo medjuračun prema izrazima (11), dobijemo konačno izraz (12), koji nam daje rješenje za gustoću struje u obliku beskonačnog reda s realnim i imaginarnim članovima. Vidimo dakle da se gustoća struje u vodiču mijenja i po iznosu i po faznom kutu.

Kao što se iz izraza (12) vidi, skinefekt će doći to jače do izražaja što veću vrijednost ima parametar "mx". Budući da nam "x" znači udaljenost od

središta, to slijedi da će za veće udaljenosti od središta razlika u gustoći struja biti veća. Veličina "m" dana je izrazom (9), iz kojeg se vidi, da će skinefekt to jače doći do izražaja, što je veća frekvencija, veća permeabilnost i manji specifični otpor. Ovo je sve u skladu s onim što smo već prije rekli.

Izračunate vrijednosti prema izrazu (12) mogu se naći u literaturi. Da se dobije predodžba o tim vrijednostima, prikazan je na slici 4.8 omjer struje na udaljenosti "x" prema struji u središtu vodiča. Na slici su u stvari dane vrijednosti za iznos toga omjera i za fazni kut tog omjera u ovisnosti o parametru "mx".

Skinefekt - proračun raspodjele struje (nastavak)

Rješenje jednadžbe (8) glasi:

$$i_x = i_o J_o(z), \quad z = nx, \quad n = j\sqrt{j}\,m, \quad m = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\rho}} \qquad \ldots(9)$$

gdje je: i_o = gustoća struje u središtu vodiča,

$J_o(z)$ = Besselova funkcija prve vrste nultog reda,

$$J_o(z) = 1 - \frac{(z/2)^2}{(1!)^2} + \frac{(z/2)^4}{(2!)^2} - \frac{(z/2)^6}{(3!)^2} + \frac{(z/2)^8}{(4!)^2} - \cdots \qquad \ldots(10)$$

Iz (9)... $z^2 = -jm^2x^2$, $z^4 = -m^4x^4$, $z^6 = -jm^6x^6$, $z^8 = m^8x^8$ ... (11)

Konačno:

$$i_x = i_o\left(1 + j\frac{m^2x^2}{2^2} - \frac{m^4x^4}{2^4(2!)^2} - j\frac{m^6x^6}{2^6(3!)^2} + \frac{m^8x^8}{2^8(4!)^2} + \cdots\right) \qquad \ldots(12)$$

371

Sl. 4.7

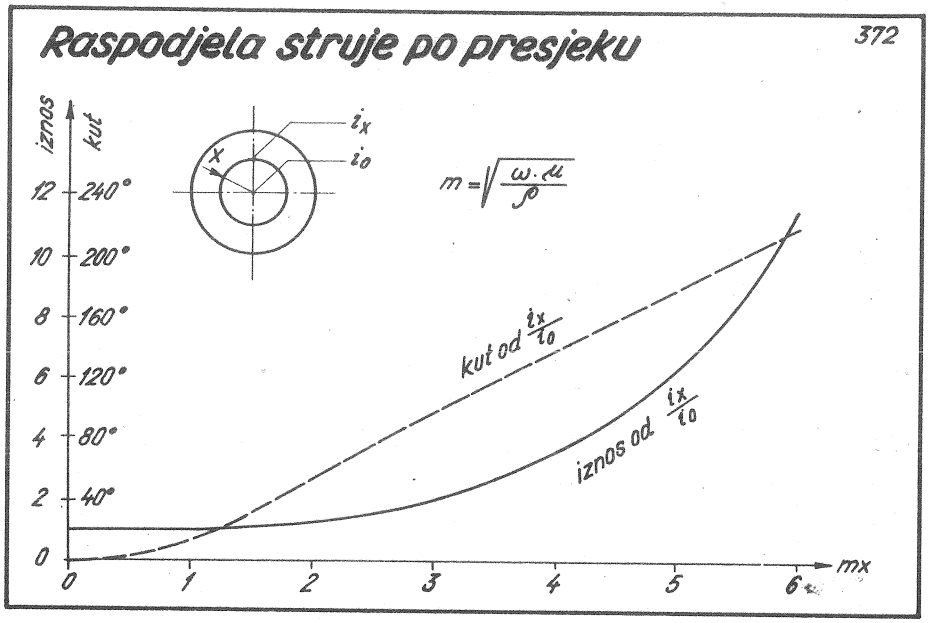
FAKTOR SKINEFEKTA

U praksi nas kod prijenosa električne energije ne zanima toliko razdioba struje po presjeku, nego nas više zanima faktor skinefekta, kako bismo mogli izračunati djelatni otpor vodiča. Na slikama 4.9 i 4.1o dan je izvod formule za faktor skinefekta. Proračun ćemo izvršiti tako, da najprije izračunamo struju i pad napona u vodiču. Iz njihovog omjera slijedi impedancija vodiča, čiji realni dio predstavlja djelatni otpor. Ako ovoga podijelimo s otporom kod istosmjerne struje, dobit ćemo faktor skinefekta.

(a) Gustoća struje na udaljenosti "x" dana je prije izvedenim izrazom, koji je na slici 4.9 ponovljen u skraćenom obliku, izraz (1). Struju u vodiču dobijemo, ako gustoću struje integriramo od središta do površine vodiča, pri čemu je udaljenost površine vodiča dana radijuom "r", izraz (2). Rezultat te integracije je izraz (3), u kojem dolazi Besselova funkcija prve vrste prvog reda, koja je definirana izrazom (4).

(b) Gustoća struje na površini vodiča slijedi iz izraza (1), ako za udaljenost postavimo x=r, izraz (5). Pad napona na površini vodiča sastoji se samo od djelatnog pada napona (magnetsko polje izvan vodiča ne uzimamo u razmatranje!). Taj pad napona po jedinici dužine jednak je umnošku specifičnog otpora i gustoće struje, te je dan izrazom (6). Toliki pad napona imaju sve strujnice, jer pad napona u svim strujnicama mora biti jednak, te je to ujedno pad napona u vodiču (taj se pad napona u pojedinim strujnicama općenito sastoji od djelatnog i induktivnog pada napona).

(c) Impedancija vodiča po jedinici dužine može se dobiti kao omjer pada napona prema izrazu (6) i struje u vodiču prema izrazu (3), pa na taj način dobijemo izraz (7), slika 4.1o. Pri tome induktivitet u izrazu za impedanciju odgovara samo magnetskom polju unutar vodiča (to je tzv. unutarnji induktivitet). Izraz (7) možemo prikazati kao beskonačni red, koji će opet imati realne i imaginarne članove. Realni dio tog izraza odgovara djelatnom otporu vodiča



Sl. 4.8

po jedinici dužine, izraz (8). Djelatni otpor za istosmjernu struju dan je pak izrazom (9).

(d) Faktor skinefekta dobijemo, ako izraz (8) podijelimo s irazom (9), i na taj način dobijemo izraz (1o). Ako tu uvrstimo prije uvedenu vrijednost za parametar "n", te čitav izraz izračunamo i sredimo, dobit ćemo konačno faktor skinefekta prikazan pomoću beskonačnog reda, izraz (11).

Vrijednosti izračunate prema izrazu (11) mogu se naći u literaturi. Da se dobije predodžba o tim vrijednostima, prikazane su na slici 4.11 vrijednosti faktora skinefekta u ovisnosti o parametru "mr".

Analogno kao za povećanje djelatnog otpora, može se izvesti izraz za tzv. induktivni faktor skinefekta, koji nam kazuje koliko je unutarnji induktivitet kod nejednake raspodjele struje manji prema unutarnjem induktivitetu kod jednolične raspodjele struje. No to smanjenje je u usporedbi s ukupnim induktivitetom vodiča tako maleno kod vodova za prijenos električne energije, da se može bez daljnjega potpuno zanemariti.

PRAKTIČNI PRORAČUN UTJECAJA SKINEFEKTA

Da bismo olakšali proračun utjecaja skinefekta u praksi, pojednostavnit ćemo izraz, koji smo izračunali za faktor skinefekta, te ćemo ujedno proširiti njegovu upotrebu na užeta od homogenog materijala.

Na slici 4.12 je najprije ponovljen prije izvedeni izraz za faktor skinefekta, izraz (1). Zatim je izraz za parametar "mr" preradjen tako, da bude izražen pomoću otpora žice kod istosmjerne struje, izraz (2). Postavimo li konkretne vrijednosti za frekvenciju i permeabilnost, koje redovito dolaze kod prijenosa električne energije, dobivamo za parametar m^2r^2 izraz (3), u koji ulazi jedino otpor kod istosmjerne struje u omima po kilometru. Na taj način i za faktor skinefekta dobivamo izraz (4) u koji ulazi jedino otpor kod istosmjerne struje.

Ovo što je dosada rečeno vrijedi za vodič u obliku masivne žice. No ispitivanja su pokazala, da se isti faktor skinefekta dobiva kod frekvencije 5o Hz i za vodič u obliku užeta, ako to uže ima isti presjek (ne isti vanjski promjer!) kao i masivna žica. Drugim riječima, faktor skinefekta bit će isti za uže i za masivnu žicu, ako im je otpor kod istosmjerne struje isti. No izraz (4) daje faktor skinefekta izražen pomoću otpora kod istosmjerne struje, pa prema tome vrijedi i za vodiče u obliku užeta.

Za praksu je još prikladniji izraz (5), koji daje povećanje otpora zbog skinefekta, a koji je izveden iz izraza (4). Za praksu kod prijenosa električne energije su sasvim dovoljna navedena dva člana beskonačnog reda, a često je dovoljan i samo prvi član.

Faktor skinefekta - izvod formule

a) Gustoća struje na udaljenosti x ... $i_x = i_o J_o(nx)$ ... (1)

Struja u vodiču ... $y = \int_0^r i_x 2\pi x\,dx = 2\pi i_o \int_0^r J_o(nx)\,x\,dx$ ... (2)

odatle ... $y = \frac{2\pi i_o r J_1(nr)}{n}$ ... (3)

gdje je ... $J_1(z)$ = Besselova funkcija prve vrste prvog reda

$$J_1(z) = \frac{z}{2}\left[1 - \frac{(z/2)^2}{1!2!} + \frac{(z/2)^4}{2!3!} - \frac{(z/2)^6}{3!4!} + \dots\right] \quad \dots (4)$$

b) Gustoća struje na površini vodiča ... $i_r = i_o J_o(nr)$ ... (5)

Pad napona po metru ... $u = \rho i_r = \rho i_o J_o(nr)$ ... (6)

373

Sl. 4.9

Faktor skinefekta - izvod formule (nastavak)

c) Impedancija po metru ... $R + j\omega L = \frac{u}{y} = \frac{n\rho J_o(nr)}{2\pi r J_1(nr)}$ ... (7)

Djelatni otpor po metru ... R = realni dio od $\frac{n\rho J_o(nr)}{2\pi r J_1(nr)}$ ... (8)

Djelatni otpor za istosmjernu struju ... $R_o = \frac{\rho}{r^2\pi}$ ... (9)

d) Faktor skinefekta ... $\frac{R}{R_o}$ = realni dio od $\frac{nr}{2}\frac{J_o(nr)}{J_1(nr)}$ ... (10)

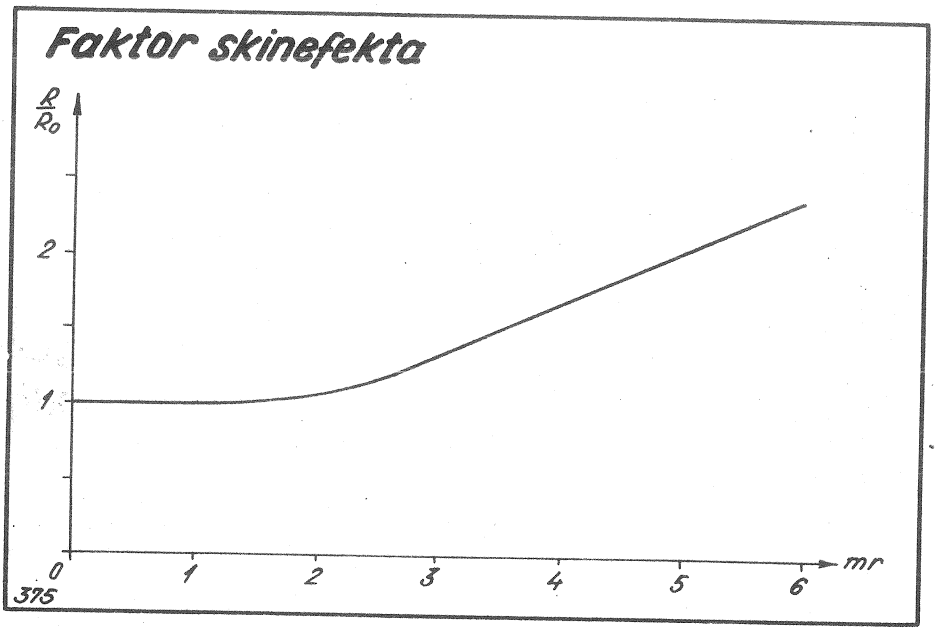
$$\frac{R}{R_o} = 1 + \frac{m^4 r^4}{192} - \frac{m^8 r^8}{46080} \quad \dots (11)$$

374

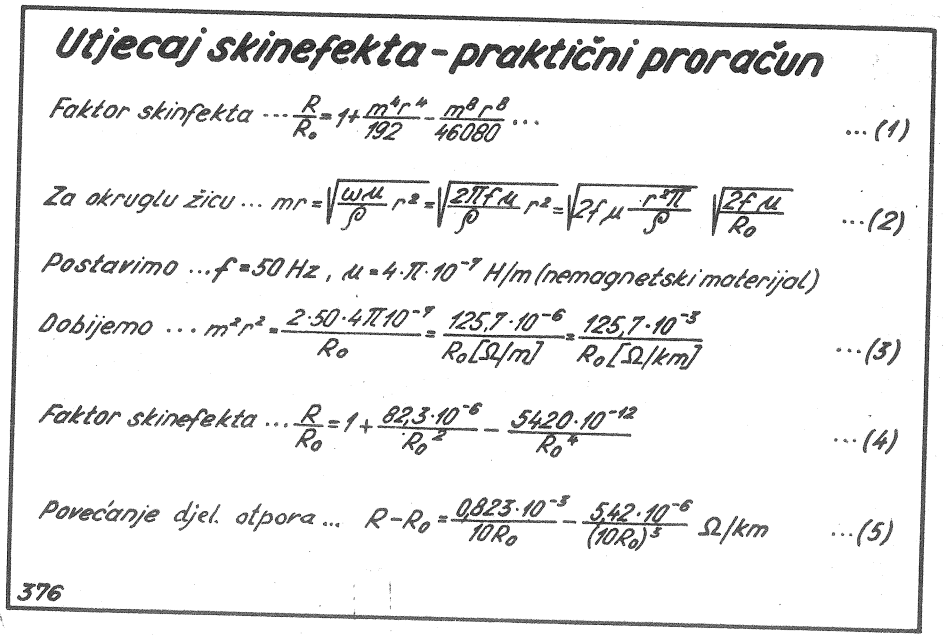
Sl. 4.1o

UTJECAJ SKINEFEKTA KOD ČELIČNOG UŽETA

Radi velike magnetske permeabilnosti utjecaj skinefekta kod čeličnih užeta je veoma znatan. Osim toga dolazi ovdje do izražaja promjenljivost permeabilnosti u ovisnosti o jakosti struje, koja teče kroz vodič. Na slici 4.13 je prikazano povećanje djelatnog otpora u ovisnosti o struji, i to za čelični vodič presjeka 35 mm^2, a prema podacima iz literature (Rjabkov: Električne mreže i dalekovodi, str.312).



Sl. 4.11

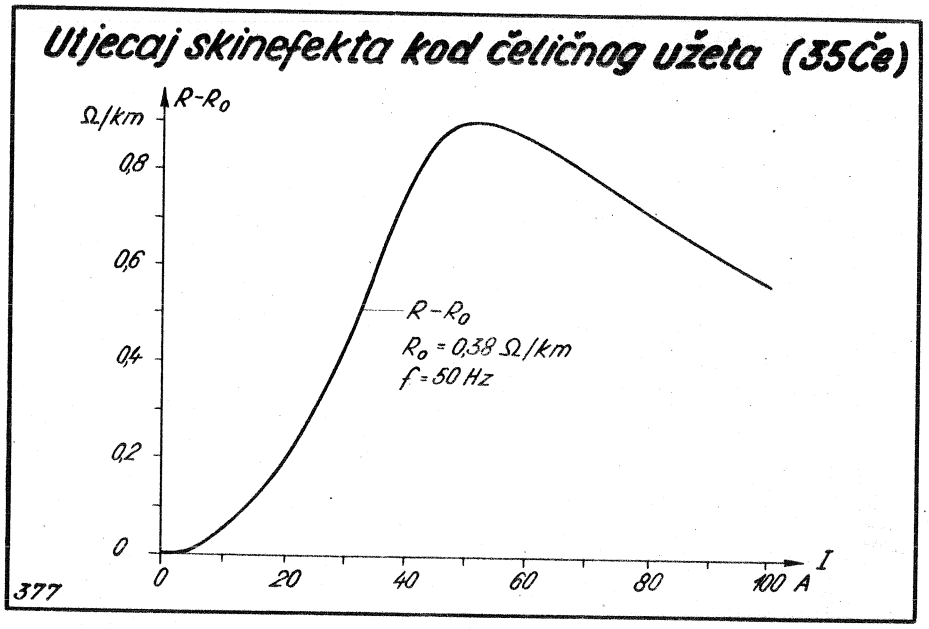


Sl. 4.12

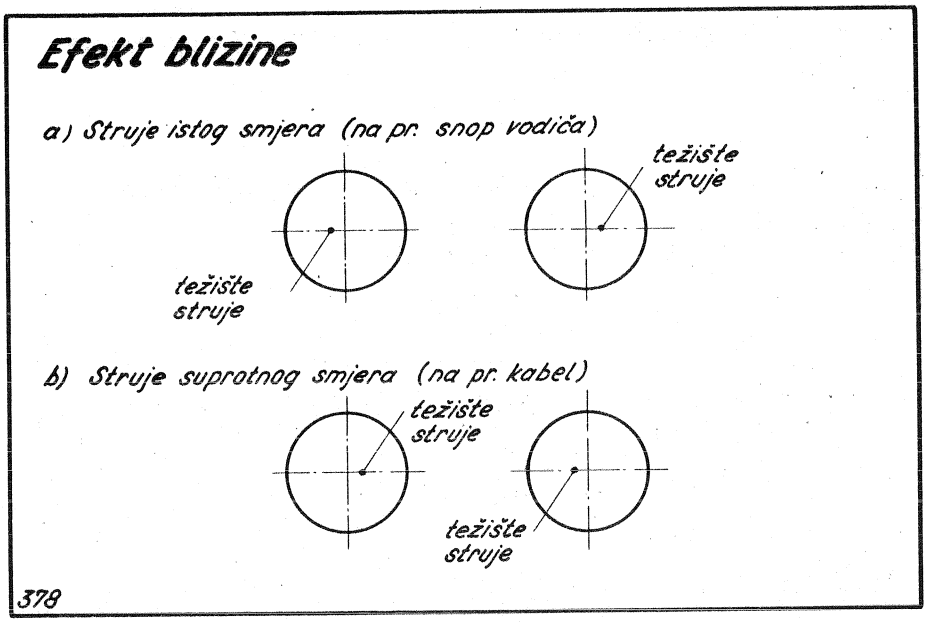
EFEKAT BLIZINE

Iz istog razloga, zbog kojeg dolazi do skinefekta, dolazi i do efekta blizine. Efekt blizine dolazi do izražaja na taj način, što struja u jednom vodiču djeluje na razdiobu struje u drugom vodiču, tako da razdioba struje nije centralno simetrična. Naravno da efekat blizine dolazi to jače do izražaja, što su vodiči medjusobno bliži, a inače stoji pod onim istim utjecajima, pod kojima stoji i skinefekat.

Na slici 4.14 je pod (a) prikazan pomak težišta struja u dva vodiča, u kojima teku struje u istom smjeru. Težišta struja će u ovom slučaju biti pomaknutą prema vani iz istih razloga kao kod skinefekta (gdje kao da su strujne



Sl. 4.13



Sl. 4.14

niti nastojale da se štoviše razmaknu jedna od druge). Ovakav efekat blizine može doći do izražaja npr. u vodičima istog snopa, ako je nadzemni vod gradjen sa snopovima vodiča.

Na istoj slici je pod (b) prikazan pomak težišta struja u dva vodiča, u kojima teku struje suprotnog smjera. U tom slučaju će težišta struja biti pomaknuta prema unutra. Ovakav efekat blizine može doći do izražaja kod kabela. Kod nadzemnih vodova s jednostrukim vodičima možemo efekat blizine potpuno zanemariti, jer su razmaci izmedju vodiča veoma veliki u odnosu na dimenzije samih vodiča.

5. INDUKTIVITET VODA

OPĆENITO O INDUKTIVITETU

Induktivitet je svojstvo voda da se odupire promjeni struje, a dolazi do izražaja zbog toga, što svaka promjena struje inducira u vodu napon suprotnog smjera. Jedinica za mjerenje induktiviteta jest henri (H). Induktivitet 1 henri ima onaj strujni krug, u kojem se inducira napon 1 volt, ako se struja jednolična mijenja za 1 amper kroz 1 sekundu.

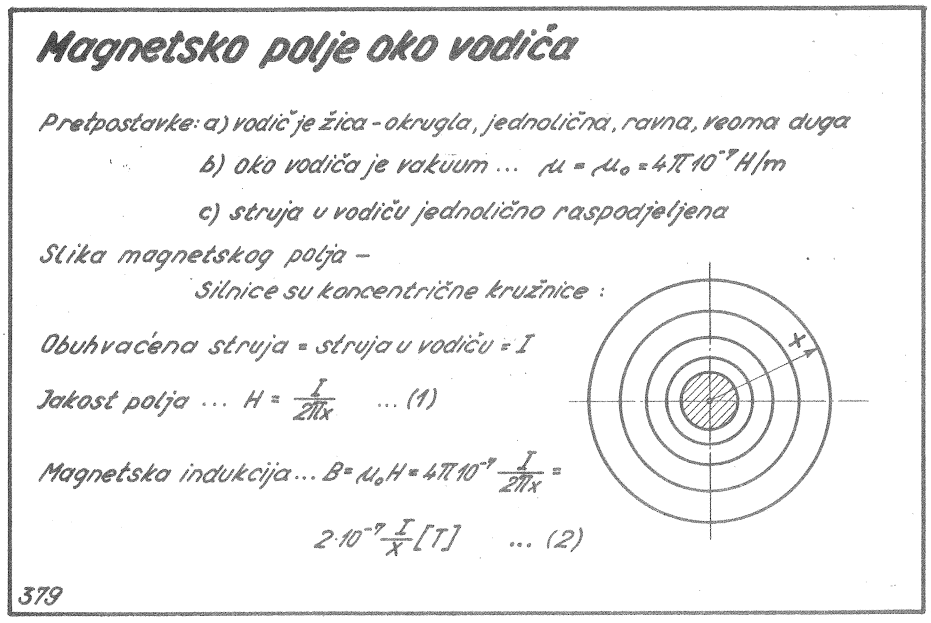
Kod vodova za prijenos električne energije redovito pretpostavljamo da je induktivitet konstantan, a to je uslovljeno pretpostavkom da je magnetska permeabilnost promatranog magnetskog kruga konstantna. U tom slučaju možemo induktivitet definirati odnosom magnetskog toka i struje. Pri tome treba računati s ulančenim tokom, tj. samo s onim tokom koji je ulančen sa strujom.

Zbog pretpostavke da je magnetska permeabilnost konstantna, bit će magnetska indukcija i jakost magnetskog polja medjusobno proporcionalne, pa se može primijeniti zakon superpozicije i ukupni ulančeni magnetski tok može se dobiti sumiranjem magnetskih tokova, koje proizvedu pojedini dijelovi strujnog kruga.

Gornja razmatranja čine osnov za proračun induktiviteta nekog vodiča u našem vodu. Najprije se odrede magnetski tokovi, koje proizvode struje u pojedinim vodičima našeg voda, i to samo oni tokovi koji su ulančeni sa strujom u promatranom vodiču. Zatim se sumiranjem pojedinih ulančenih tokova dobije ukupni ulančeni tok. Konačno se ukupni ulančeni tok podijeli s jakošću struje u promatranom vodiču i tako se dobije njegov induktivitet. Tim ćemo putem poći u daljnjim razmatranjima.

MAGNETSKO POLJE OKO VODIČA

Proračun magnetskog polja oko vodiča prikazan je na slici 5.1. Pri tome su načinjene slijedeće pretpostavke: (a) da je vodič izradjen u obliku masivne žice od jednoličnog materijala, te da je ta žica okrugla, ravna i veoma dugačka (ove su pretpostavke uglavnom ispunjene kod vodova za prijenos električne energije, osim pretpostavke o izvedbi vodiča u obliku masivne žice, no kasnije ćemo i stvarnu izvedbu vodiča u obliku užeta uzeti u račun), (b) da je oko vodiča vakuum, odnosno da je magnetska permeabilnost oko vodiča jednaka permeabilnosti vakuuma (ova je pretpostavka potpuno opravdana jer se permeabilnost uzduha, koji se kod nadzemnih vodova nalazi oko vodiča, vrlo malo razlikuje od permeabilnosti vakuuma, a slično je i kod kabela), i (c) da je struja u vodiču jednolično raspodijeljena (ova je pretpostavka prilično ispunjena, jer utjecaj skinefekta i efekta blizine kod današnjih izvedbi vodova nije velik).



Sl. 5.1

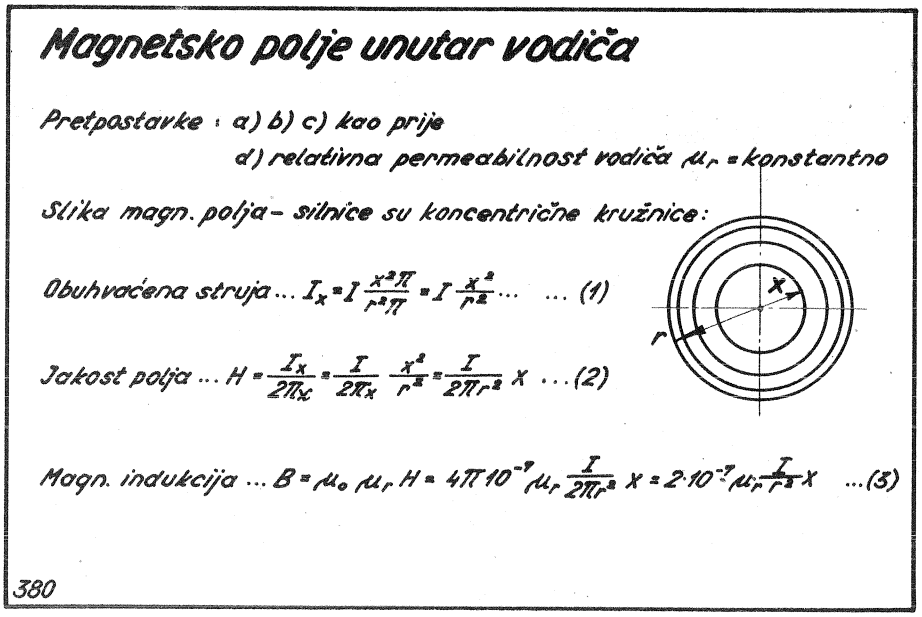
Kao posljedica gornjih pretpostavki slijedi, da je slika magnetskog polja u svim poprečnim presjecima jednaka, i da je simetrična obzirom na središte vodiča, a to znači da će magnetske silnice biti prikazane koncentričnim kružnicama sa središtem u središtu vodiča, i da će jakost magnetskog polja duž pojedine silnice biti konstantna.

Integral jakosti polja duž pojedine silnice jednak je obuhvaćenoj struji. U našem slučaju svaka silnica obuhvaća ukupnu struju u vodiču. Spomenuti integral je lako izračunati, jer je jakost polja konstantna duž čitave silnice, pa tako dobijemo izraz (1) za jakost polja na odredjenoj udaljenosti. Množimo li to s permeabilnošću vakuuma, dobijemo izraz (2) za magnetsku indukciju oko vodiča.

MAGNETSKO POLJE UNUTAR VODIČA

Proračun magnetskog polja unutar vodiča prikazan je na slici 5.2. Pri tome je uz prijašnje tri pretpostavke dodana i četvrta, i to da je permeabilnost vodiča konstantna. Ova je pretpostavka na mjestu kod vodiča od nemagnetskih materijala (što je redovito slučaj), ali se može primijeniti i kod vodiča od magnetskog materijala, jer je utjecaj magnetskog polja unutar vodiča na induktivitet razmjerno malen, pa učinjena pogreška neće u cjelini jako utjecati na rezultat.

I ovdje su silnice magnetskog polja koncentrične kružnice kao i prije, ali struja koju obuhvaćaju pojedine silnice nije za sve silnice jednaka. Svaka silnica obuhvaća samo onu struju, koja teče kroz presjek vodiča obuhvaćen tom silnicom. Uz prije uvedenu pretpostavku o jednoličnoj raspodjeli struje po presjeku, za obuhvaćenu struju dobijemo izraz (1). Ako sada, analogno kao i prije, izračunamo jakost polja na odredjenoj udaljenosti i pri tome vodimo računa o tome, kolika je obuhvaćena struja, dobit ćemo za jakost polja izraz (2). Množimo li jakost polja s magnetskom permeabilnošću vodiča, dobit ćemo za magnetsku indukciju unutar vodiča izraz (3).



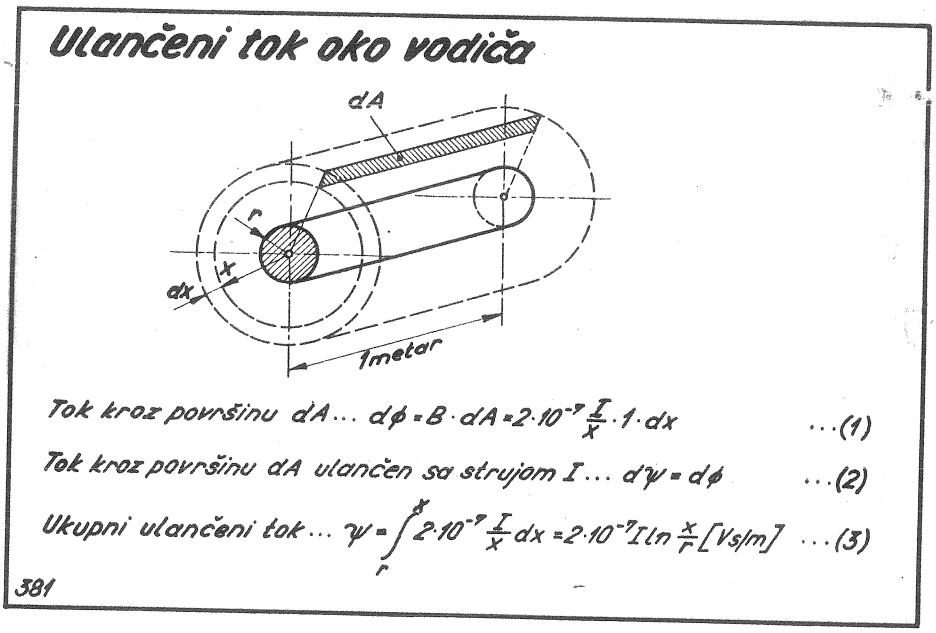
Sl. 5.2

ULANČENI TOK OKO VODIČA

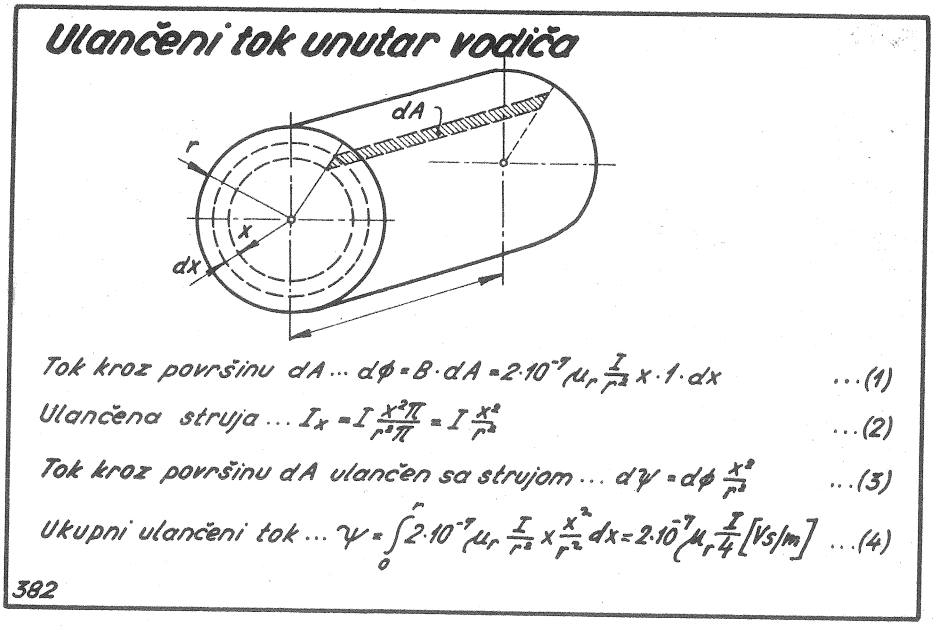
Proračun ulančenog toka oko vodiča prikazan je na slici 5.3. Na odsječku vodiča dužine 1 metar promatramo diferencijalni elemenat površine oko vodiča, kroz koju prolazi magnetski tok. Za čitavi elemenat površine imamo istu magnetsku indukciju, pa magnetski tok kroz tu površinu dobijemo kao umnožak magnetske indukcije s površinom, izraz (1). Ulančeni magnetski tok jednak je tako izračunatom toku, kao što je prikazano izrazom (2), jer je čitav magnetski tok izvan vodiča ulančen sa čitavom strujom unutar vodiča. Ukupni ulančeni tok izvan vodiča do neke odredjene udaljenosti dobijemo, ako provedemo integraciju od površine vodiča do te udaljenosti, pa tako dobijemo izraz (3).

ULANČENI TOK UNUTAR VODIČA

Proračun ulančenog magnetskog toka unutar vodiča prikazan je na slici 5.4. I ovdje na odsječku vodiča dužine 1 metar promatramo magnetski tok, koji prolazi kroz diferencijalni elemenat površine s konstantnom vrijednošću magnetske indukcije. Taj magnetski tok dan je izrazom (1). Ali taj tok nije ulančen s čitavom strujom u vodiču, nego samo s dijelom struje unutar promatranog toka. Ulančena struja dana je izrazom (2). Ulančeni magnetski tok dan je dakle izrazom (3). Ukupni ulančeni tok unutar vodiča dobijemo, ako provedemo integraciju od središta vodiča do njegove površine, pa tako dobijemo izraz (4).



Sl. 5.3.



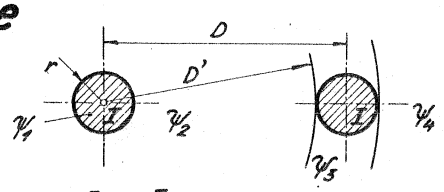
Sl. 5.4

VOD OD DVIJE ŽICE

Induktivitet voda, koji se sastoji od dvije žice, izračunat je na slici 5.5, i to tako da je izračunat induktivitet jedne žice, koja je na slici pri-

kazana kao lijeva. U promatranoj lijevoj žici teče odredjena struja, a isto tolika struja s protivnim predznakom (tj. u suprotnom smjeru) teče u desnoj žici. Ukupni magnetski tok, koji je ulančen sa strujom u lijevoj žici, možemo podijeliti na četiri dijela, i to: tok unutar lijeve žice, tok izmedju žica, tok koji prolazi kroz desnu žicu i tok izvan desne žice.

Vod od dvije žice



Unutar lijeve žice ... $\psi_1 = 2\cdot10^{-7}\mu_r\frac{I}{4}$ ...(1)

Izmedu žica ... $\psi_2 = 2\cdot10^{-7} I \ln\frac{D'}{r}$ ...(2)

Unutar desne žice ... ψ_3 ulančuje prosječno struju $\frac{I}{2}$,

zato ... $\psi_2 + \psi_3 = 2\cdot10^{-7} I \ln\frac{D}{r}$ ...(3)

Izvan žica ... $\psi_4 = 0$, jer ulančuje struju $I - I = 0$

Ukupni tok ... $\psi = \psi_1 + \psi_2 + \psi_3 + \psi_4 = 2\cdot10^{-7}\mu_r\frac{I}{4} + 2\cdot10^{-7} I \ln\frac{D}{r}$ ...(4)

Induktivitet jedne žice ... $L_1 = \frac{\psi}{I} = 2\cdot10^{-7}\left(\ln\frac{D}{r} + \frac{\mu_r}{4}\right)$ H/m ...(5)

383

Sl. 5.5

Ulančeni tok unutar lijeve žice dan je izrazom (1) u smislu onoga što je prije rečeno. Ulančeni tok izmedju žica dan je izrazom (2), takodjer u smislu onog što je prije rečeno. Tok, koji prolazi kroz desnu žicu, ulančuje na svojem lijevom rubu punu struju I, no što idemo više udesno, ulančena struja se sve više smanjuje, jer taj tok ulančuje sve veći dio desnog vodiča sa strujom suprotnog predznaka, tako da je ulančena struja na desnom rubu toga toka jednaka nuli. U prosjeku ulančena struja iznosi polovicu struje lijevog vodiča, a to možemo uzeti u račun tako, da izraz za tok izmedju vodiča protegnemo sve do sredine desnog vodiča, kao što je učinjeno u izrazu (3). Ovo je tačno za vodiče od nemagnetskog materijala. Konačno, četvrti dio toka, tj. onaj izvan desne žice, obuhvaća ukupnu struju lijeve i desne žice, tako da je njegovo ulančenje jednako nuli.

Ukupni ulančeni tok dan je sumom navedenih djelomičnih tokova, pa za nj dobijemo izraz (4). Ako to dijelimo sa strujom u lijevoj žici, dobijemo njezin induktivitet, izraz (5).

KONCENTRIRANJE STRUJE UNUTAR VODIČA

Kao što smo prije vidjeli, struju u vodiču možemo zamisliti koncentriranom u središtu vodiča, ali samo onda, ako promatramo djelovanje te struje na struju u nekom drugom vodiču. Na taj način udaljenost do struje, raspodijeljene po presjeku vodiča, jednaka je udaljenosti do središta vodiča. Medjutim,ako promatramo struju u vodiču, za koji računamo induktivitet, ne možemo tako postupiti, jer bismo dobili da je udaljenost od vodiča do struje koja u njemu teče jednaka nuli, a to očito nije u redu.

Da razmotrimo ovo pitanje, poslužit ćemo se formulom izvedenom za induktivitet kod voda s dvije žice. Na slici 5.6 je ta formula ponovno napisana, izraz (1). Ako tu formulu raščlanimo, kao što je učinjeno u izrazu (2), onda vidimo da se drugi i treći član u zagradi odnose na sam vodič, pa možemo zamisliti da se ta dva člana odnose na neki zamišljeni radijus vodiča "r'", za koji dobijemo izraz (3). U slučaju da je vodič od nemagnetskog materijala, dobijemo za zamišljeni radijus izraz (4). Koristeći tu novo uvedenu veličinu možemo formulu za induktivitet pisati na jednostavniji način, kao što je učinjeno u izrazu (5).

Koncentriranje struje unutar vodiča

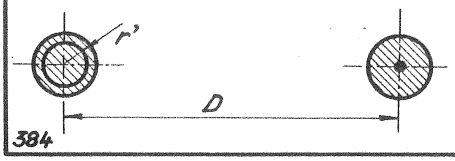
$$L_1 = 2\cdot10^{-7}\left(\ln\frac{D}{r}+\frac{\mu_r}{4}\right) \quad \ldots(1)$$

$$= 2\cdot10^{-7}\left(\ln D-\ln r+\frac{\mu_r}{4}\right) \quad \ldots(2)$$

$$\ln r' = \ln r-\frac{\mu_r}{4} = \ln r+\ln \epsilon^{-\mu_r/4} = \ln r\cdot\epsilon^{-\mu_r/4}$$

$$r' = r\cdot\epsilon^{-\mu_r/4} \quad \ldots(3)$$

$$\mu_r = 1 \quad r' = r\cdot\epsilon^{-1/4} = r\cdot 0{,}7788 \quad \ldots(4)$$



$$L_1 = 2\cdot10^{-7}\ln\frac{D}{r'}\ H/m \quad \ldots(5)$$

384

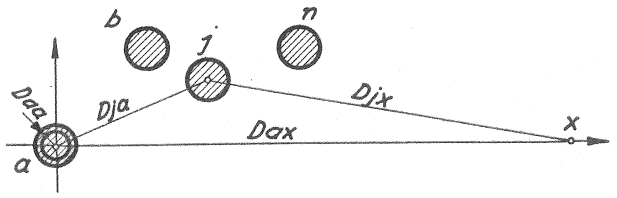
Sl. 5.6

Isti induktivitet kao u izrazu (5) dobit ćemo i u slučaju da struja nije jednoliko raspodijeljena u promatranom vodiču, nego kad je koncentrirana na kružnici s radijusom "r'". Struju u promatranom vodiču možemo dakle zamisliti koncentriranu na taj način, jer se pri tome ne mijenja vrijednost induktiviteta. Struja mora biti zamišljena koncentrirana na kružnici, a ne na neki drugi način u udaljenosti "r'", da medjusobna udaljenost struja "D" ne bude poremećena. Radijus "r'" daje neku srednju udaljenost struje same od sebe, o čemu će još biti govora kasnije.

OPĆA FORMULA ZA ULANČENI TOK

Radi ubrzanja postupka može se koristiti opća formula za proračun ulančenog toka, koja je izvedena na slici 5.7. Ova formula vrijedi za bilo koji broj paralelnih vodiča "n" uz prije uvedene pretpostavke i uz uslov, da promatrani vodiči pripadaju istom strujnom krugu. Taj uslov izražen matematski glasi, da suma struja u svim vodičima mora biti jednaka nuli, izraz (1).

Opća formula za ulančeni tok



$$\sum_{j=a}^{n} I_j = 0 \quad \ldots(1)$$

$$\psi_{aj} = 2\cdot10^{-7} I_j \ln\frac{Djx}{Dja} \quad \ldots(2)$$

$$\psi_a = 2\cdot10^{-7}\sum_{j=a}^{n} I_j\cdot\ln\frac{Djx}{Dja} = 2\cdot10^{-7}\left(\sum_{j=a}^{n} I_j\cdot\ln Djx+\sum_{j=a}^{n} I_j\ln\frac{1}{Dja}\right) \quad \ldots(3)$$

$$x=\infty \rightarrow Dax = Dbx = \cdots Dnx \rightarrow \sum_{j=a}^{n} I_j\ln Djx = \ln Djx\sum_{j=a}^{n} I_j = 0$$

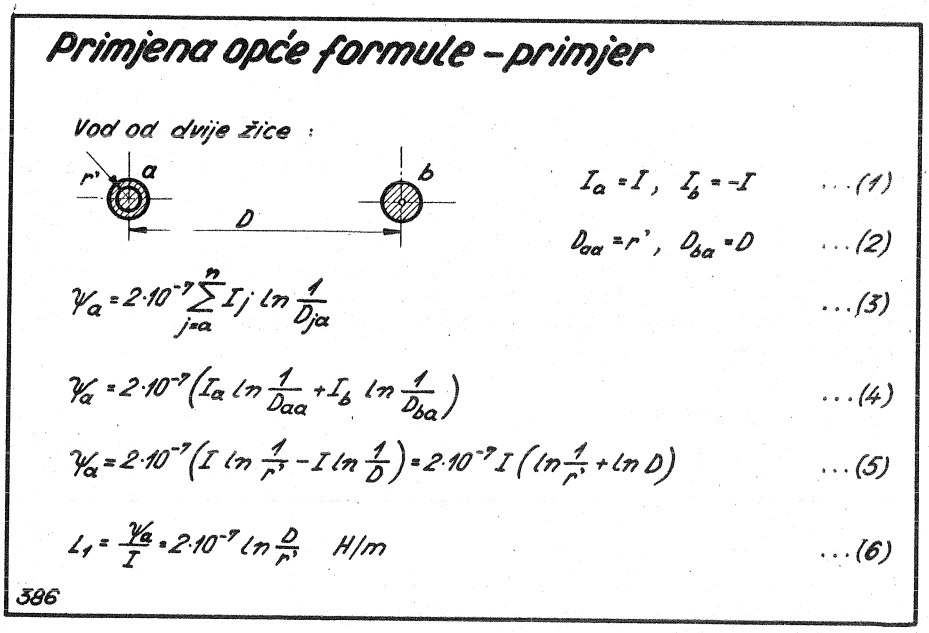
$$\psi_a = 2\cdot10^{-7}\sum_{j=a}^{n} I_j\ln\frac{1}{Dja}\ [Vs/m] \quad \ldots(4)$$

385

Sl. 5.7

Izvest ćemo formulu za tok ulančen sa strujom u vodiču "a". U tu svrhu potrebne su nam udaljenosti od struja u pojedinim vodičima do vodiča "a". Kao što je učinjeno na slici, udaljenost od vodiča "j" do vodiča "a" označit ćemo sa "Dja", a analogno ćemo postupiti i za ostale udaljenosti. Udaljenost "Daa" značit će nam, dakako, udaljenost struje u vodiču "a" od istog tog vodiča, a to će biti jednako radijusu kružnice na kojoj možemo zamisliti da je struja koncentrirana.

Ukupni magnetski tok, koji je ulančen s vodičem "a", možemo dobiti kao sumu pojedinih tokova, što ih proizvode struje u pojedinim vodičima. Za ulančeni magnetski tok uslijed struje u vodiču "j" dobijemo izraz (2), pri čemu nismo obuhvatili čitav prostor nego samo do tačke "X", koja je dovoljno daleko, ali ipak u konačnoj udaljenosti. Unutar udaljenosti "Dja" tok uslijed struje u vodiču "j" nije ulančen sa strujom u vodiču "a", pa je tim dana donja granica unutar kojih integriramo magnetski tok. Kao gornju granicu uzeli smo konačnu udaljenost do tačke "X", da za pojedine tokove dobijemo konačne vrijednosti. Ukupni tok, kao rezultat struja u svim vodičima, ulančen s vodičem "a" dan je dakle izrazom (3), koji dalje možemo rastaviti u dva člana. Da nam konačna udaljenost tačke "X" ne kvari rezultat, moramo tačku "X" odvesti veoma daleko. U tom slučaju udaljenosti pojedinih vodiča do tačke "X" bit će medjusobno jednake, pa će prvi član izraza (3) biti jednak nuli zbog uslova danog u izrazu (1). Konačno će ukupni magnetski tok, koji je ulančen s vodičem "a", biti dan izrazom (4). Koristeći tu opću formulu možemo ulančeni tok brzo i lako izračunati bez obzira na broj vodiča u strujnom krugu.



Sl. 5.8

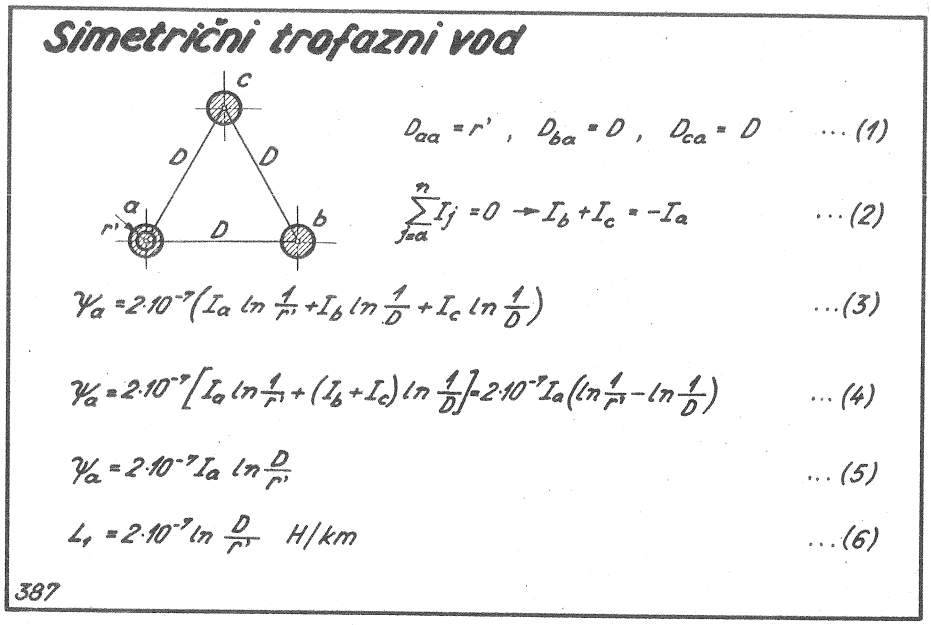
PRIMJER ZA PRIMJENU OPĆE FORMULE

Primjenu opće formule za ulančeni magnetski tok, kako smo je netom izveli, prikazat ćemo na primjeru voda od dvije žice. To je učinjeno na slici 5.8, gdje je skiciran vod sa žicama "a" i "b", pri čemu su označene i udaljenosti struja od lijevog vodiča. U izrazima (1) dane su struje u oba vodiča, a u izrazima (2) dane su udaljenosti tih struja od lijevog vodiča. To nam je potrebno za korištenje opće formule za ulančeni tok, koja je ponovljena u izrazu (3) i razvita u izrazu (4). Ako ovamo uvrstimo izraze (1) i (2) dobit ćemo ulančeni tok za naš primjer, izraz (5). Da dobijemo induktivitet, moramo tok podijeliti sa strujom u dotičnom vodiču, pa kad to učinimo i članove s logaritmom skupimo zajedno, dobijemo konačno induktivitet dan izrazom (6). Dobili smo dakako rezultat, koji nam je već od prije poznat.

SIMETRIČNI TROFAZNI VOD

Izračunat ćemo sada induktivitet simetričnog trofaznog voda, tj. voda kojemu su vodiči smješteni u vrhove istostraničnog trokuta. Pri tome ćemo

opet koristiti opću formulu za ulančeni tok. Proračun je izvršen na slici 5.9, gdje je dana skica voda s potrebnim oznakama vodiča i udaljenosti. Izrazi (1) pokazuju kolike su udaljenosti struja u pojedinim vodičima od promatranog vodiča "a". Izraz (2) pokazuje da je suma struja u ostala dva vodiča jednaka struji u promatranom vodiču "a", ali sa suprotnim predznakom, što je izvedeno iz općeg uslova da je suma svih struja jednaka nuli.



Sl. 5.9

Opća formula za ulančeni tok raščlanjena je, te su u nju upisane veličine za ovaj konkretni slučaj, izraz (3). Zadnja dva člana možemo u tom izrazu skupiti zajedno, pa uz primjenu izraza (2) dobijemo magnetski ulančeni tok dan izrazom (4), i konačno, ako to malo sredimo, izrazom (5). Dijelimo li to sa strujom u promatranom vodiču, dobijemo izraz (6), koji nam daje induktivitet jednog vodiča kod trofaznog simetričnog voda.

Kao što vidimo, dobili smo isti izraz za induktivitet kao i kod voda s dvije žice. To je i razumljivo, jer se u oba slučaja povratna struja nalazi na udaljenosti "D" od promatranog vodiča.

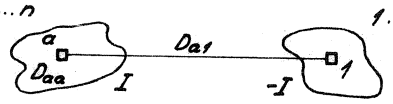
METODA SREDNJIH GEOMETRIJSKIH UDALJENOSTI

Za proračun induktiviteta kod vodova s proizvoljnim brojem paralelnih vodiča postoji jedna metoda, koja nam omogućuje da direktno izračunamo induktivitet. Zovemo je metodom srednjih geometrijskih udaljenosti, a njen izvod dan je na slici 5.1o.

Prikazan je strujni krug s polaznim i povratnim vodičem proizvoljnog oblika, što ujedno znači da oni mogu biti sastavljeni od bilo kojeg broja pojedinačnih vodiča. I polazni i povratni vodič podijelimo na "n" dijelova, koje kod polaznog vodiča označimo oznakama od "a" do "n", a kod povratnog vodiča oznakama od "1" do "N". U svakom dijelu polaznog vodiča teče isti dio ukupne struje, kao što je pokazano u izrazu (1), a isto toliki dio struje, ali s protivnim predznakom, teče u svakom dijelu povratnog vodiča, kao što se vidi iz izraza (2). Udaljenost izmedju elementa "a" i elementa "1" označit ćemo sa "D_{a1}", a analogno ćemo označiti i ostale udaljenosti. Pri tome nam "D_{aa}" znači udaljenost struje elementa "a" od tog elementa, koju udaljenost možemo pridati tom elementu bez obzira na njegov oblik.

Magnetski tok ulančen s elementom "a" prema prije izvedenoj općoj formuli dan je u izrazu (3), gdje su najprije pod znakom sume posebno obuhvaćeni članovi koji se odnose na elemente polaznog vodiča, dok je struja u pojedinom elementu kao zajednički faktor izvadjena izvan zagrade; a zatim su svi logaritamski članovi obuhvaćeni pod jednim znakom logaritma. Analogno glasi izraz (4) za tok ulančen s elementom "b", i tako dalje.

Metoda SGU - izvod



$$I_a = I_b = \dots = I_n = \frac{I}{n} \quad \dots(1)$$

$$I_1 = I_2 = \dots = I_N = -\frac{I}{n} \quad \dots(2)$$

$$\psi_a = 2\cdot10^{-7}\frac{I}{n}\left[\sum_{j=a}^{n} \ln\frac{1}{D_{ja}} - \sum_{j=1}^{N} \ln\frac{1}{D_{ja}}\right] = 2\cdot10^{-7}\frac{I}{n}\ln\frac{D_{1a}\cdot D_{2a}\cdots D_{Na}}{D_{aa}\cdot D_{ba}\cdots D_{na}} \quad \dots(3)$$

$$\psi_b = 2\cdot10^{-7}\frac{I}{n}\ln\frac{D_{1b}\cdot D_{2b}\cdots D_{Nb}}{D_{ab}\cdot D_{bb}\cdots D_{nb}} \quad \dots(4)$$

$$\psi = \frac{1}{n}(\psi_a + \psi_b + \dots \psi_n) \quad \dots(5)$$

$$\psi = 2\cdot10^{-7}\frac{I}{n^2}\ln\frac{D_{1a}\cdot D_{2a}\cdots D_{Na}\cdot D_{1b}\cdot D_{2b}\cdots D_{Nb}\cdots D_{Na}\cdot D_{Nb}\cdots D_{Nn}}{D_{aa}\cdot D_{ba}\cdots D_{na}\cdot D_{ab}\cdot D_{bb}\cdots D_{nb}\cdots D_{na}\cdot D_{nb}\cdots D_{nn}} \quad \dots(6)$$

$$L_1 = 2\cdot10^{-7}\ln\frac{\sqrt[n^2]{D_{1a}\cdots D_{Nn}}}{\sqrt[n]{D_{aa}\cdots D_{nn}}} = 2\cdot10^{-7}\ln\frac{D_m}{D_s} \quad H/m \quad \dots(7)$$

388

Sl. 5.1o

Ukupni tok ulančen sa svim elementima polaznog vodiča dobijemo sumiranjem svih elementarnih tokova prema izrazima (3) odnosno (4), ali tu sumu još moramo podijeliti s brojem elemenata "n", tj. s brojem strujnih niti, jer su sve te strujne niti spojene paralelno. Tako za ukupni ulančeni tok dobijemo izraz (5), i ako u nj uvrstimo izraze za pojedine elementarne tokove dobijemo ukupni tok ulančen s polaznim vodičem prikazan izrazom (6).

Induktivitet ćemo dobiti ako taj tok podijelimo sa strujom u polaznom vodiču. Stavimo li još "n^2" pod znak logaritma, dobijemo izraz (7), gdje pod znakom logaritma imamo razlomak, čiji brojnik i nazivnik predstavljaju neke srednje geometrijske udaljenosti. Odatle ovoj metodi i potječe ime metoda srednjih geometrijskih udaljenosti, ili skraćeno metoda SGU. Te srednje geometrijske udaljenosti u brojniku i nazivniku možemo skraćeno označiti sa "D_m" i "D_s", što je također učinjeno kod izraza (7).

Vidimo da je "D_m" srednja geometrijska vrijednost svih udaljenosti od svih elemenata povratnog vodiča do svih elemenata polaznog vodiča, ili skraćeno "međusobna SGU". Naprotiv "D_s" je srednja geometrijska vrijednost svih udaljenosti od svih elemenata polaznog vodiča do svih elemenata tog istog vodiča, ili skraćeno "vlastita SGU".

Usporedimo li dobiveni rezultat s formulama, koje smo prije izveli za induktivitet jednofaznog i trofaznog voda, vidimo da je međusobna SGU dvaju vodiča kružnog presjeka jednaka udaljenosti njihovih središta. Za vlastitu SGU jednog vodiča kružnog presjeka vidimo pak da je jednaka prije uvedenom radijusu "r'" kružnice, na kojoj možemo zamisliti koncentriranu struju dotičnog vodiča.

NEKE VRIJEDNOSTI ZA SGU

Pri praktičnoj primjeni metode SGU za proračun induktiviteta potrebno je znati vrijednosti vlastite i međusobne SGU za one geometrijske oblike, koji dolaze u obzir kod proračuna induktiviteta vodova. Ne ulazeći u matematska dokazivanja, na slici 5.11 prikazane su neke vrijednosti za srednje geometrijske udaljenosti.

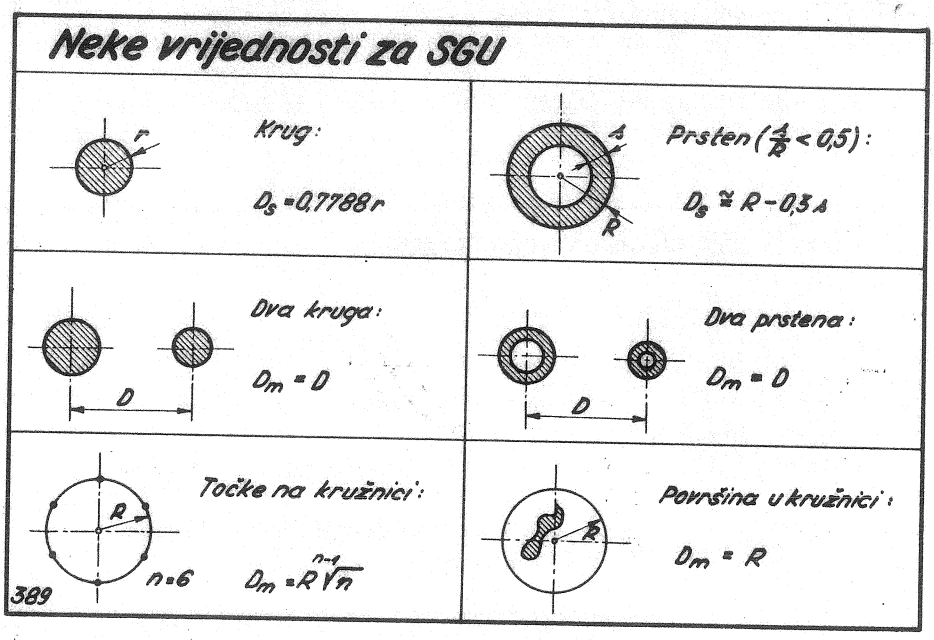
Vlastita SGU za kružni presjek nam je već otprije poznata, a za prstenasti presjek dan je jednostavni izraz koji dovoljno točno vrijedi za šuplje vodiče, kakvi dolaze kod vodova za prijenos električne energije.

Međusobna SGU za dva kružna presjeka jednaka je udaljenosti njihovih središta, a isto vrijedi za dva prstenasta presjeka. Za međusobnu SGU točaka jednoliko raspoređenih na kružnici dan je jednostavni izraz, a za bilo kakvu

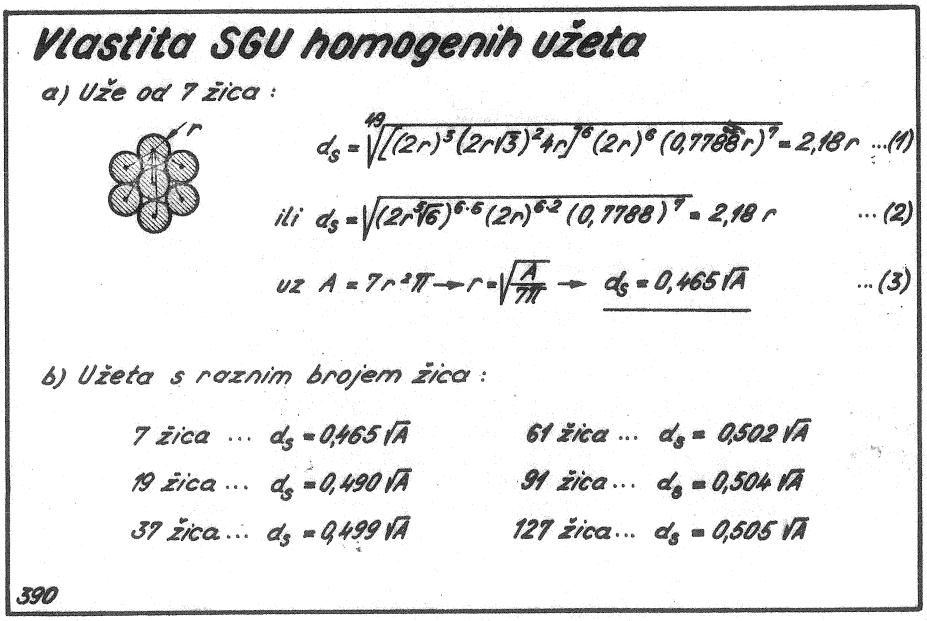
površinu unutar kružnice medjusobna SGU jednaka je radijusu kružnice. Oba ova jednostavna izraza mnogo koriste kod proračuna SGU užeta.

VLASTITA SGU HOMOGENIH UŽETA

Metoda SGU omogućuje jednostavno uzimanje u račun činjenice, da vodič nema oblik masivne žice nego oblik užeta pletenog od više žica. U tu svrhu potrebno je izračunati vlastitu SGU za razne izvedbe užeta, što ćemo najprije učiniti za homogena užeta, slika 5.12.



Sl. 5.11



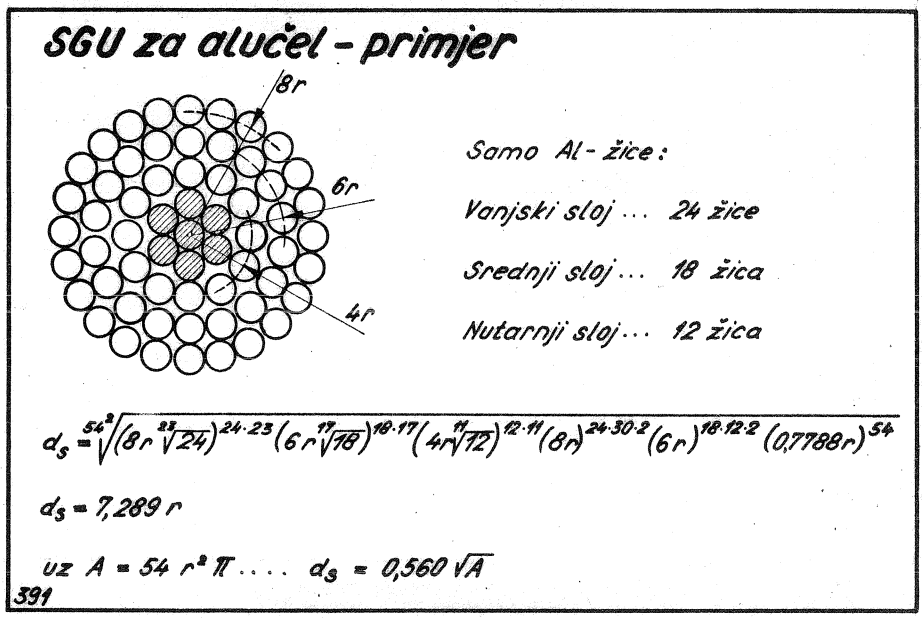
Sl. 5.12

Na slici je najprije izračunata vlastita SGU za uže od 7 žica, koje je prikazano na skici. Pod korjenom su najprije u uglatoj zagradi uzete u račun udaljenosti jedne vanjske žice od ostalih žica, i to najprije tri udaljenosti do susjednih žica, zatim dvije udaljenosti do nešto daljih žica, i konačno jedna

udaljenost do žice sa suprotne strane. Kako vanjskih žica ima 6, to sve ove udaljenosti moramo uzeti 6 puta u račun. Zatim dolaze šest udaljenosti srednje žice od svih vanjskih žica. I na kraju 7 udaljenosti svake žice same od sebe. Ako to izračunamo, dobijemo rezultat u izrazu (1).

Koristimo li izraz za medjusobnu SGU tačaka na kružnici, možemo pojednostavniti račun, što je naročito korisno za užeta s većim brojem žica. Ovdje je za uže od 7 žica račun izveden u izrazu (2). Pod korjenom je najprije dana medjusobna SGU središta vanjskih žica. Tu udaljenost moramo toliko puta uzeti u račun, koliko ima udaljenosti od svake vanjske žice do svih ostalih vanjskih žica, dakle 6.5 puta. Zatim je uzeta u račun udaljenost vanjskih žica od srednje i obrnuto, koju udaljenost treba uzeti u račun 6.2 puta. I konačno dolazi 7 puta udaljenost svake žice same od sebe. Rezultat je dakako isti kao i prije.

Ako umjesto radijusa jedne žice uvedemo u račun presjek čitavog vodiča, dobijemo izraz (3). Za ostale izvedbe homogenih vodiča dane su vlastite SGU na istoj slici.



Sl. 5.13

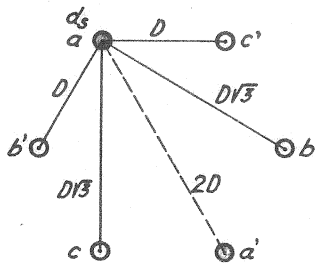
SGU ZA OSTALE IZVEDBE VODIČA

a) Nehomogena užeta. Ovdje sve žice nisu od istog materijala, pa zbog različitog specifičnog otpora neće gustoća struje u svim žicama biti ista. Ako je u jednoj žici gustoća struje npr. dva puta veća nego u drugim žicama, možemo zamisliti da se na mjestu te žice nalaze dvije isto takve žice s istom gustoćom struje kao i drugdje. Žicu s većom gustoćom struje treba dakle toliko puta uzeti u račun, koliko puta je tu gustoća struje veća nego u drugim žicama.

b) Alučel. Užeta od alučela sastoje se od aluminijskih i čeličnih žica, dakle žice im nisu od istog materijala, a osim toga čelična jezgra ima veliku magnetsku permeabilnost. Kao prvo približenje može se računati, kao da struja teče samo u aluminijskim žicama. Primjer takvog proračuna dan je na slici 5.13, gdje je za primjer uzeto uže sa Švedskog 380 kV-nog voda sa ukupno 54 žice u aluminijskom plaštu i 7 čeličnih žica iste dimenzije. Pod korjenom je najprije uzeta u račun medjusobna SGU za žice vanjskog sloja, i to 24.23 puta. Zatim je analogno postupljeno za srednji i nutarnji sloj. Iza toga je uzeta u račun medjusobna SGU svih žica vanjskog sloja od svih žica unutar vanjskog sloja, pri čemu je korištena formula za slučaj površine unutar kružnice. To ulazi u račun kao udaljenost od svih 24 žica vanjskog sloja do svih (18+12) žica srednjeg i nutarnjeg sloja i obrnuto. Dalje dolazi udaljenost žica srednjeg sloja od žica nutarnjeg sloja i obrnuto. I konačno udaljenost svih 54 žice same od sebe.

U stvari će vlastita SGU užeta od alučela biti manja nego izračunata na gornji način zbog toga što dio struje teče i kroz čeličnu jezgru.

Dvostruki simetrični vod



$$D_m = \sqrt[9]{[D^2\cdot(D\sqrt{3})^2]^2} = D\sqrt[4]{3} \qquad \ldots(1)$$

$$D_s = \sqrt[4]{(d_s\cdot 2D)^2} = \sqrt{d_s\cdot 2D} \qquad \ldots(2)$$

Za čitavu fazu A (a + a'): $L_A = 2\cdot 10^{-4}\ln\frac{D\sqrt[4]{3}}{\sqrt{d_s 2D}}$ H/km ...(3)

Za 1 vodič (a):

$$L_a = 2L_A = 2\cdot 2\cdot 10^{-4}\ln\frac{D\sqrt[4]{3}}{\sqrt{d_s\cdot 2D}} = 2\cdot 10^{-4}\ln\frac{D^2\sqrt{3}}{d_s\cdot 2D} = 2\cdot 10^{-4}\ln\frac{D\sqrt{3}}{d_s 2} \text{ H/km} \qquad \ldots(4)$$

392

Sl. 5.14

c) Šuplji vodiči. Kod šupljih vodiča možemo kod proračuna SGU postupiti slično kao u prijašnjem primjeru za alučel, ili možemo koristiti formulu za prstenasti presjek vodiča.

d) Općenito. Bilo kakvoj izvedbi vodiča možemo uvijek pridati pripadnu vlastitu SGU. Ako je zbog raznih utjecaja (skinefekt, različita magnetska permeabilnost i slično) ne možemo izračunati, možemo pokusom izmjeriti induktivitet pa unatrag računom odrediti vlastitu SGU dotičnog vodiča.

DVOSTRUKI SIMETRIČNI VOD

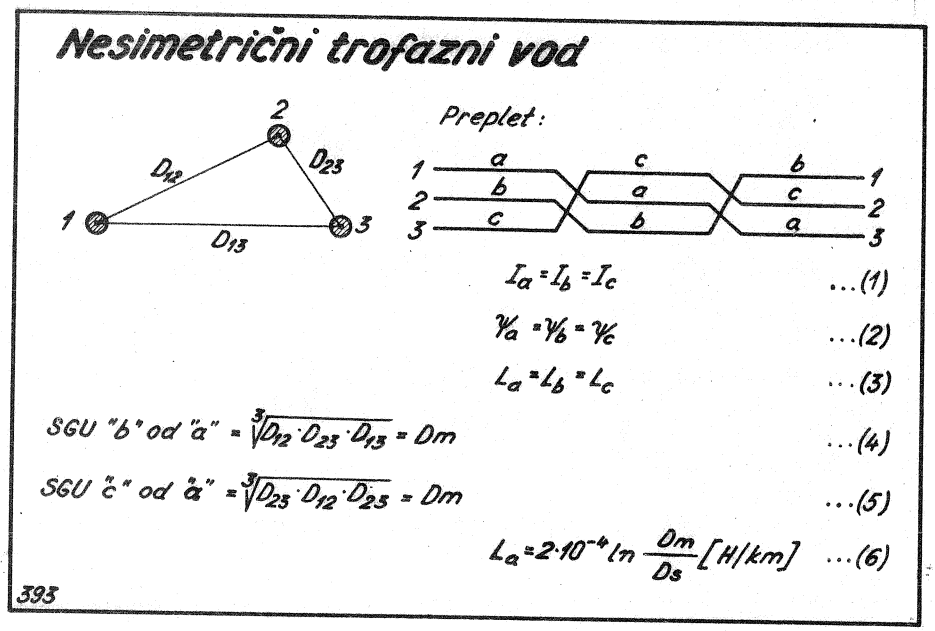
Izračunat ćemo induktivitet kod dvostrukog simetričnog voda sa šest vodiča smještenih u vrhove pravilnog šesterokuta. Pri tome ćemo koristiti metodu SGU, slika 5.14.

Na skici medjusobnog rasporeda vodiča, označeni su vodiči jedne trojke (a, b, c) i vodiči druge trojke (a', b', c'), te udaljenosti od vodiča "a" do svih ostalih vodiča i do njega samog. Put za polaznu struju čine vodiči "a" i "a'", jer su oni medjusobno paralelno spojeni i sačinjavaju jednu fazu dvostrukog voda, fazu "A". Ostali vodiči čine put za povratnu struju. Prema tome potrebno je najprije izračunati induktivitet faze "A".

Medjusobna SGU izmedju vodiča faze "A" i ostalih vodiča dana je izrazom (1), gdje pod korjenom ima ukupno osam udaljenosti od dva vodiča faze "A" do četiri ostala vodiča. Vlastita SGU faze "A" dana je izrazom (2), gdje se pod korjenom i vlastita SGU jednog vodiča i medjusobna SGU do drugog vodiča iste faze pojavljuju po dva puta. Za induktivitet daze "A" dobijemo dakle izraz (3), pri čemu je dimenzija uzeta u henrijima po kilometru. Induktivitet jednog vodiča bit će dva puta veći (jer su oba vodiča faze "A" paralelno spojena), izraz (4). Isto toliki induktivitet imat će bilo koji od šest vodiča, jer su svi oni prema ostalima u istom položaju.

NESIMETRIČNI TROFAZNI VOD

Kod nesimetričnog trofaznog voda udaljenosti izmedju vodiča nisu medjusobno jednake, slika 5.15. Zbog toga neće biti jednaka ulančenja magnetskog toka za pojedine vodiče, pa ni padovi napona u sva tri vodiča neće biti jednaki. Da se ove nesimetrije izjednače, vodovi se redovito prepliću, tako da svaki fazni vodič (a, b, c) na svakoj trećini voda zauzme drugi položaj (1, 2, 3). Time se postiže ne samo izjednačenje padova napona nego i izjednačenje kapacitivnih struja nabijanja u vodu.



Sl. 5.15

Budući da je zbog prepleta svaki vodič u istom položaju prema ostala dva, to struje u sva tri vodiča moraju biti jednake, izraz (1). Iz istog razloga su i ulančeni tokovi za sva tri vodiča medjusobno jednaki, izraz (2). Odatle slijedi, da su i induktiviteti u sva tri vodiča jednaki, izraz (3).Kod proračuna induktiviteta dovoljno je, dakle, izračunati induktivitet samo jednog vodiča.

Izračunat ćemo induktivitet vodiča "a". Polazna struja teče u tom vodiču, dočim povratna struja teče u kombinaciji vodiča "b" i "c". Medjusobni položaj vodiča "b" od vodiča "a" mijenja se od jednog do drugog prepletnog odsjeka, tako da je srednja geometrijska udaljenost izmedju ta dva vodiča dana izrazom (4). Na isti način dobijemo za srednju geometrijsku udaljenost vodiča "c" od vodiča "a" izraz (5). Vidimo da vodiči "b" i "c" imaju istu srednju geometrijsku udaljenost od vodiča "a", pa je to ujedno SGU povratne struje. Induktivitet je dakle dan izrazom (6).

Vidimo da u formuli za induktivitet prepletenog voda treba kao medjusobnu SGU uzeti srednju geometrijsku vrijednost svih triju medjusobnih udaljenosti vodiča.

DVOSTRUKI VOD DJELOMIČNO PREPLETEN

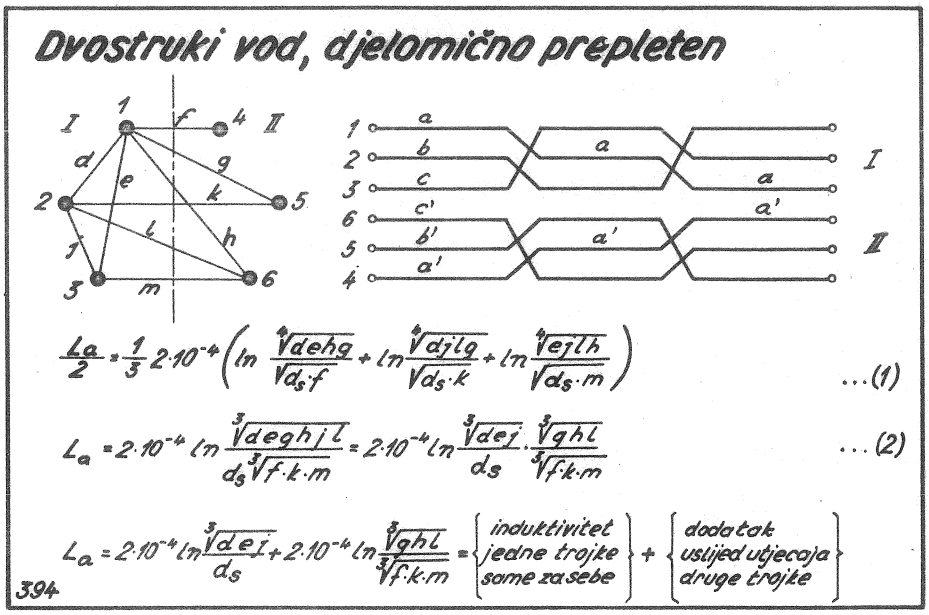
Kod dvostrukog voda sa šest vodiča može svaka trojka vodiča biti za sebe prepletena na prije opisani način. Tako dobijemo samo djelomični preplet, jer svaki vodič ne zauzme sve moguće položaje prema ostalih pet vodiča. Proračun induktiviteta za taj slučaj prikazan je na slici 5.16, gdje je uzeto da su obje trojke na stupu smještene medjusobno simetrično, pa je i preplet izveden tako da ta simetrija ostane uščuvana. Na lijevoj skici prikazan je položaj pojedinih vodiča (1 do 6), te su označene potrebne medjusobne udaljenosti ("d" do "m"). Na desnoj skici prikazana je shema prepleta.

Induktivitet čitave faze (tj. polovica induktiviteta jednog vodiča) bit će jednaka prosječnoj vrijednosti induktiviteta te faze u sva tri odsjeka, izraz (1). Ako to sredimo, dobijemo izraz (2), koji možemo rastaviti u dva člana. Prvi član jednak je induktivitetu jedne trojke same za sebe, kad druga trojka ne bi postojala, a drugi član prikazuje povećanje induktiviteta uslijed utjecaja druge trojke.

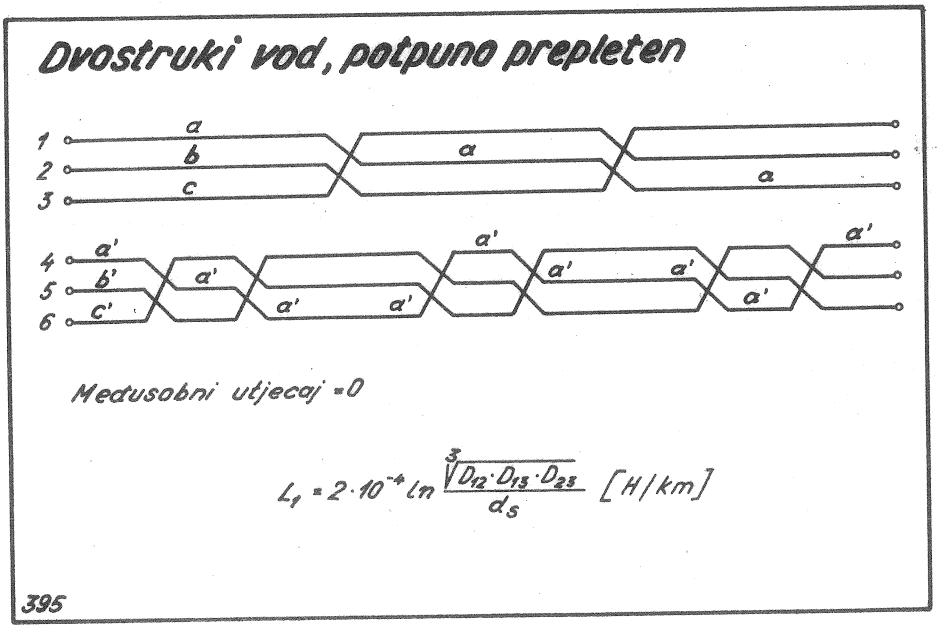
DVOSTRUKI VOD POTPUNO PREPLETEN

Ako želimo poništiti utjecaj jedne trojke na drugu, moramo dvostruki vod potpuno preplesti, kao što je prikazano na slici 5.17. Pri tome je jedna

trojka prepletena na dosad opisani način, tj. preplet je izvršen u svakoj trećini voda. Druga trojka je prepletena unutar svake trećine prve trojke. U stvari preplet druge trojke se može izostaviti na onim mjestima, gdje je prepletena prva trojka, jer se i tako postiže isti rezultat. Ako provjerimo na prikazanoj shemi prepleta, vidjet ćemo, da svaki vodič kroz jednake dužine postiže sve moguće položaje prema ostala dva vodiča iste trojke i prema tri vodiča druge trojke. Na taj način jedna trojka nema više utjecaja na drugu. Induktivitet jednog vodiča dan je istim izrazom, kao da druge trojke niti nema.



Sl. 5.16

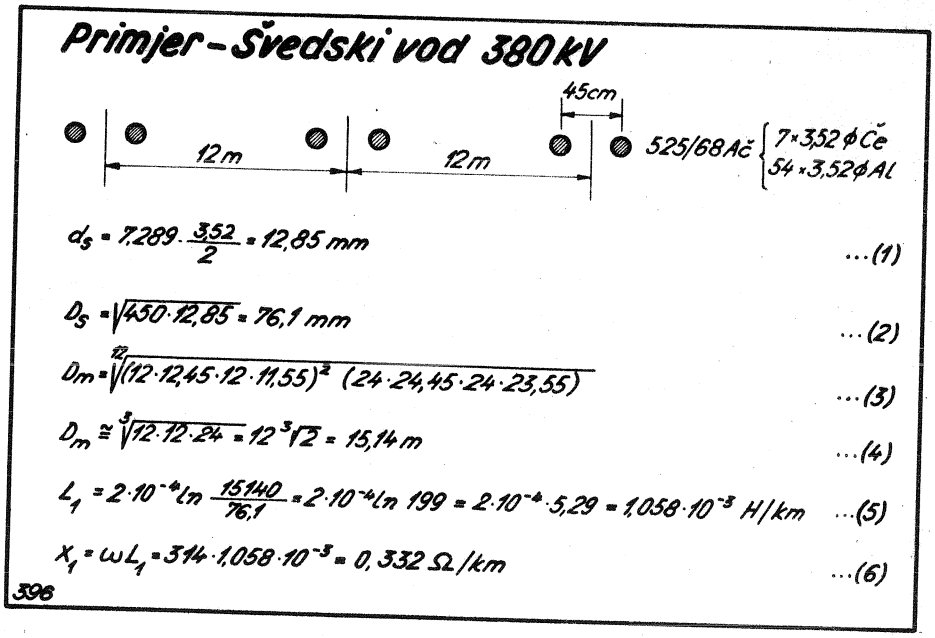


Sl. 5.17

PRIMJER - ŠVEDSKI VOD 380 kV

Za brojčani primjer izračunavanja induktiviteta uzet ćemo Švedski vod 380 kV, s vodičima u snopu. Na slici 5.18 dana je skica rasporeda vodiča s medjusobnim udaljenostima. Svaki se vodič sastoji od 7 čeličnih i 54 aluminijske žice promjera 3,52 mm.

Vlastita SGU jednog vodiča (1) izračunata je na temelju rezultata dobivenog u slici 5.13, a vlastita SGU čitave faze od dva vodiča u snopu (2) izračunata je na već prikazani način. Medjusobna SGU (3), uz pretpostavku da je vod prepleten, dobijemo iz medjusobnih udaljenosti svakog vodiča jedne faze do svih vodiča ostalih faza. Ili pak dobijemo dovoljno tačni rezultat za medjusobnu SGU (4), ako računamo s udaljenostima izmedju simetrala snopa. Induktivitet (5) je dalje dobiven prema poznatoj formuli, a induktivni otpor (6) dobijemo, ako induktivitet množimo s kružnom frekvencijom.



Sl. 5.18

INDUKTIVITET KABELA

Za proračun induktiviteta kabela možemo upotrijebiti iste metode kao i kod proračuna induktiviteta nadzemnih vodova, pri čemu pretpostavljamo da je magnetska permeabilnost izolacije oko vodiča jednaka permeabilnosti vakuuma. Kod kabela, medjutim, imamo i metalni plašt u kojem općenito može teći neka struja. Kod trožilnih kabela plašt nije ulančen s magnetskim tokom, pa prema tome nema niti utjecaja na induktivitet. Kod jednožilnih kabela inducira se u plaštevima napon, no ako plaštevi nisu medjusobno spojeni, pa u njima ne može teći struja, onda opet to nema utjecaja na induktivitet. No ako su plaštevi medjusobno vodljivo spojeni, u njima će moći teći struja, pa se uslijed toga induktivitet smanjuje za nekih 5 do 10%.

Kod kabela se obično računa s eksperimentalnim vrijednostima, prema podacima tvornice, a približne vrijednosti za razne izvedbe mogu se naći u priručnicima.

6. KAPACITET VODA

OPĆENITO O KAPACITETU

Kapacitet je svojstvo voda, da uz odredjeni napon može na sebe primiti izvjesnu količinu električnog naboja. Kapacitet dolazi do izražaja zbog toga, što svaka promjena napona zahtijeva promjenu naboja, pa se kao posljedica pojavljuje električna struja. Jedinica za mjerenje kapaciteta jest farad (F). Kapa-

citet 1 farad ima onaj vodič, kod kojega povećanje napona za 1 volt dovede do povećanja naboja za 1 ampersekundu.

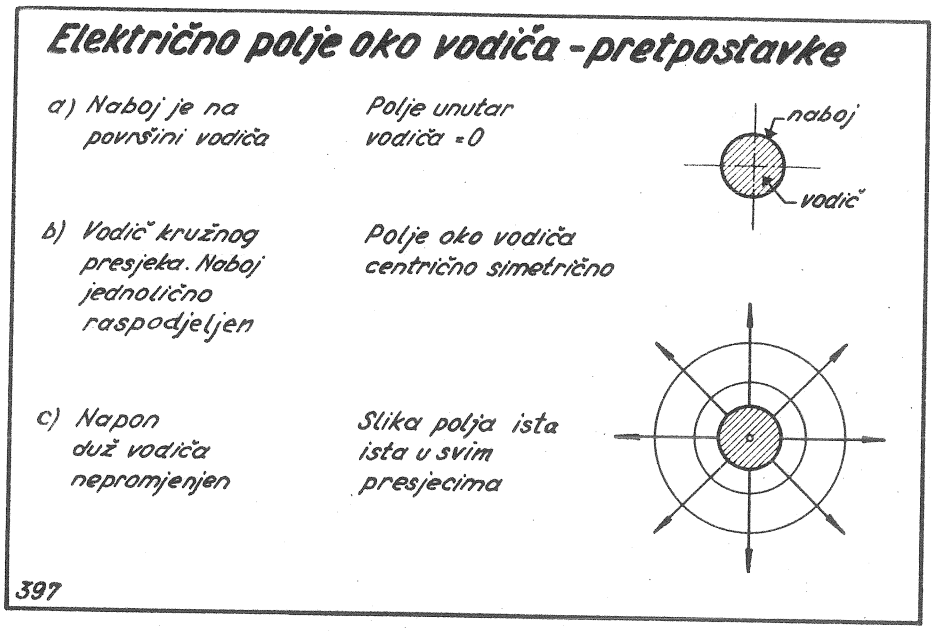
Kod vodova za prijenos energije pretpostavljamo da je kapacitet konstantan, a to je uslovljeno pretpostavkom da je u krugu električnog toka dielektričnost konstantna. U tom slučaju možemo kapacitet definirati odnosom električnog naboja i napona.

Oko svakog naboja se stvara električno polje, kojim su definirane razlike potencijala izmedju pojedinih tačaka. Zbog pretpostavke da je dielektričnost konstantna, bit će gustoća električnog toka i jakost električnog polja medjusobno proporcionalne, pa se može primijeniti zakon superpozicije i ukupna razlika potencijala može se dobiti sumiranjem pojedinih razlika potencijala, koje nastaju u električnim poljima pojedinih naboja.

Gornja razmatranja čine osnov za proračun kapaciteta nekog vodiča u našem vodu, pa ćemo tim putem ići prilikom proračuna kapaciteta.

ELEKTRIČNO POLJE OKO VODIČA

Da bismo pojednostavnili račun, moramo najprije utvrditi neke činjenice i postaviti neke pretpostavke, kao što se vidi na slici 6.1



Sl. 6.1

a) U prvom redu moramo utvrditi, da se naboj uvijek nalazi na površini vodiča, pa iz toga slijedi kao posljedica, da unutar vodiča nema niti električnog toka niti električnog polja.

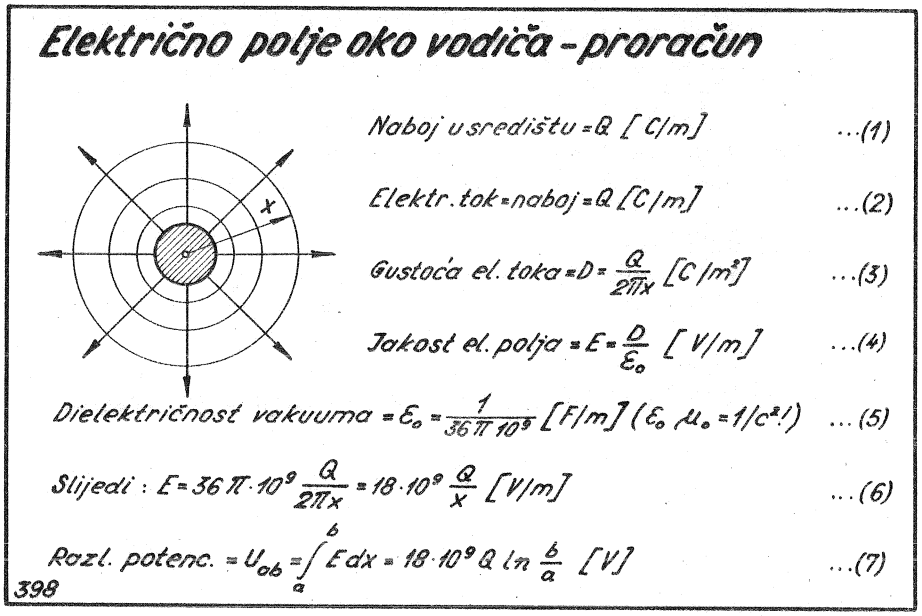
b) Nadalje pretpostavljamo da je vodič izveden u obliku okrugle masivne žice, te da je naboj na površini tog vodiča jednolično rasporedjen. Što se tiče oblika vodiča, o opravdanosti te pretpostavke reći ćemo kasnije nekoliko riječi. Što se tiče jednoličnosti raspodjele naboja na površini vodiča, takva je pretpostavka opravdana, jer ne dovodi do većih griješaka, ako je razmak izmedju vodiča nekoliko stotina puta veći od radijusa vodičam što je redovito slučaj kod naših vodova, ukoliko nemaju vodiče u snopu. Uz te pretpostavke električno polje će biti simetrično obzirom na središte vodiča, pa možemo zamisliti da je čitav naboj koncentriran u središtu vodiča.

c) Konačno ćemo pretpostaviti da nema promjene napona duž vodiča, tako da će kod ravne i veoma dugačke žice slika polja u svim poprečnim presjecima biti ista. Na taj način naše promatranje možemo ograničiti samo na jedan odsječak voda.

Na temelju gornjih pretpostavki izvršen je proračun električnog polja oko vodiča, što je prikazano na slici 6.2. Zbog centrične simetrije linije električnog toka i linije električnog polja su radijalni pravci, koji izlaze iz

vodiča okomito na njegovu površinu. Ekvipotencijalne plohe su cilindrične plohe, koje se u poprečnom presjeku prikazuju kao koncentrične kružnice.

Promatrajmo odsjek vodiča dužine 1 metar. Naboj, koji zamišljamo koncentriranim u središtu, označimo sa "Q",kao u izrazu (1). Električni tok, koji izlazi iz vodiča, jednak je naboju, izraz (2).



Sl. 6.2

Gustoća električnog toka na nekoj udaljenosti "x" dobiva se, ako se električni tok podijeli površinom cilindrične plohe, na kojoj se traži gustoća toka, jer je gustoća toka ista na bilo kojoj tački te cilindrične plohe. Tako dobivamo izraz (3).

Jakost električnog polja dobivamo, ako gustoću električnog toka dijelimo s dielektričnošću, pri čemu ćemo kod nadzemnih vodova računati s dielektričnošću vakuuma, izraz (4). Dielektričnost vakuuma dana je izrazom (5), pri čemu napominjemo da je umnožak dielektričnosti i permeabilnosti jednak recipročnoj vrijednosti kvadrata brzine svjetlosti. Iz izraza (4) i (5) slijedi izraz (6), koji nam daje jakost električnog polja na udaljenosti "x". Razliku potencijala izmedju dvije tačke "a" i "b" dobijemo ako u tim granicama integriramo izraz za jakost električnog polja, izraz (7).

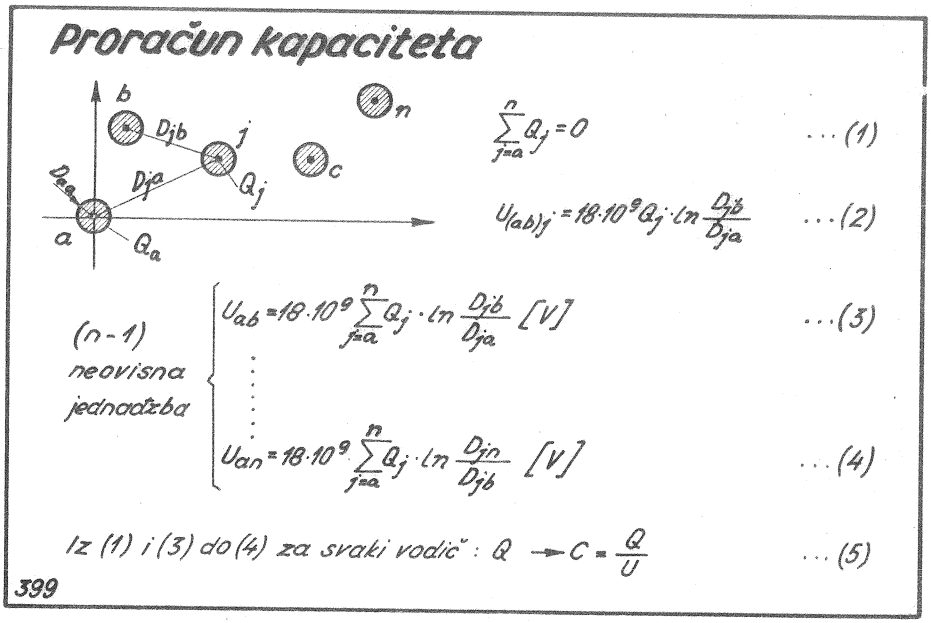
PRORAČUN KAPACITETA

Na slici 6.3 prikazan je postupak za proračun kapaciteta kod voda s proizvoljnim brojem vodiča. Vodiči su označeni slovima "a", "b", ... "j", ..."n", naboji na vodičima označeni su sa "Q_a", "Q_b" itd., a udaljenosti izmedju središta vodiča sa "D_{ab}", "D_{ac}" itd., dok su radijusi vodiča (a to je udaljenost naboja tog vodiča od njegovog središta) označeni sa "D_{aa}", "D_{bb}" itd. Polazimo nadalje od pretpostavke da promatrani vodiči čine cjelinu u nekom vodu, te da je suma svih naboja jednaka nuli izraz (1), što će biti ispunjeno, ako je suma vektora napona jednaka nuli.

Proračun počinjemo izračunavanjem razlike potencijala izmedju dvije tačke "a" i "b", koji nastaju uslijed polja prouzrokovanog nabojem vodiča "j", izraz (2). To je samo jedna komponenta razlike potencijala izmedju te dvije tačke, a naboji ostalih vodiča dat će ostale komponente prema analogno gradjenim izrazima. Ukupnu razliku potencija dobit ćemo kao sumu svih tih pojedinih članova, pa tako dobijemo izraz (3) u kojem ima toliko članova koliko ima vodiča.

Izraz (3) nam još nije dovoljan za rješenje zadatka, jer nam naboji pojedinih vodiča nisu poznati. Zbog toga ćemo postaviti daljnje izraze za razlike potencija, npr. izmedju tačaka "a" i "c", pa izmedju "a" i "d" itd. sve

do izraza za razliku potencijala izmedju tačaka "a" i "n", izraz (4). S time smo dobili sustav neovisnih jednadžbi, ali imamo jednu jednadžbu manje nego što imamo nepoznanica. Postavljanje daljnjih izraza za razlike potencijala, npr. izmedju tačaka "b" i "c" itd. ne vodi k svrsi, jer to više nisu neovisne jednadžbe, i one nam ne kažu ništa nova.



Sl. 6.3

Zbog toga uz sustav od (n-1) neovisne jednadžbe, koje su prikazane izrazima (3) do (4), koristimo još izraz (1), i tako imamo isti broj jednadžbi kao i nepoznanica. Možemo dakle izračunati naboj za svaki pojedini vodič, a zatim možemo izračunati kapacitet pojedinog vodiča iz odnosa naboja i napona, izraz (5).

VOD S DVIJE ŽICE

Prikazani postupak prikazat ćemo na primjeru voda s dvije žice, što je učinjeno na slici 6.4. Promjer svake žice iznosi "r", a razmak središta žica "D". Lijeva žica označena je sa "a", a desna sa "b". Promatrajući udaljenosti najprije od središta lijeve žice moramo uzeti da se naboj nalazi na površini te žice, dok za desnu žicu možemo smatrati da je naboj koncentriran u središtu.

Naboji pojedinih žica su istog iznosa ali različitog predznaka, izrazi (1). Potrebne udaljenosti s oznakama kao u prikazanom postupku navedene su u izrazima (2). Razlika potencijala izmedju žica prema prije izvedenoj formuli dana je izrazom (3), a ako tu uvrstimo izraze (1) i (2) te sredimo, dobijemo izraz (4). Za kapacitet jednog vodiča, npr. vodiča "a", dobijemo ako naboj vodiča - izračunat iz izraza (4) - podijelimo s naponom vodiča, tj. s naponom izmedju vodiča i neutralne tačke. Dobiveni rezultat, izraz (5), predstavlja kapacitet jednog vodiča prema neutralnoj tački.

Zbog simetrije kapaciteti obaju vodiča su medjusobno jednaki.

SIMETRIČNI TROFAZNI VOD

Na slici 6.5 prikazan je izvod formule za kapacitet vodiča kod trofaznog simetričnog voda, tj. voda kojemu su vodiči smješteni u vrhove istostraničnog trokuta. Pri tome smatramo da su vodiči izvedeni kao masivne okrugle žice radijusa "r", a medjusobna udaljenost središta vodiča da iznosi "D". Na istoj slici dan je i vektorski prikaz napona pojedinih vodiča prema neutralnoj tački, kao i oni naponi izmedju vodiča, koji su nam potrebni u daljnjem proračunu.

Vod s dvije žice

$$Q_a = Q\,, \qquad Q_b = -Q \qquad \ldots(1)$$

$$D_{aa} = D_{bb} = r\,, \qquad D_{ab} = D \qquad \ldots(2)$$

$$U_{ab} = 18\cdot 10^9 \left(Q_a \ln \frac{D_{ab}}{D_{aa}} + Q_b \ln \frac{D_{bb}}{D_{ba}} \right) \qquad \ldots(3)$$

$$= 18\cdot 10^9 \left(Q \ln \frac{D}{r} - Q \ln \frac{r}{D} \right) = 18\cdot 10^9 \, 2Q \ln \frac{D}{r} \qquad \ldots(4)$$

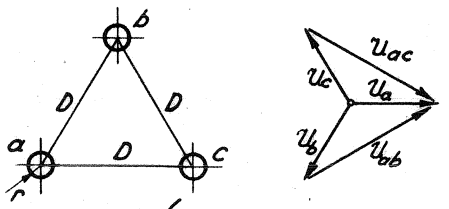
Kapacitet vodiča "a" prema neutralnoj točki:

$$C_a = \frac{Q_a}{U_a} = \frac{Q}{U_{ab}/2} = \frac{1}{18\cdot 10^9 \ln \frac{D}{r}} \ [F/m] \qquad \ldots(5)$$

400

Sl. 6.4

Simetrični trofazni vod



$$Q_a + Q_b + Q_c = 0 \qquad \ldots(1)$$

$$Q_b + Q_c = -Q_a \qquad \ldots(2)$$

$$U_{bb} + U_{bc} = 3U_a \qquad \ldots(3)$$

$$U_{ab} = 18\cdot 10^9 \left(Q_a \ln \frac{D}{r} + Q_b \ln \frac{r}{D} + Q_c \ln \frac{D}{D} \right) = 18\cdot 10^9 (Q_a - Q_b) \ln \frac{D}{r} \qquad \ldots(4)$$

$$U_{bc} = 18\cdot 10^9 \left(Q_a \ln \frac{D}{r} + Q_b \ln \frac{D}{D} + Q_c \ln \frac{r}{D} \right) = 18\cdot 10^9 (Q_a - Q_c) \ln \frac{D}{r} \qquad \ldots(5)$$

$$U_{ab} + U_{bc} = 18\cdot 10^9 \left[2Q_a - (Q_b + Q_c) \right] \ln \frac{D}{r} = 18\cdot 10^9 \, 3Q_a \ln \frac{D}{r} \qquad \ldots(6)$$

$$U_a = \frac{U_{ab} + U_{ac}}{3} = 18\cdot 10^9 \, Q_a \ln \frac{D}{r} \qquad \ldots(7)$$

$$C_a = \frac{Q_a}{U_a} = \frac{1}{18\cdot 10^9 \ln \frac{D}{r}} \ [F/m] \qquad \ldots(8)$$

401

Sl. 6.5

Najprije postavljamo izraz (1), koji kaže da je suma svih naboja jednaka nuli, što je osnovna pretpostavka, kod ovog postupka za proračun kapaciteta. Odatle slijedi, da je suma naboja dvaju vodiča jednaka naboju trećeg vodiča ali s protivnim predznakom, izraz (2). Nadalje možemo pisati da je suma napona izmedju vodiča "a" i "b" i napona izmedju "a" i "c" jednaka trostrukom naponu vodiča "a" prema neutralnoj tački, izraz (3), što slijedi iz vektorske slike napona.

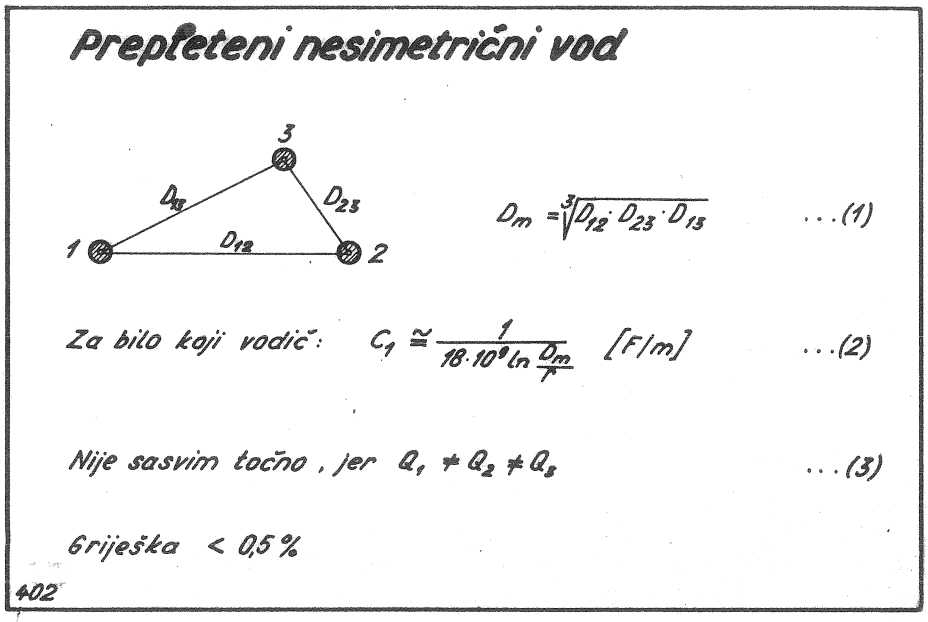
Postavit ćemo sad izraz za razliku napona "ab" prema prije izvedenoj formuli. Treći član u ovom izrazu otpada, jer je jednak nuli, a ostalo možemo srediti, izraz (4). Analogno postupimo za razliku napona "ac", pa dobijemo izraz (5). Ako sumiramo izraze (4) i (5), te uvrstimo izraz (2), dobijemo izraz (6). Kombinirajući izraze (3) i (6) dobijemo izraz (7). Odatle možemo postaviti

odnos naboja i napona, pa dobijemo izraz (8) za kapacitet jednog vodiča prema neutralnoj tački. Zbog simetrije su kapaciteti svih triju vodiča medjusobno jednaki.

Vidimo da smo u stvari za kapacitet vodiča dobili isti izraz kao i kod voda s dvije žice.

PREPLETENI NESIMETRIČNI VOD

Kod prepletenog nesimetričnog voda, kod kojeg medjusobne udaljenosti izmedju vodiča nisu jednake, može se računati sa srednjom geometrijskom udaljenošću izmedju vodiča, izraz (1), kao što je prikazano na slici 6.6. U tom slučaju kapacitet za bilo koji vodič dan je izrazom (2), analogno kao i kod simetričnog voda. To znači da smo za prepleteni nesimetrični vod kod proračuna kapaciteta postupili na isti način kao i kod proračuna induktiviteta.



Sl. 6.6

No za razliku od formule za proračun induktiviteta, formule za kapacitet prepletenog nesimetričnog voda ne daje tačan rezultat nego vrijedi samo približno, kao što je i označeno u izrazu (2). Razlog je u tome, što ovdje usprkos prepleta naboji po metru dužine voda nisu isti za sva tri položaja vodiča, izraz (3). No dade se pokazati, da je greška redovito manja od o,5%, pa se zbog toga ovakav način proračuna redovito primjenjuje.

UTJECAJ ZEMLJE NA KAPACITET

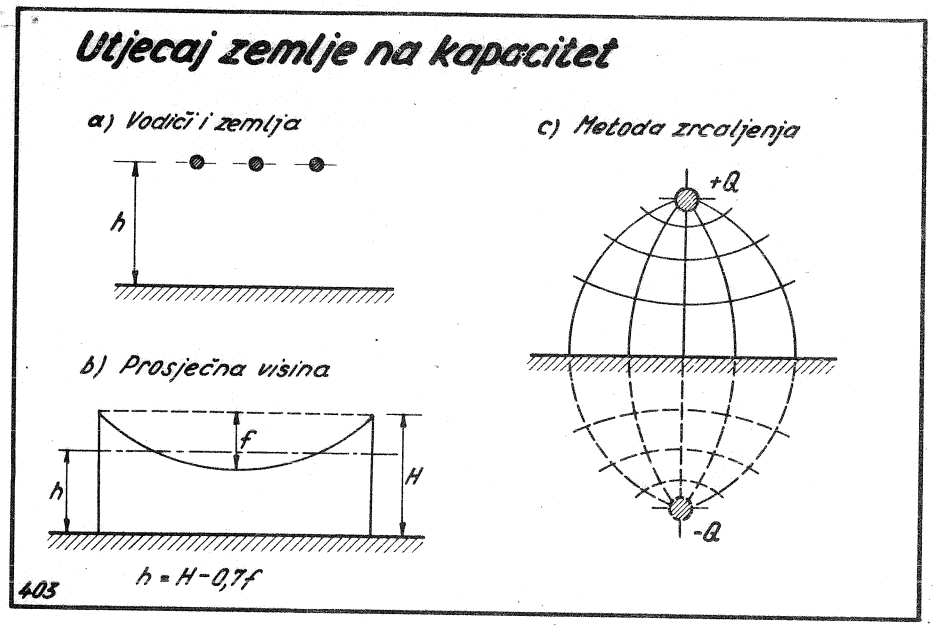
Na slici 6.7 su prikazani osnovni momenti u vezi s utjecajem zemlje na kapacitet nadzemnih vodova.

a) U prvom redu činjenica jest, da se vodiči promatranog nadzemnog voda ne nalaze beskonačno daleko od površine zemlje, nego je naprotiv njihova udaljenost od zemlje istog reda veličine kao i njihov medjusobni razmak. Površinu zemlje, medjutim, možemo smatrati površinom vodljivog tijela, tako da se na površini zemlje pod utjecajem električnog polja vodiča također skupi električni naboj, pa će to u izvjesnoj mjeri povećati kapacitet vodiča.

b) Kod promatranja utjecaja zemlje važna je visina vodiča iznad tla. Pri tome obično računamo s nekom prosječnom visinom. Kod ravnog terena možemo kao prosječnu visinu uzeti onu koju dobijemo, ako od visine ovjesišta na stupu odbijemo 7/1o provjesa.

c) Kod proračuna utjecaja zemlje na kapacitet koristimo tzv. metodu zrcaljenja, i tako izbjegnemo potrebu da odredjujemo raspodjelu naboja na površini zemlje. Površina zemlje, koju u proračunima uzimamo kao horizontalnu ravninu, predstavlja naime ujedno jednu od ekvipotencijalnih ploha. Slika polja izmedju

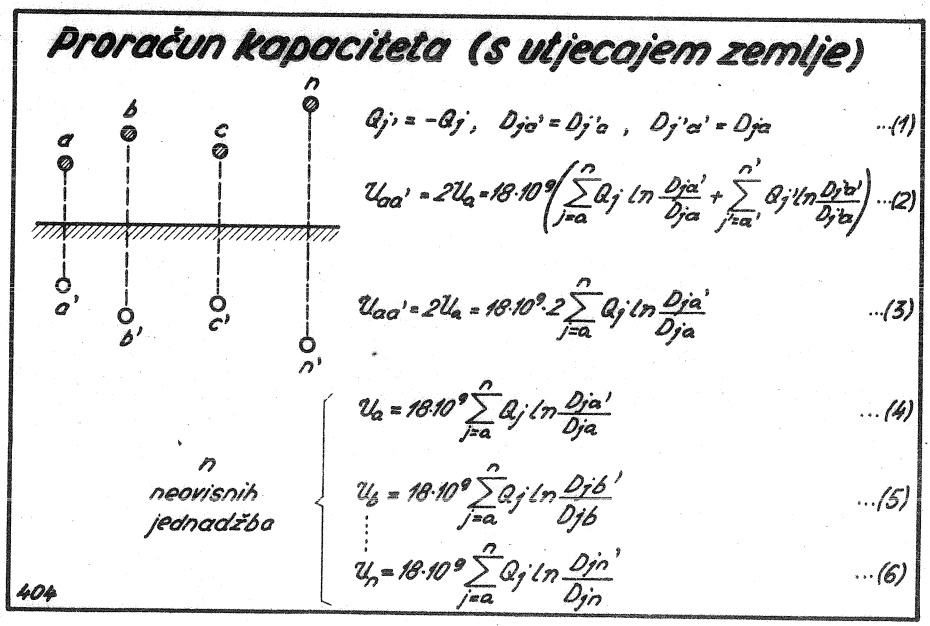
vodiča i zemlje ista je kao i dio slike polja izmedju dva vodiča na dvostrukoj udaljenosti. Drugim riječima električno polje je isto, kao kad umjesto s površinom zemlje računamo sa zrcalnom slikom vodiča (pri čemu površina zemlje igra ulogu zrcala). Pri tome zrcalnoj slici vodiča pridajemo isti naboj kao što ga ima stvarni vodič, ali sa suprotnim predznakom.



Sl. 6.7

PRORAČUN KAPACITETA S UTJECAJEM ZEMLJE

Na slici 6.8 prikazana je primjena metode zrcaljenja na proračun kapaciteta kod voda s proizvoljnim brojem vodiča. Stvarne vodiče ćemo označiti slovima od "a" do "n", a njihove zrcalne slike sa "a'" do "n'". Radi pojednostavnjenja postupka postavit ćemo najprije neke uslove, koji slijede iz metode zr-



Sl. 6.8

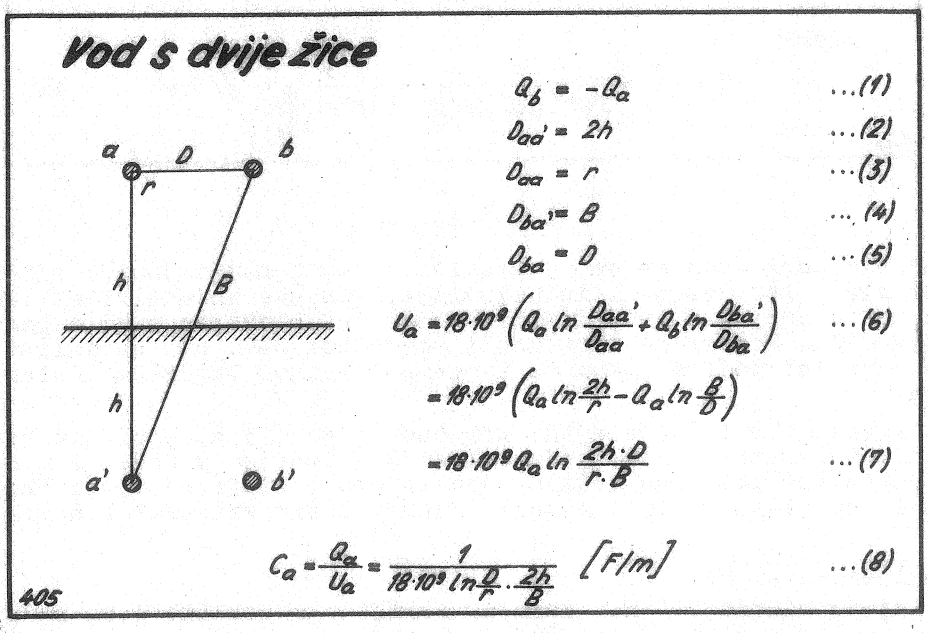
caljenja, i to: naboj bilo koje zrcalne slike jednak je naboju samog vodiča ali s protivnim predznakom, udaljenost od jednog vodiča do zrcalne slike drugog vodiča jednaka je udaljenosti zrcalne slike prvog vodiča do stvarnog drugog vodiča, i udaljenost izmedju dva vodiča jednaka je udaljenosti izmedju njihovih zrcalnih slika, izrazi (1).

Na temelju prije izvedenog izraza za razliku potencijala izmedju dvije tačke postavit ćemo izraz za razliku potencijala izmedju vodiča "a" i njegove zrcalne slike, a ta je razlika potencija jednaka dvostrukom naponu izmedju vodiča i zemlje, izraz (2). Pri tome smo sve članove s nabojima stvarnih vodiča skupili pod jednak znak sume, a sve članove s nabojima zrcalnih slika pod drugi znak sume. Iz razloga simetrije, navedenih u izrazima (1), slijedi da je drugi član u izrazu (2) jednak prvom članu, tako da to možemo pisati kao izraz (3).

Iz izraza (3) slijedi izraz (4), kojim je dana razlika potencijala izmedju vodiča "a" i zemlje, a pod znakom sume su obuhvaćeni samo članovi s nabojima stvarnih vodiča. Analogno možemo postaviti izraz (5) za napon vodiča "b", i tako za sve vodiče sve do vodiča "n", izraz (6). Time smo dobili sistem s toliko jednadžbi, koliko imamo nepoznanica, pa možemo izračunati naboje pojedinih vodiča, te konačno i kapacitet pojedinih vodiča.

VOD S DVIJE ŽICE

Primjena izvedenog postupka na proračun kapaciteta kod voda s dvije žice prikazana je na slici 6.9. Na skici su prikazana dva vodiča i zemlja te zrcalna slika vodiča, te su označene pojedine udaljenosti, koje su nam potrebne za proračun.



Sl. 6.9

Najprije ćemo postaviti neke osnovne izraze, i to: naboj desnog vodiča jednak je naboju lijevog vodiča ali sa suprotnim predznakom, izraz (1); udaljenost lijevog vodiča od njegove zrcalne slike jednaka je dvostrukoj njegovoj visini, izraz (2); udaljenost naboja lijevog vodiča od njegova središta jednaka je radijusu , izraz (3); udaljenost desnog vodiča od zrcalne slike lijevoga označena je sa "B", izraz (4); i udaljenost izmedju vodiča označena je sa "D", izraz (5).

Prema prije izvedenoj formuli napisat ćemo izraz za razliku potencijala izmedju lijevog vodiča i zemlje, izraz (6). Ako ovamo uvrstimo izraze (1) do (5) i sredimo, dobijemo izraz (7). Odatle možemo lako izračunati kapacitet lijevog vodiča, izraz (8). Kao što se vidi, u izrazu za kapacitet dolazi pod oznakom logaritma još odnos "2h/B", a taj je nešto manji od jedinice. Prema tome će se zbog utjecaja zemlje kapacitet povećati, ali ne znatno. To povećanje iznosi najviše nekoliko postotaka.

METODA SGU ZA PRORAČUN KAPACITETA

Kod proračuna kapaciteta možemo takodjer primijeniti metodu SGU (metodu srednjih geometrijskih udaljenosti) i dobiti dovoljno tačne rezultate. Potrebna razmatranja u tom smislu prikazana su na slici 6.1o.

Poznata je činjenica, da za vod bez gubitaka vrijedi izraz (1), koji kaže da je umnožak induktiviteta i kapaciteta po jedinici dužine jednak recipročnoj vrijednosti kvadrata brzine svjetlosti u vakuumu, pri čemu je brzina svjetlosti dana izrazom (2). O ovoj činjenici će biti više govora kasnije.

Metoda SGU za proračun kapaciteta

Za vod bez gubitaka :

$$L_1 C_1 = \frac{1}{c^2} \qquad \ldots(1)$$

c = brzina svjetlosti u vakuumu = $30 \cdot 10^8$ m/sek ...(2)

Za stvarni vod:

$$L_v \cdot C_1 \simeq \frac{1}{c^2} \qquad \ldots(3)$$

L_v = vanjski induktivitet = $2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D_m}{D_{ss}}$ [H/m] ...(4)

D_{ss} = vlastita SGU površine vodiča

Slijedi :

$$C_1 = \frac{1}{c^2 L_v} = \frac{1}{9 \cdot 10^{16} 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D_m}{D_{ss}}} = \frac{1}{18 \cdot 10^9 \ln \frac{D_m}{D_{ss}}} \quad [F/m] \qquad \ldots(5)$$

406

Sl. 6.1o

Kod stvarnog voda možemo postaviti s dovoljnom tačnošću sličan izraz (3), u koji ulazi tzv. vanjski induktivitet. Vanjski induktivitet dan je izrazom (4), a to je onaj dio induktiviteta koji je uslovljen samo magnetskim poljem izvan vodiča. Možemo ga izračunati po metodi SGU, ako zamislimo da struja teče po površini vodiča, pa u nazivnik pod znakom logaritma dolazi SGU površine vodiča.

Iz izraza (3) i (4) slijedi konačno izraz (5) za proračun kapaciteta, gdje pod znakom logaritma u brojnik dolazi SGU izmedju vodiča, a u nazivnik dolazi vlastita SGU površine vodiča. Ako se vod sastoji od većeg broja vodiča, treba medjusobnu vlastitu SGU računati analogno kao kod proračuna induktiviteta.

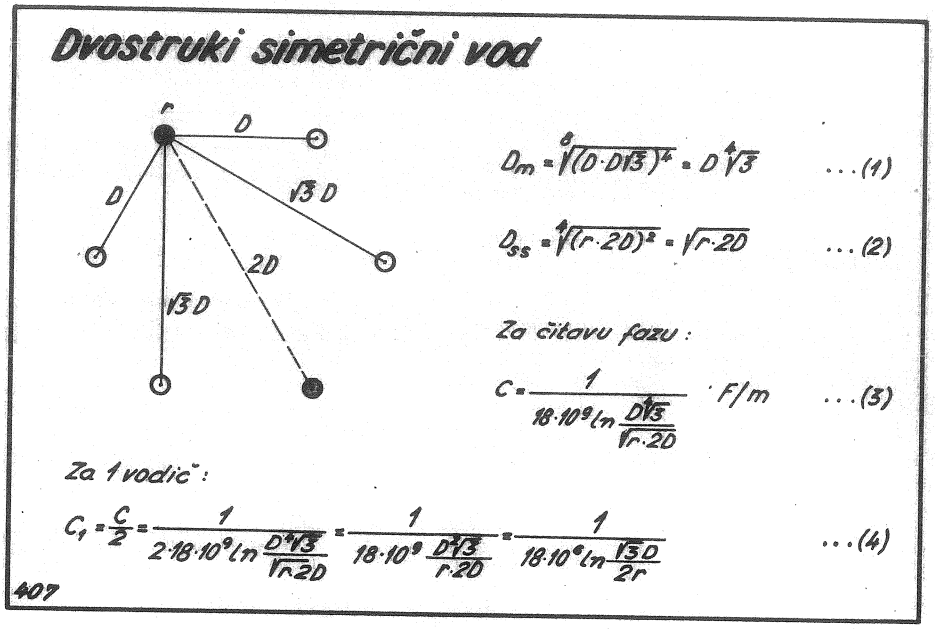
DVOSTRUKI SIMETRIČNI VOD

Primjenu metode SGU na proračun kapaciteta pokazat ćemo na primjeru dvostrukog simetričnog voda, kao što je prikazano na slici 6.11. Vodiči se nalaze u vrhovima simetričnog šesterokuta, s time da se vodiči promatrane faze nalaze dijagonalno jedan nasuprot drugome (ta su dva vodiča na skici ispunjena crno). Na skici su označene pojedine udaljenosti i radijus vodiča, koji predstavlja vlastitu SGU za sam jedan vodič.

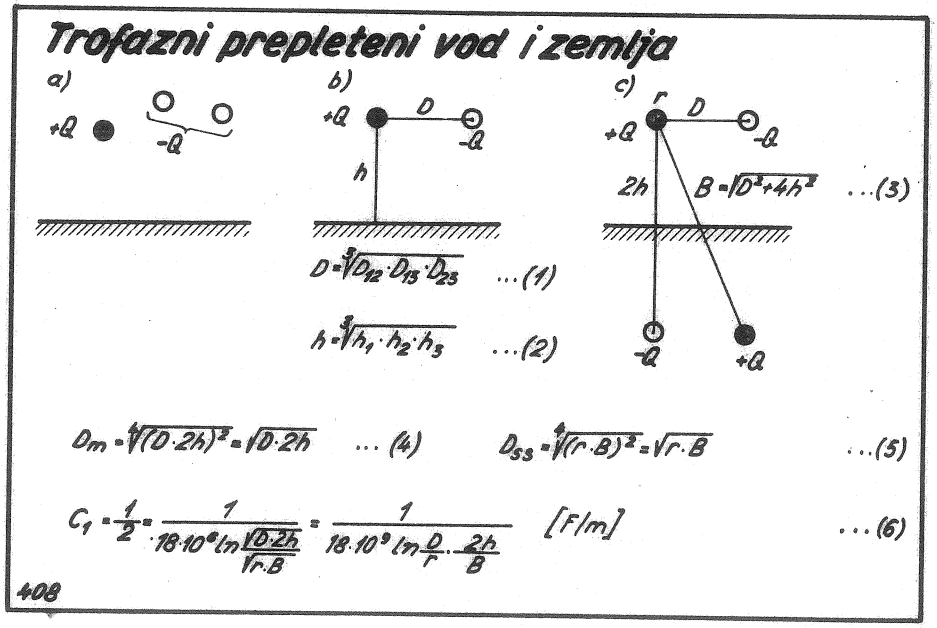
Medjusobnu SGU dobijemo iz svih udaljenosti od vodiča promatrane faze (crno) do vodiča ostalih faza, izraz (1). Vlastitu SGU promatrane faze dobijemo iz udaljenosti izmedju vodiča same promatrane faze (crno) te iz radijusa vodiča, izraz (2). Za čitavu fazu kapacitet je dan izrazom (3) prema prije utvrdjenoj formuli. Za jedan vodič kapacitet će biti dva puta manji, jer su vodiči paralelno spojeni, pa tako dobijemo izraz (4).

TROFAZNI PREPLETENI VOD I ZEMLJA

Nadalje ćemo primjenu metode SGU prikazati na proračunu kapaciteta kod prepletenog nesimetričnog trofaznog voda, uz utjecaj zemlje slika 6.12. Pri tome ćemo ići ovim redom razmatranja.



Sl. 6.11



Sl. 6.12

a) Na skici su prikazana tri vodiča, od kojih jedan neka ima pozitivni naboj (crno ispunjen), pa ostala dva vodiča predstavljaju vodiče s negativnim nabojem.

b) Dva vodiča s negativnim nabojem možemo u mislima spojiti zajedno s istim ukupnim nabojem. Udaljenost izmedju tako dobivenog negativnog vodiča i pozitivnog vodiča možemo izračunati prema izrazu (1), jer je vod prepleten. Isto tako visinu pozitivnog i negativnog vodiča iznad zemlje možemo iz istog razloga izračunati prema izrazu (2).

c) Na skici su nacrtane i dvije zrcalne slike vodiča s oznakom predznaka naboja, pa su jedan vodič i zrcalna slika drugog vodiča, koji oba imaju pozitiv-

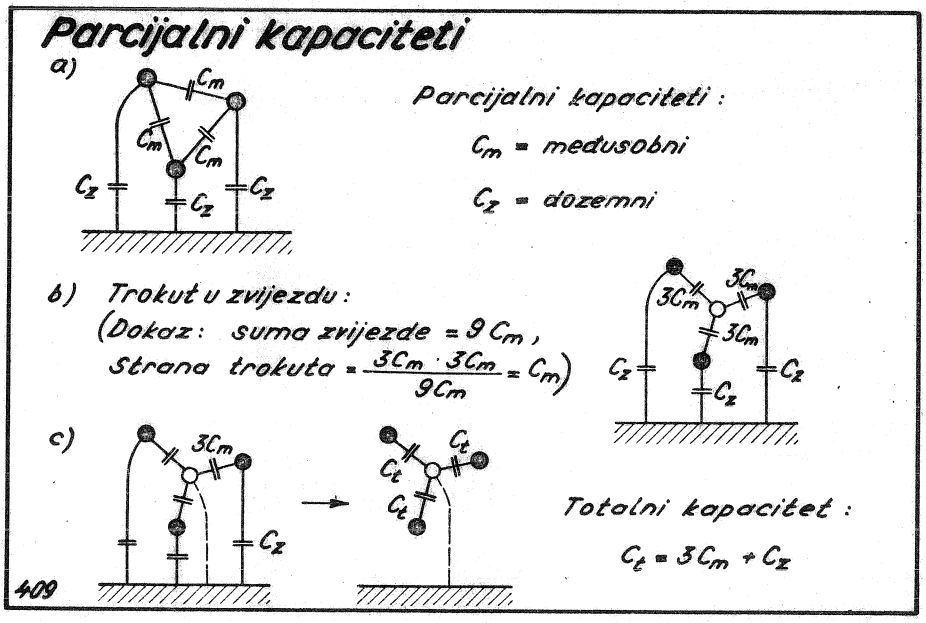
ni predznak, ispunjeni crno, jer oni predstavljaju skup pozitivnih vodiča. Na skici su označene i potrebne udaljenosti, pri čemu dijagonalnu udaljenost "B" možemo izračunati iz Pitagorina poučka, izraz (3).

Medjusobnu SGU izračunat ćemo iz svih pojedinih udaljenosti izmedju pozitivnih i negativnih vodiča, izraz (4), a vlastitu SGU pozitivnih vodiča izračunat ćemo iz njihove medjusobne udaljenosti i radijusa, izraz (5). Kapacitet jednog vodiča jednak je polovici kapaciteta za čitav skup od dva pozitivna vodiča, pa tako dobijemo izraz (6). Vidimo da smo dobili isti izraz kao za vod s dvije žice uz utjecaj zemlje što je i razumljivo.

PARCIJALNI KAPACITETI

Promatrat ćemo prepleteni trofazni vod i zemlju, slika 6.13.

a) Promatrajući kapacitete kod tog voda, možemo zamisliti da postoje medjusobni kapaciteti izmedju dva i dva vodiča, te dozemni kapaciteti izmedju pojedinih vodiča i zemlje. To je isto kao što u stvari postoje električni tokovi izmedju vodiča i vodiča te izmedju vodiča i zemlje. Medjusobne i dozemne kapacitete nazivamo parcijalnim kapacitetima. Za razliku od toga ćemo prije razmatrani kapacitet izmedju vodiča i neutralne tačke nazvati totalnim kapacitetom.



Sl. 6.13

b) Da nadjemo vezu izmedju totalnog i parcijalnih kapaciteta, pretvorit ćemo trokut s medjusobnim kapacitetima u zvijezdu. Lako je uvidjeti, prema poznatim formulama za transfiguraciju trokut-zvijezda ili obrnuto, da u svakom kraku zvijezde sada imamo tri puta veći kapacitet. Grane s dozemnim kapacitetima ostale su dakako nepromijenjene.

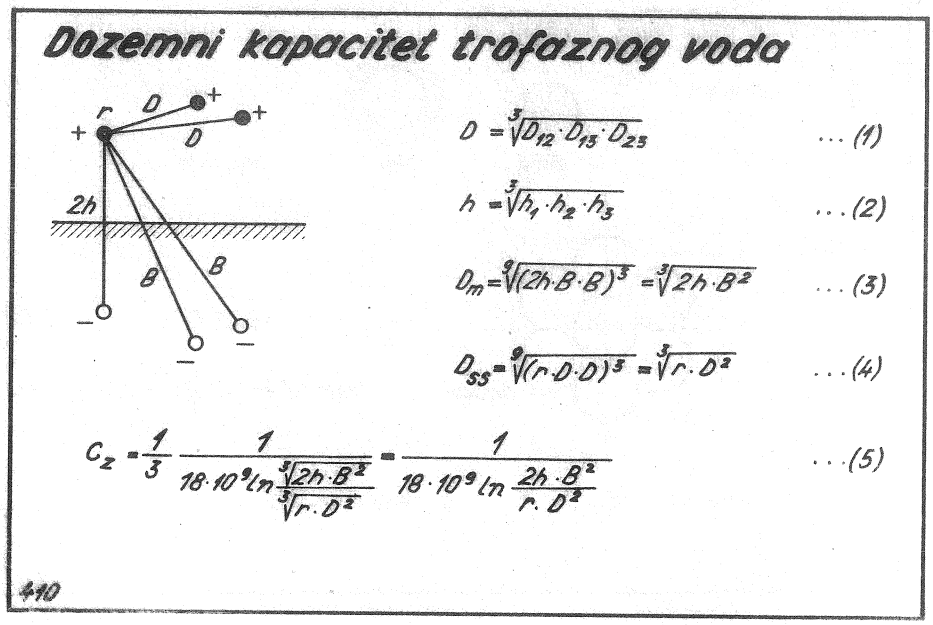
c) Zvjezdište tako dobivene zvijezde kod simetričnih naponskih prilika ima potencijal zemlje. Možemo dakle zbrojiti kapacitete dviju paralelnih grana, koje izlaze iz istog vodiča. Očito je, da ćemo tako dobiti izraz za totalni kapacitet, koji je prema tome jednak trostrukom medjusobnom plus dozemni.

DOZEMNI KAPACITET TROFAZNOG VODA

Na slici 6.14 prikazan je proračun dozemnog kapaciteta prepletenog trofaznog voda, pri čemu je korištena metoda SGU. U stvari metoda SGU će nam dati totalni kapacitet, pa da dobijemo samo dozemni, moramo medjusobni kapacitet poništiti. To možemo postići na taj način, da sva tri vodiča medjusobno kratko spojimo, pa su time medjusobni kapaciteti premošteni. No u tom slučaju sva tri vodiča imaju isti potencijal, pa i istoimeni naboj, recimo pozitivni.

Njihove zrcalne slike prema tome sve tri imaju negativni naboj.

Udaljenost izmedju bilo koja dva stvarna vodiča možemo uzeti prema izrazu (1), jer je vod prepleten. Isto tako je i visina bilo kojeg vodiča nad zemljom dana izrazom (2). Medjusobna SGU izmedju pozitivnih i negativnih vodiča dobije se iz svih pojedinih udaljenosti izmedju pozitivnih i negativnih vodiča, izraz (3). Vlastita SGU triju pozitivnih vodiča dobije se iz pojedinih



Sl. 6.14

udaljenosti izmedju pozitivnih vodiča i iz radijusa pozitivnih vodiča, izraz (4). Dozemni kapacitet jednog vodiča jednak je trećini kapaciteta za čitav skup od tri vodiča, pa tako konačno dobijemo izraz (5).

Kao što vidimo iz izraza (5), vrijednost dozemnog kapaciteta će znatno ovisiti o visini vodiča nad zemljom, i što je visina veća, to će dozemni kapacitet biti manji. Za totalni kapacitet prije smo naprotiv vidjeli, da vrlo malo ovisi o utjecaju zemlje, i da će uglavnom ostati nepromijenjen bez obzira na visinu vodiča nad zemljom. To znači da će i medjusobni kapacitet znatno ovisiti o visini, te da će biti to veći, što je visina veća.

UTJECAJ OBLIKA VODIČA

Dosada smo pretpostavljali da vodič ima oblik masivne okrugle žice. Redovito to medjutim neće biti slučaj, pa treba razmotriti i druge oblike vodiča, kao što je učinjeno na slici 6.15.

a) Ako vodič ima okrugli oblik, kao njegovu vlastitu SGU "d_{ss}" uzet ćemo njegov radijus, jer se naboj nalazi na površini vodiča. Pri tome nema utjecaja, je li vodič masivan ili šupalj.

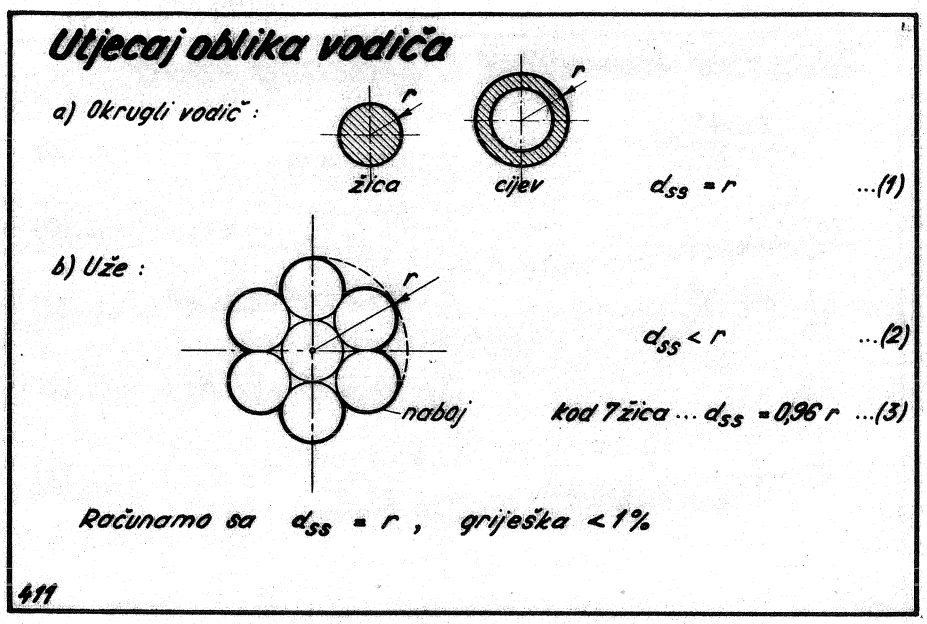
b) Ako je vodič izveden u obliku užeta, što je najčešći slučaj, naboj će se i opet nalaziti na površini vodiča. Samo što sada ta površina ima nepravilni oblik. Očito je da ovdje kao vlastitu SGU vodiča treba uzeti vrijednost manju od radijusa, opisane kružnice izraz (2). Najveća će razlika biti kod užeta od 7 žica, i to oko 4%, izraz (3), a kod užeta s većim brojem žica razlika će biti manja. Obično se ova razlika zanemaruje i računa s vanjskim radijusom, jer greška nije veća od 1%.

UTJECAJ DOZEMNIH UŽETA I UZEMLJENIH DIJELOVA

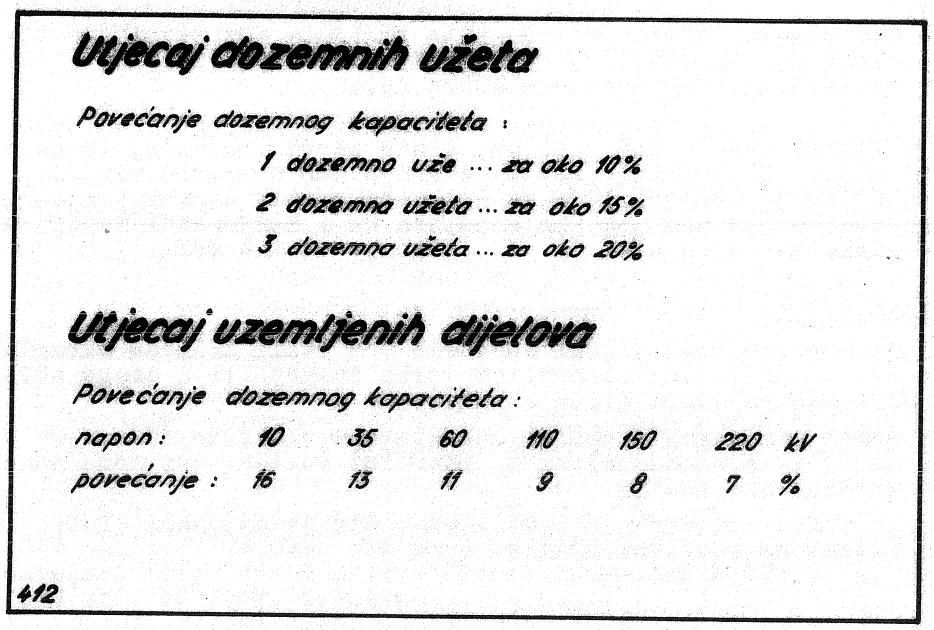
Na kapacitet utječu i dozemna užeta, i to slično kao i zemlja, jer su dozemna užeta uzemljena, pa "približuju" vodičima potencijal zemlje. Utjecaj na totalni kapacitet je medjutim malen pa se često zanemaruje. Utjecaj na dozemni kapacitet, naprotiv, može biti znatan, te prvenstveno ovisi o broju do-

zemnih užeta. Na slici 6.16 su dani informativni podaci, koliko se otprilike poveća dozemni kapacitet uslijed utjecaja jednog, dva i tri dozemna užeta.

I drugi uzemljeni dijelovi u blizini vodiča (stupovi, uzemljene konstrukcije i sl.) povećavaju dozemni kapacitet. Informativni podaci o tome, u ovisnosti o naponu voda, dani su takodjer na istoj slici.



Sl. 6.15



Sl. 6.16

KAPACITET KABELA

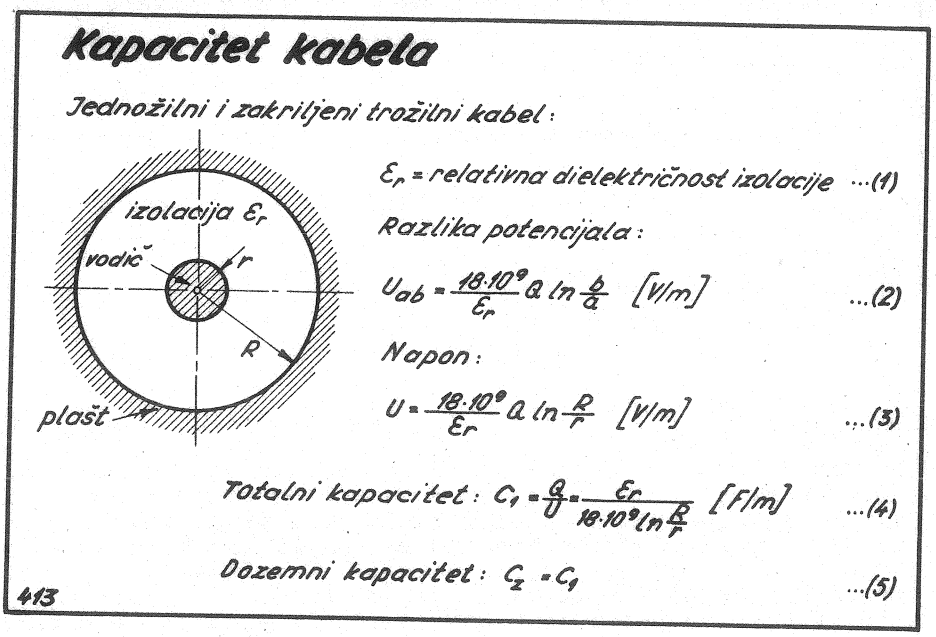
Kod jednožilnog kabela lako je izračunati kapacitet, jer se oko vodiča nalazi koncentrični metalni plašt, kao što se vidi na slici 6.17. Isti slučaj je kod zakriljenog trožilnog kabela, gdje se oko svakog vodiča nalazi koncentrično metalno zakrilje, pa u pogledu električnog polja vladaju iste prilike

kao i kod jednožilnih kabela. Kako za prijenos električne energije, tj. za više napone, dolaze u obzir samo ovakve izvedbe kabela, to u okviru prijenosa električne energije proračun kabela ne predstavlja poteškoće.

Kod proračuna kapaciteta kabela treba uvažiti dielektričnost izolacije, koja je veća od dielektričnosti vakuuma, pa se to uzima u račun putem relativne dielektričnosti izolacije, izraz (1), koja grubo uzevši iznosi oko 4. Prema tome izraz za razliku potencijala u vakuumu, koji smo izveli u početku naših razmatranja, moramo podijeliti s relativnom dielektričnošću izolacije, pa ćemo dobiti izraz za razliku potencijala u izolaciji kabela, izraz (2).

Napon, koji vlada u kabelu izmedju vodiča i plašta, a to je u stvari napon izmedju vodiča i neutralne tačke, dobijemo, ako tražimo razliku potencijala u granicama od vanjskog radijusa vodiča "r" do nutarnjeg radijusa plašta "R", izraz (3). Kapacitet kabela izmedju vodiča i neutralne tačke, tj. njegov totalni kapacitet dobijemo, ako naboj dijelimo s naponom, izraz (4). Dozemni kapacitet jednak je totalnom, izraz (5), jer su plaštevi odnosno zakrilja kabela uzemljeni.

Kod trožilnih kabela bez zakrilja teže je računati kapacitet, pa se u tu svrhu obično koriste dijagrami iz literature ili podaci tvornice.



S1.6.17

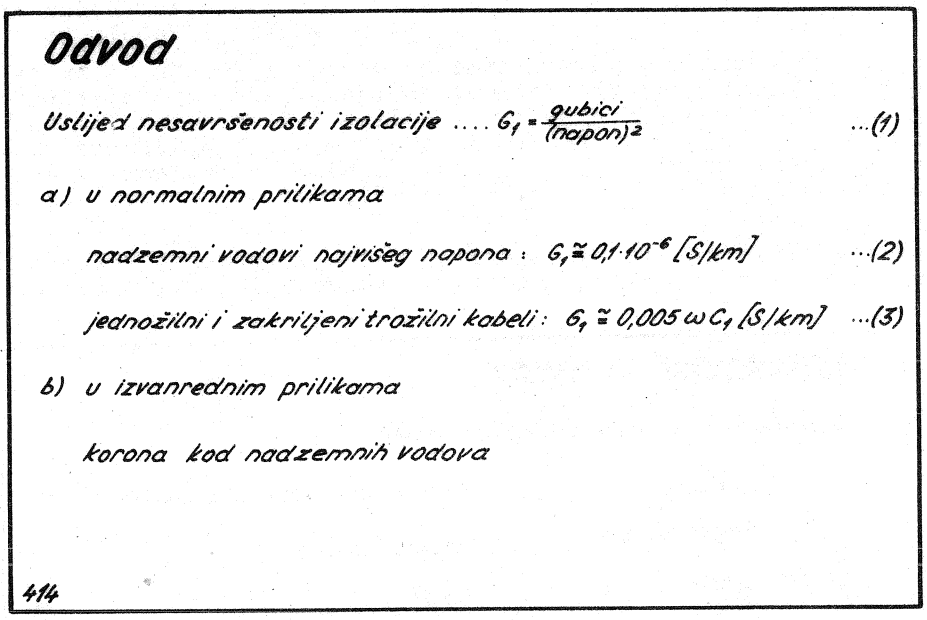
7. ODVOD VODA I KORONA

ODVOD

Odvod voda nastaje uslijed nesavršenosti izolacije, koju kod nadzemnih vodova predstavljaju izolatori i uzduh oko vodiča, a kod kabela je to redovito papirnata izolacija, namotana oko vodiča i zatim impregnirana. Kod nadzemnih vodova teku provodne struje izmedju vodiča medjusobno te izmedju vodiča i zemlje, pa uslijed toga nastaju gubici energije. Provodne struje teku prvenstveno po površini izolatora, pogotovu ako su ovi onečišćeni i ovlaženi. Kod kabela dolazi takodjer do provodnih struja, ali što je još značajnije, tu imamo i dielektričke gubitke. Odvod možemo definirati kao odnos gubitaka prema kvadratu napona, izraz (1) na slici 7.1.

Iz gore rečenoga je jasno da se odvod nadzemnih vodova mijenja u velikim granicama. Prema iskustvenim podacima možemo uzeti da su kod vodova od 1oo do 2oo kV gubici odvoda po kilometru 1 do 4 kW, pa prema izrazu (1) slijedi da je odvod približno $o,1.1o^{-6}$ S/km, izraz (2). Kod kabela za prijenos električne energije možemo odvod ocijeniti prema izrazu (3).

Navedene vrijednosti za odvod nadzemnih vodova vrijede kod normalnih prilika u uzduhu. U izvanrednim prilikama, kad jakost električnog polja prekorači električnu čvrstoću uzduha, dolazi oko vodiča do električnih izbijanja. Uslijed toga nastaju gubici energije, pa se odvod znatno povećava. Tu pojavu zovemo korona, a zbog njene važnosti za vodove najvišeg napona moramo se s njom potanje pozabaviti.



Sl. 7.1

OPĆENITO O KORONI

Glavni dio izolacije kod nadzemnih vodova čini uzduh oko vodiča. Uzduh je uvijek nešto ioniziran. Pod utjecajem električnog polja nastaje ubrzano kretanje iona, no oni se sudaraju s neioniziranim česticama, i to im ograničava brzinu. Kod dovoljno velike brzine stvarat će se pri sudarima novi ioni, koji će opet dalje stvarati nove ione, te će u najkraće vrijeme uzduh postati vodljiv. Pri temperaturi od 25°C i tlaku od 760 mm Hg to se dogodi kod jakosti polja od oko 30 kV/cm, što prema tome predstavlja električnu čvrstoću uzduha.

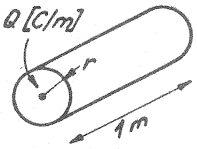
Kod malih udaljenosti izmedju vodiča s različitim potencijalom doći će zbog toga do proboja, ako napon izmedju vodiča podignemo na dovoljno veliku vrijednost. No kod nadzemnih vodova imamo razmjerno velike udaljenosti izmedju vodiča, pa ne dodje do proboja nego samo do tinjavog izbijanja oko vodiča, što nazivamo koronom. Jakost električnog polja je naime najjača tik uz površinu vodiča, pa uslijed spontane ionizacije tu nastane vodljivi sloj uzduha, unutar kojeg se zbivaju spomenuta električna izbijanja. Ali na većoj udaljenosti od vodiča, polje je znatno slabije, pa uzduh zadrži svoja izolaciona svojstva.

Korona dolazi do izražaja kao vijenac modrikastog svjetla oko vodiča, pa joj odatle potječe i ime (corona, lat. = vijenac). Osim toga se čuje siktanje i osjeća miris ozona. Uslijed korone dolazi do gubitaka energije, jer se zbog tinjavog izbijanja stvara toplina. Budući da kod izmjeničnog napona korona traje samo dok je momentalna vrijednost napona u blizini tjemene vrijednosti, to se tinjava izbijanja neprestano pale i gase, pa nastaju elektromagnetski valovi, koji dovode do smetnja u radio-uredjajima, a pogotovu u televiziji. Konačno i ozon, koji se stvara prilikom ionizacije, djeluje agresivno na materijal vodiča. Sve su to štetne posljedice, zbog kojih je korona nepoželjna u pogonu nadzemnih vodova.

JAKOST POLJA NA POVRŠINI VODIČA

Budući da korona nastaje, kad jakost polja na površini vodiča prekorači električnu čvrstoću uzduha, to je potrebno da se s tom jakošću polja pobliže

Jakost polja na površini vodiča



Pretpostavke: 1) glatki okrugli vodič

2) jednolična razdioba naboja

Gustoća elektr. toka: $D = \frac{Q}{2\pi r}$ [C/m] ...(3)

Jakost polja: $E = \frac{D}{\varepsilon_0} = \frac{Q}{2\pi r} 36\pi 10^9 = 18 \cdot 10^9 \frac{Q}{r}$ [V/m] ...(4)

Naboj: $Q = UC_1$ [C/m], U = napon [V], C_1 = kapacitet [F/m] ...(5)

Jakost polja: $E = 18 \cdot 10^9 \frac{U}{r} C_1$ [V/m] ...(6)

Primjer: trofazni simetrični vod ... $C_1 = \frac{1}{18 \cdot 10^9 \ln \frac{D}{r}}$ [F/m] ...(7)

$E = 18 \cdot 10^9 \frac{U}{r} \frac{1}{18 \cdot 10^9 \ln \frac{D}{r}} = \frac{U}{r \ln \frac{D}{r}}$ [V/m] ...(8)

415

Sl. 7.2

pozabavimo. Promatrajmo dužinu vodiča od 1 metar, kao na slici 7.2, uz pretpostavku da se radi o glatkom okruglom vodiču radijusa "r", i da je naboj "Q" jednolično raspodijeljen na površini vodiča, pa da ga prema tome možemo zamisliti koncentriranog u središtu vodiča.

Gustoća električnog toka, kao što već prije pokazano, dana je izrazom (3), gdje u nazivnik dolazi radijus vodiča, jer se radi o gustoći električnog polja na površini vodiča. Jakost električnog polja na površini vodiča dana je prema tome izrazom (4), koji dobijemo ako tu uvrstimo poznati izraz za dielektričnost vakuuma.

Jakost električnog polja možemo prikazati i na drugi način, tako da u izraz (4) uvrstimo izraz (5), kojim je dan naboj vodiča. Tako dobijemo jakost električnog polja na površini vodiča u direktnoj ovisnosti o naponu vodiča. U taj izraz ulaze još radijus i kapacitet, što su svojstva samoga vodiča.

Primjena izraza (6) ilustrirana je na primjeru trofaznog simetričnog voda s medjusobnim razmakom vodiča "D", pri čemu je kapacitet vodiča dan izrazom (7). Ako izraz (7) uvrstimo u izraz (6) i to sredimo, dobijemo za taj slučaj jakost električnog polja na površini vodiča, izraz (8).

Kod nesimetričnog voda naboji pojedinih vodiča neće biti jednaki, makar vod bio prepleten, pa će i jakost polja na površini vodiča biti različita za razne vodiče. Naboje možemo izračunati, kao što je pokazano kod proračuna kapaciteta, a zatim koristeći izraz (4) možemo odrediti jakost polja za pojedine vodiče.

KRITIČNI NAPON

Bolji uvid u električne prilike u vezi s koronom kod voda u pogonu dobijemo, ako uvedemo pojam kritičnog napona. Kritični napon je onaj pogonski napon, kod kojega jakost električnog polja na površini vodiča taman dosegne vrijednost električne čvrstoće uzduha. Ako je dakle pogonski napon manji od kritičnoga, to nećemo imati korone. Ako je pak pogonski napon veći od kritičnoga, to ćemo imati koronu, i to utoliko jaču što je razlika izmedju pogonskog i kritičnog napona veća.

Na slici 7.3 izveden je izraz za kritični napon uz prije uvedene pretpostavke. Uslov za kritični napon jest da je jakost električnog polja na površini vodiča jednaka električnoj čvrstoći uzduha, koja u normalnim prilikama iznosi 3o kV/cm, izraz (1). Budući da radimo sa sinusoidalnim izmjeničnim naponima, to ćemo uvesti odgovarajuću efektivnu vrijednost za električnu čvrstoću, izraz (2).

Kritični napon

Uslov: $E = 30\ kV/cm$ (električna čvrstoća uzduha) ... (1)

za izmjenični napon: $E_{ef} = \frac{30}{\sqrt{2}} = 21{,}1\ kV/cm$ ... (2)

Dakle:

$$21{,}1 = 18 \cdot 10^9 \frac{U_{kr}}{\sqrt{3} \cdot r} C_1 \quad \text{... (3)}$$

Kritični napon (linijski):

$$U_{kr} = \frac{\sqrt{3} \cdot 21{,}1 \cdot r}{18 \cdot 10^9 C_1}\ [kV] \quad \text{... (4)}$$

Primjer: trofazni simetrični vod ... $C_1 = \frac{1}{18 \cdot 10^9 \ln \frac{D}{r}}$ ... (5)

$$U_{kr} = \frac{\sqrt{3} \cdot 21{,}1 \cdot r}{18 \cdot 10^9} 18 \cdot 10^9 \ln \frac{D}{r} = \sqrt{3} \cdot 21{,}1 \cdot r \cdot \ln \frac{D}{r} \quad \text{... (6)}$$

416

Sl. 7.3

Stvarni kritični napon

$$U_{kr} = \frac{\sqrt{3} \cdot 21{,}1 \cdot r}{18 \cdot 10^9 C_1} \delta \cdot m\ [kV] \quad \text{... (1)}$$

r = vanjski radius vodiča [cm] ... (2)

C_1 = kapacitet vodiča [F/m] ... (3)

δ = relativna gustoća uzduha ... (4)

m = faktor hrapavosti vodiča ... (5)

Okrugli polirani vodiči ...	$m = 1{,}0$	užeta od 7 žica ...	$m = 0{,}83\text{-}0{,}87$
Okrugli ohrapavljeni vodiči ...	$m = 0{,}93\text{-}0{,}98$	užeta od više žica ...	$m = 0{,}80\text{-}0{,}83$
Šuplji vodiči ...	$m = 0{,}90$	donja granica ...	$m = 0{,}7$

417

Sl. 7.4

Izraz (2) ćemo uvrstiti u prije izvedeni izraz za jakost električnog polja na površini vodiča, pa će nam napon u tom izrazu značiti kritični napon. Budući da kritični napon želimo izraziti s vrijednošću linijskog napona, to u stvari uslov za izračunavanje kritičnog napona moramo pisati kao izraz (3). Odatle slijedi izraz (4), kojim je dan linijski kritični napon u kilovoltima, a u koji ulaze radijus vodiča u centimetrima i kapacitet vodiča u faradima po metru.

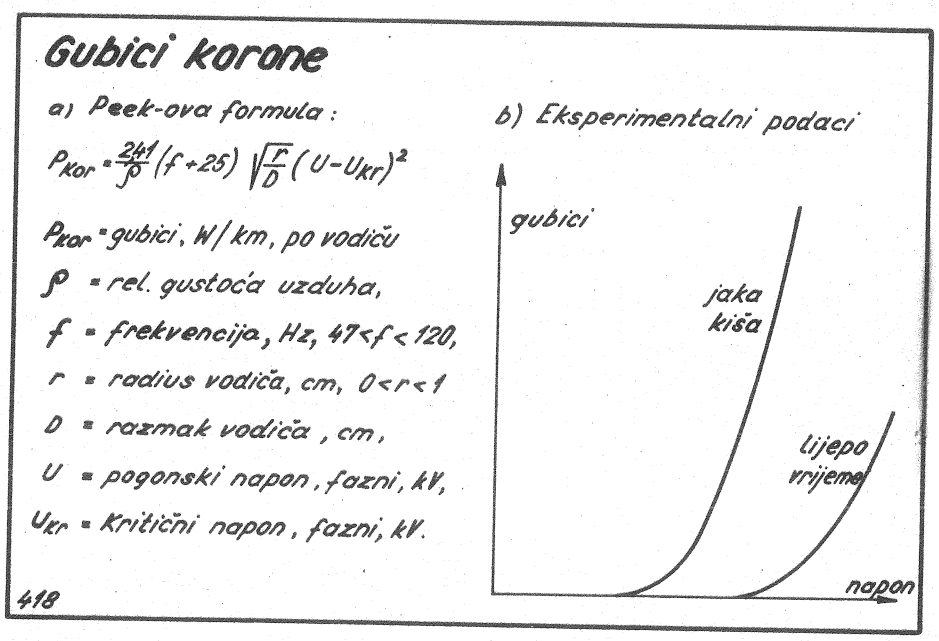
Kao i prije izraz (4) ilustriran je na primjeru trofaznog simetričnog voda s kapacitetom prema izrazu (5), tako da je konačno kritični napon za taj vod dan izrazom (6).

STVARNI KRITIČNI NAPON

Gore izvedeni izraz za kritični napon vrijedi uz pretpostavku potpuno glatkog okruglog vodiča te za uzduh s temperaturom 25°C i tlakom 760 mm Hg, pri čemu računamo da je relativna gustoća uzduha jednaka jedinici. U stvari te pretpostavke neće biti redovito ispunjene, pa stvarni kritični napon moramo prikazati izrazom (1) na slici 7.4.

U tom izrazu dodana je još relativna gustoća uzduha, jer je električna čvrstoća uzduha u praktičkim granicama proporcionalna njegovoj gustoći. Kao što je poznato, gustoća uzduha proporcionalna je pritisku i obrnuto proporcionalna apsolutnoj temperaturi.

Osim toga dodan je i faktor hrapavosti vodiča, koji je uvijek manji od jedinice, a jednak je jedinici, jedino za polirane okrugle vodiče. Stvarni će vodiči, naime, imati više-manje hrapavu ili neravnu površinu (bilo zbog izvedbe bilo zbog utjecaja vremena), pa će to mjestimično povećati jakost polja na površini vodiča, odnosno smanjiti kritični napon. Na istoj slici dane su neke praktičke vrijednosti za faktor hrapavosti vodiča.



Sl. 7.5

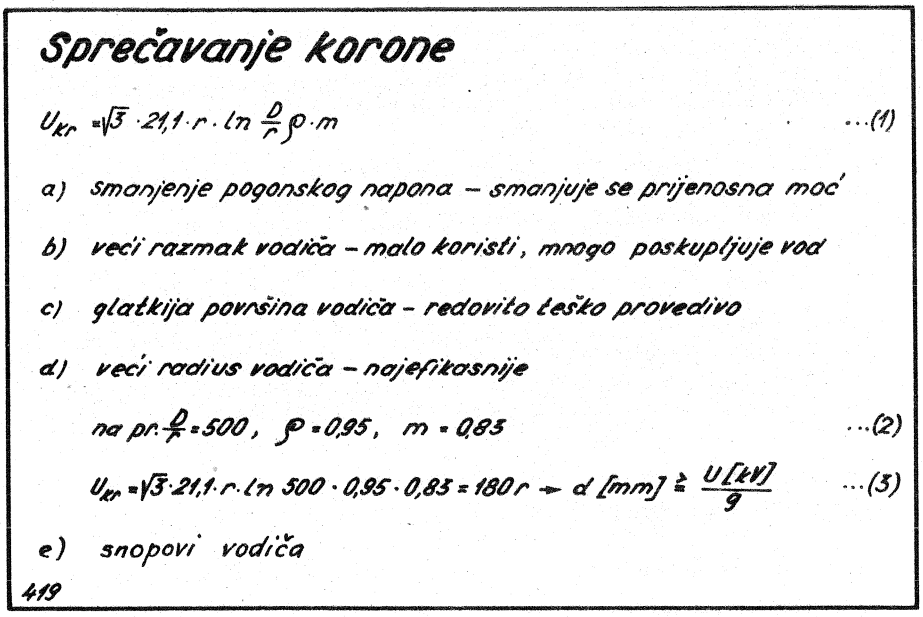
Ova formula vrijedi samo za lijepog vremena. Dok vjetar i vlažnost uzduha uglavnom nemaju utjecaja na koronu, dotle je loše vrijeme (magla, kiša, snijeg, inje, rosa, solika) i dim znatno povećavaju. Može se računati da kod veoma ružnog vremena, kritični napon padne na 80% vrijednosti od kritičnog napona za lijepo vrijeme.

GUBICI KORONE

S pojavom korone pojavljuju se i gubici energije, koji su to veći, što je pogonski napon viši od kritičnoga. Gubici se obično odredjuju eksperimentalnim putem, ali su mnogi autori pokušali na temelju ispitivanja dati formule za izračunavanje gubitaka uslijed korone. Vidi sliku 7.5.

a) Prvu, i još uvijek dobro poznatu formulu za gubitke korone, postavio je Peek još 1911 godine, na temelju svojih eksperimentalnih radova. Ova formula dobro zadovoljava za frekvencije od 50 do 60 Hz, koje dolaze u praksi. Vrijednost formule ograničena je na razmjerno tanke vodiče do promjera od 20 mm, dok se danas kod vodova najvišeg napona upotrebljavaju znatno veći promjeri. Iza Peeka još je mnogo autora predložilo formule za proračun korone, koje se mogu naći u literaturi.

b) Sredjeni podaci eksperimentalnih ispitivanja u vezi gubitaka korone mogu se dati u dijagramu. Takve dijagrame, kao rezultate mnogobrojnih izvršenih ispitivanja u svijetu, možemo naći u literaturi. Primjer tako prikazanih rezultata ispitivanja dan je na slici.



Sl. 7.6

Gubitke korone računamo obično za čitav vod kroz godinu dana. Pri tome moramo gubitke računati posebno za pojedine vodiče, posebno za pojedine odsjeke voda i posebno za pojedine dijelove godine. Kod nesimetričnog voda neće, naime, korona na svim vodičima biti ista. Isto tako, makar vod pp čitavoj dužini bio izveden na isti način, prilike duž voda neće u svim odsjecima biti iste, npr. na većim visinama će korona biti jača. Konačno tokom godine mijenjaju se atmosferske prilike, koje takodjer znatno utječu na koronu. O tome svemu treba dakako voditi računa.

SPREČAVANJE KORONE

Zbog njenih štetnih posljedica koronu redovito želimo spriječiti, barem kod lijepog vremena i normalnih prilika na vodu. Na koji način možemo to provesti, slijedi iz izraza za kritični napon, koji je za slučaj trofaznog simetričnog voda prikazan na slici 7.6, izraz (1).

a) U prvom redu možemo smanjiti pogonski napon. To medjutim ima lošu stranu, što se time povećavaju gubici prijenosa a i smanjuje prijenosna moć voda. Ovaj način dolazi dakle samo iznimno u obzir, i to jedino kod slabo opterećenog voda.

b) Nadalje možemo sagraditi vod s većim razmakom vodiča. No ovo malo popravlja prilike u pogledu korone, jer se u formuli razmak vodiča nalazi pod znakom logaritma. S druge strane povećanje razmaka znatno poskupljuje vod, pa se ovaj način u praksi ne koristi za sprečavanje korone.

c) Kod izvedbe vodiča možemo težiti za što glatkijom površinom, jer ćemo time povećati faktor hrapavosti, što je u pogledu sprečavanja korone povoljno. Kod vodiča u pogonu praktički ne možemo više utjecati na njihovu glatkoću, a ako upotrebljavamo vodiče u obliku užeta s većim brojem žica (što je redovito slučaj kod vodova za prijenos energije) niti promjenom njihove izvedbe ne možemo praktički skoro ništa utjecati na faktor hrapavosti. Jedino kod specijalnih izvedaba šupljih vodiča možemo dati takav oblik profilima, od kojih je vodič sastavljen, da se dobije što glatkija površina. Ali takve izvedbe vodiča su veoma komplicirane, a općenito upotreba šupljih vodiča gubi na značenju.

d) Najefikasnije sredstvo za sprečavanje korone je povećanje vanjskog promjera vodiča, jer se s time direktno povećava kritični napon, kao što se vidi iz izraza (1), a smanjenje kritičnog napona zbog toga što radijus dolazi u nazivnik pod znakom logaritma je relativno maleno. Ovo se sredstvo najčešće upotrebljava, pa je čak bilo dovelo do primjene šupljih vodiča, da se dobije do-

voljno veliki promjer obzirom na koronu, a ne preveliki presjek obzirom na ekonomičnost. Ako u izraz (1) uvrstimo neke prosječne vrijednosti prema izrazima (2), dobijemo konačno izraz (3), koji nam daje grubu orjentaciju, koliki mora biti promjer vodiča da izbjegnemo koronu. Vidimo da promjer vodiča u milimetrima mora biti veći nego deveti dio (neki autori predlažu radi veće sigurnosti: osmi dio) linijskog napona u kilovoltima.

e) Konačno kao sredstvo za sprečavanje korone, koje ne slijedi iz izraza (1), jer taj izraz nije izveden za takav slučaj, dolazi u obzir upotreba snopova vodiča, što se u današnje vrijeme sve više primjenjuje. Kod ovog načina za svaku fazu imamo više vodiča a ne samo jedan, i to obično dva, tri ili četiri vodiča, na medjusobnom razmaku od nekih 3o do 5o centimetara. Korist ovakve izvedbe je u tome, što je naboj jedne faze podijeljen na vodiče u snopu, koji su medjusobno razmaknuti, pa sve zajedno djeluje kao vodič većeg promjera. Vodiči u snopu imaju i tu prednost, što se na taj način smanjuje induktivitet voda i time povećava njegova prijenosna moć, pa se snopovi danas već upotrebljavaju i tamo, gdje to nije uslovljeno koronom.

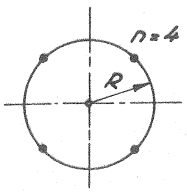
JAKOST POLJA KOD SNOPOVA VODIČA

Kako se može izračunati jakost električnog polja kod snopova vodiča, prikazano je na slici 7.7. Vodiči u snopu su redovito pravilno rasporedjeni po kružnici, čiji radijus označimo sa "R". Broj vodiča pri tome može biti različit, a označit ćemo ga sa "n", izraz (1).

Vlastita SGU (srednja geometrijska udaljenost) samoga snopa dana je izrazom (2), koji slijedi iz onoga što je rečeno pri izvodjenju metode SGU u poglavlju o induktivitetu. Kapacitet jednog snopa dan je izrazom (3), pri čemu smo radi jednostavnosti uzeli da su sva tri medjusobna razmaka faza jednaka "D". Naboj jednog vodiča u snopu dan je izrazom (4) uz pretpostavku, da se naboj čitavog snopa jednolično raspodijeli na pojedine vodiče u snopu, a to možemo pretpostaviti, jer je medjusobna udaljenost vodiča u snopu mnogo manja od medjusobne udaljenosti snopova. Konačno, ako pretpostavimo da je naboj pojedinog vodiča jednolično raspodijeljen po njegovoj površini, dobit ćemo kao srednju vrijednost za jakost polja na površini vodiča izraz (5). Ova jakost polja važna je za proračun gubitaka.

Medjutim pretpostavka o jednoličnoj raspodjeli naboja na površini vodiča nije opravdana, jer se vodiči u snopu nalaze razmjerno blizu. Prema tome ni jakost polja neće biti jednolična po površini vodiča, nego će jakost polja biti najmanja na onoj tački vodiča, koja se nalazi najbliže ostalim vodičima u snopu, a najveća na suprotnoj strani. Te ekstremne vrijednosti za jakost polja na površini vodiča u snopu mogu se izračunati prema izrazu (6). Maksimalna vrijednost jakosti polja važna je za kritični napon i za odredjivanje radiosmetnja.

Jakost polja kod snopova vodiča



Broj vodiča u snopu = n ... (1)

SGU snopa = $D_{ss} = \sqrt[n]{r \cdot n \cdot R^{n-1}}$ ... (2)

Kapacitet snopa = $C_1 = \frac{1}{18 \cdot 10^9 \ln \frac{D}{D_{ss}}}$ ... (3)

Naboj jednog vodiča = $Q = \frac{UC_1}{n} = \frac{U}{n \cdot 18 \cdot 10^9 \ln \frac{D}{D_{ss}}}$ ... (4)

Srednja jakost polja = $E_{sr} = 18 \cdot 10^9 \frac{Q}{r} = \frac{U}{n \cdot r \cdot \ln \frac{D}{D_{ss}}}$ ... (5)

Ekstremne vrijednosti za jakost polja na površini :

$$E_{\substack{max \\ min}} = E_{sr} \left[1 \pm (n-1) \frac{r}{R} \right] \quad \text{... (6)}$$

420

Sl. 7.7

Što je razmak vodiča u snopu veći, to će biti veća i vlastita SGU snopa, prema izrazu (2). Zbog toga će kapacitet snopa biti veći, pa će biti veći i naboj na vodičima i konačno će biti veća i srednja jakost polja na površini vodiča, što uostalom direktno slijedi iz izraza (5). Medjutim što je razmak vodiča u snopu veći, to će izraz u uglatoj zagradi u izrazu (6) biti manji, a to je jasno, jer će kod većeg razmaka jednoličnost raspodjele naboja na površini biti veća. U izrazu (6) za maksimalnu vrijednost jakosti polja će se dakle s povećanjem razmaka vodiča prvi faktor povećavati a drugi smanjivati.

O maksimalnoj vrijednosti jakosti polja na površini vodiča ovisi kritični napon, pa će se i on mijenjati ako mijenjamo razmak vodiča u snopu. Zbog načina na koji se spomenuti faktori izraza (6) povećavaju odnosno smanjuju, dobit ćemo maksimalnu vrijednost kritičnog napona za odredjenu medjusobnu udaljenost vodiča. To bi bila najpovoljnija udaljenost obzirom na koronu. No induktivitet će se nasuprot tome stalno smanjivati, ako povećavamo razmak vodiča, a nama je povoljno imati što manji induktivitet. Zbog toga se obično za razmak vodiča odabire nešto veća vrijednost od one, koja odgovara maksimalnoj vrijednosti kritičnog napona.

8. KONSTANTE ZA NESIMETRIČNE PRILIKE

Dosada izvedeni izrazi za konstante voda odnose se na simetrične prilike u trofaznom vodu, kada naponi faznih vodiča čine simetrični sistem, a isto tako i struje. Za simetrični stacionarni pogon možemo dakle na temelju dosada rečenoga odrediti impedanciju uzdužne grane voda i admitanciju poprečne grane, kao što nas to uči simbolička metoda za računanje sa sinusoidalnim naponima i strujama.

Ako su električne prilike u vodu nesimetrične, tada se kod električnih proračuna obično služimo metodom simetričnih komponenata. Pri tome umjesto s jednom impedancijom voda (kao kod simetričnih prilika) moramo računati s tri impedancije, i to: direktnom, inverznom i nultom. Analogno vrijedi i za admitancije.

METODA SIMETRIČNIH KOMPONENATA

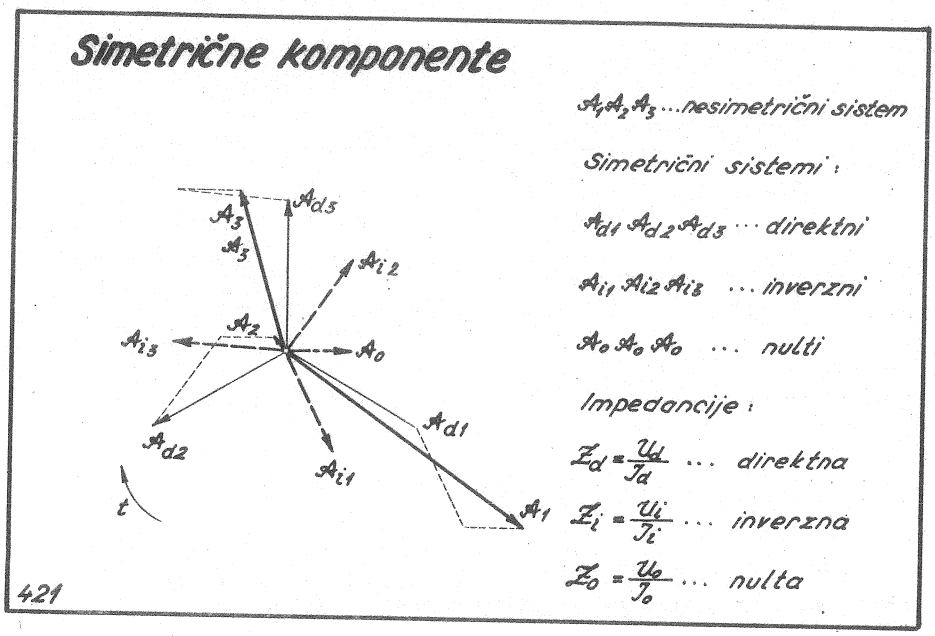
Ako vektori napona odnosno struja u sve tri faze trofaznog sistema nisu medjusobno jednaki i jednako razmaknuti, kažemo da u trofaznom sistemu imamo nesimetrične prilike. Jedna metoda za razmatranje takvih nesimetričnih prilika jest metoda simetričnih komponenata, koja je ukratko prikazana na slici 8.1. Kao što je poznato, svaki nesimetrični sistem od tri vektora (koji su različiti po iznosu i po medjusobnom faznom pomaku) može se rastaviti u tri simetrična sistema: direktni, inverzni i nulti. Direktni sistem ima tri vektora istog iznosa na medjusobnom faznom pomaku od 120^{o}, pri čemu vektori pojedinih faza slijede jedan iza drugoga u smislu okretanja kazaljke na satu. Inverzni sistem ima opet tri vektora istog iznosa na istom medjusobnom razmaku od 120^{o}, ali vektori pojedinih faza slijede jedan iza drugoga u obrnutom smislu okretanja. Nulti sistem ima tri fazna vektora istog iznosa ali bez medjusobnog faznog pomaka. Prvotni nesimetrični sistem dobiva se superpozicijom ovih triju sistema.

Kod nesimetričnih električnih prilika u trofaznom vodu, možemo postaviti simetrične sisteme kako za napon tako i za struju. Uz pretpostavku da su konstante voda neovisne o struji odnosno o naponu, možemo istodobno primijeniti zakon superporizicije za tri naponska i za tri strujna simetrična sistema. Prema tome za medjusobni odnos direktnog sistema napona i direktnog sistema struje vrijedi Ohmov zakon, a isto to vrijedi i za inverzni sistem napona i struja, te konačno i za nulti sistem napona i struja. Kako su svi ovi naponi simetrični, to račun za svaki od ova tri sistema vršimo samo za jednu fazu trofaznog sistema.

Ovo nas dovodi do pojma direktne, inverzne i nulte impedancije. Direktna impedancija dana je odnosom direktne komponente napona i direktne komponente struje. Inverzna impedancija dana je odnosom inverzne komponente napona i inverzne komponente struje. I konačno, nulta impedancija dana je odnosom nulte komponente napona i nulte komponente struje. Pri tome redovito smatramo da je vod gradjen simetrično, tako da su ove tri impedancije jednake za sve tri faze. Kod voda, kao i kod svih elemenata mreže, koji nemaju rotirajućih dijelova, inverzna impedancija jednaka je direktnoj impedanciji. Direktna pak im-

pedancija, naravno, odgovara impedanciji kod simetričnih prilika u vodu.

Uzdužne konstante voda (otpor i induktivitet) kod izmjeničnih napona i struja, kombiniraju se u uzdužnu impedanciju voda (odnosno u impedanciju uzdužne grane voda), i to bilo direktnu, inverznu ili nultu. Analogno se poprečne konstante voda (odvod i kapacitet) kombiniraju u poprečnu granu, kod koje radije računamo s admitancijom umjesto s impedancijom. Direktna, inverzna i nulta admitancija poprečne grane odredjuje se iz odnosa odgovarajućih komponenata struje i napona, analogno kao što je prije rečeno za impedancije.



Sl. 8.1

UZDUŽNE IMPEDANCIJE VODA

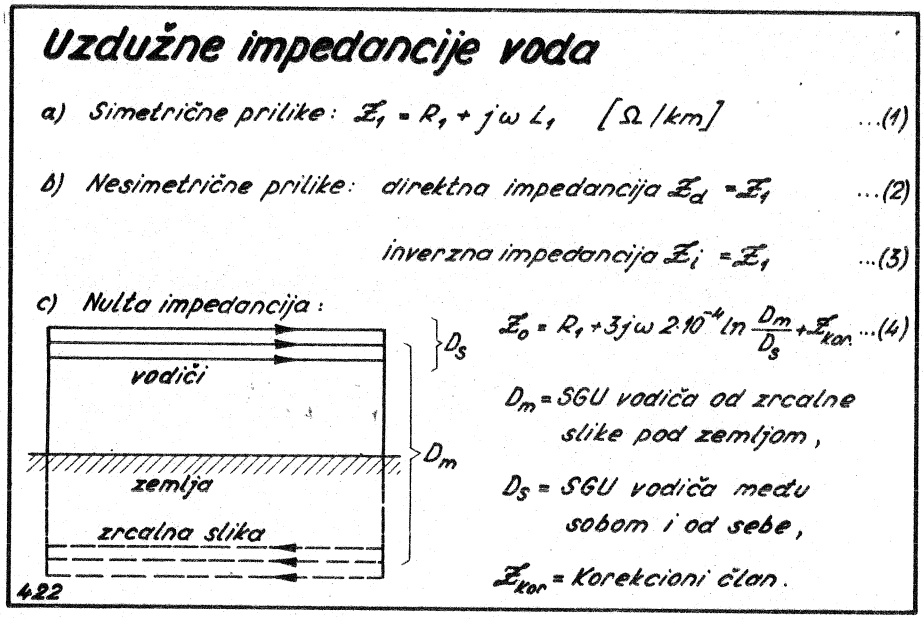
a) Otpor i induktivitet su tzv. uzdužne konstante voda. Kod stacionarnog pogona sa sinusoidalnom izmjeničnom strujom te konstante dolaze do izražaja kao djelatni i induktivni otpor, odnosno ako to obuhvatimo zajedno dobijemo uzdužnu impedanciju voda. Kod simetričnih prilika u trofaznom vodu uzdužna impedancija dana je izrazom (1) na slici 8.2.

b) Kod nesimetričnih prilika računamo s direktnom, inverznom i nultom impedancijom voda. Direktna impedancija jednaka je impedanciji kod simetričnih prilika, izraz (2). Budući da je vod pasivni element mreže, te nema dijelova koji rotiraju, inverzna impedancija jednaka je direktnoj; dakle i inverzna impedancija jednaka je impedanciji kod simetričnih prilika, izraz (3).

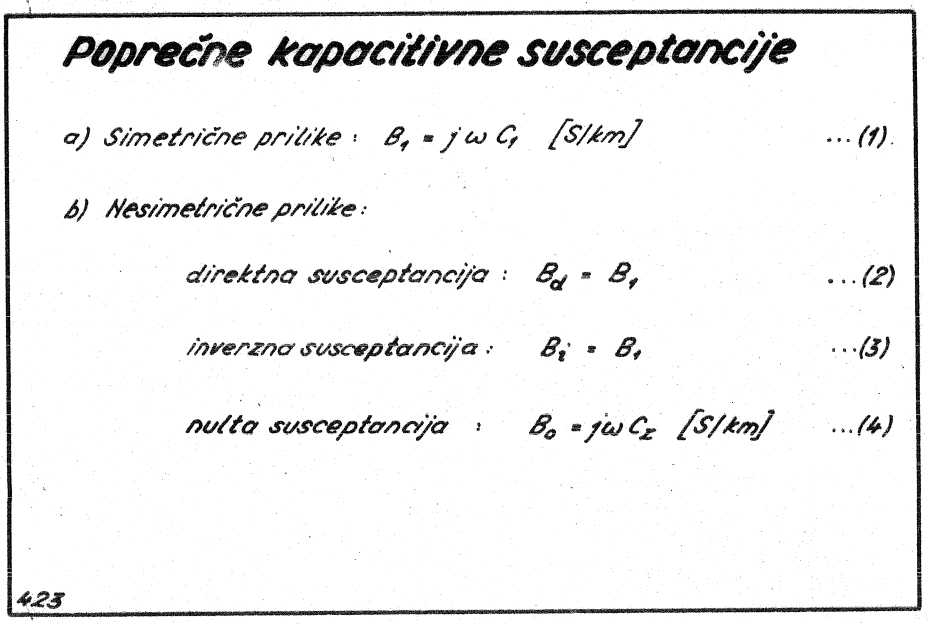
b) Da bi nulta impedancija došla do izražaja, moramo imati nultu komponentu struja, koja ima povratni put kroz zemlju. Kao prvo približenje možemo zamisliti, da se struja vraća kroz zemlju bez otpora duž staza, koje čine zrcalnu sliku vodiča obzirom na površinu zemlje kao ravninu zrcaljenja. Za proračun induktiviteta u tom slučaju vlastitu SGU "D_s" nam predstavlja SGU svih vodiča medjusobno i od samih sebe, a medjusobnu SGU "Dm" nam predstavlja SGU od svih vodiča do zrcalne slike svih vodiča pod zemljom. Kod voda s tri vodiča moramo za svaki vodič uzeti 3 puta veću vrijednost od tako izračunatog induktiviteta. Na taj način izračunatoj nultoj impedanciji moramo dodati još korekcioni član, izraz (4). Korekcioni član obuhvaća korekciju djelatnog i induktivnog otpora zbog konačne vrijednosti specifičnog otpora zemlje, a može se odrediti iz podataka u literaturi.

POPREČNE KAPACITIVNE SUSCEPTANCIJE

a) Kapacitet voda spada u tzv. poprečne konstante. Kod stacionarnog pogona sa sinusoidalnom izmjeničnom strujom kapacitet dolazi do izražaja kao kapacitivna susceptancija. Kod simetričnih prilika u trofaznom vodu poprečna kapacitivna susceptancija dana je izrazom (1) na slici 8.3.



Sl. 8.2



Sl. 8.3

b) Kod nesimetričnih prilika računamo s direktnom, inverznom i nultom susceptancijom voda. Direktna susceptancija jednaka je susceptanciji kod simetričnih prilika, izraz (2). Budući da je vod pasivni elemenat mreže, te nema dijelova koji rotiraju, inverzna susceptancija jednaka je direktnoj. Dakle i inverzna susceptancija jednaka je susceptanciji kod simetričnih prilika, izraz (3).

Što se tiče nulte susceptancije, nju ćemo dobiti ako sva tri vodiča medjusobno kratko spojimo. Time smo premostili medjusobne kapacitete, a do izražaja dolaze samo dozemni kapaciteti. Prema tome ćemo nultu susceptanciju dobiti, ako uzmemo u račun samo dozemni kapacitet, izraz (4).

Glava III

T E O R I J A P R I J E N O S A

9. PRIBLIŽNE EKVIVALENTNE SHEME VODA

ELEKTRIČNI PRORAČUN PRIJENOSA

Pod električnim proračunom prijenosa podrazumijevamo odredjivanje napona i struje na pojedinim tačkama voda. Iz tih podataka možemo odrediti daljnje električne veličine, kao što su npr. snaga, kut izmedju vektora napona i vektora struje, razlika napona izmedju dvije tačke voda i sl. Pri tome ćemo promatrati samo stacionarna stanja voda sa sinusoidalnim naponom i sinusoidalnom strujom.

Električni proračun prijenosa potreban nam je da odredimo pogonske uslove prijenosa, npr. režim napona, gubitke prijenosa i stepen korisnosti, stepen stabilnosti prijenosa, uslove za kompenzaciju faze, potrebni opseg regulacije napona i sl.

Kod električnog proračuna prijenosa vod ulazi u račun sa svojim osnovnim svojstvima, a to su konstante voda: otpor, induktivitet, kapacitet i odvod. Kako se radi o stacionarnim stanjima sa sinusoidalnim veličinama, to ćemo redovito umjesto sa induktivitetom i kapacitetom računati s induktivnim otporom i kapacitivnom susceptancijom. Pri tome treba naglasiti činjenicu, da dugi vodovi imaju konstante raspodijeljene duž čitavog voda, i s druge strane, da poprečna grana voda tj. kapacitet i odvod voda, to više dolaze do izražaja,što je vod duži i što je napon viši. Zbog toga ćemo naša razmatranja provesti ovim redom i za ove slučajeve:

1. kratki vod manjeg napona,
2. kratki vod višeg napona,
3. dugi vod višeg napona.

KRATKI VOD MANJEG NAPONA

Radi potpunosti razmotrit ćemo i ovaj slučaj, makar on kod prijenosa električne energije ne dolazi u obzir. Kao što smo rekli, utjecaj poprečne grane, tj. kapaciteta i induktiviteta voda, je to manji, što je napon voda manji i što je dužina voda manja. Zbog toga u ovom slučaju kod promatranja kratkog voda manjeg napona možemo potpuno zanemariti poprečnu granu. Električni proračun možemo provesti na način, kao što je prikazano na slici 9.1.

a) Na slici je najprije prikazano, da su jedinični kapacitet i odvod voda jednaki nuli.

b) Zatim je s lijeve strane prikazana nadoknadna shema takvog voda, kod kojeg izmedju početka i kraja postoje samo u seriju spojeni jedinični djelatni otpori i jedinični induktiviteti odnosno induktivni otpori.

c) Takvu shemu spoja možemo nadomjestiti drugom, u kojoj su svi djelatni otpori grupirani skupa, a isto tako su induktiviteti odnosno induktivni otpori grupirani skupa.

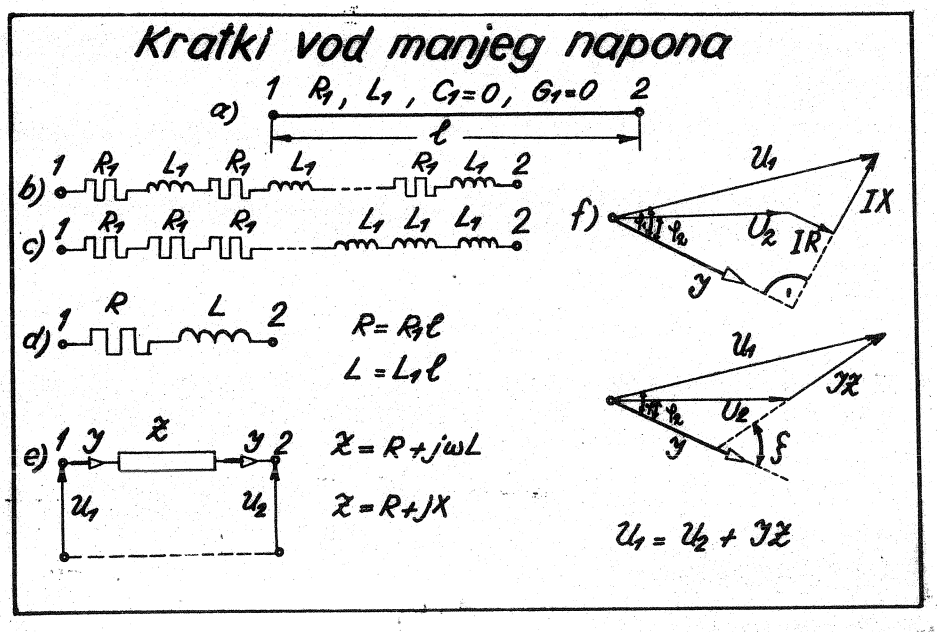
d) Konačno možemo sve jedinične djelatne otpore sabrati u jedan djelatni otpor, koji je jednak umnošku jediničnog djelatnog otpora i dužine voda. Analogno možemo postupiti s induktivitetom, odnosno induktivnim otporom, i dobiti jedan induktivitet odnosno induktivni otpor, koji je jednak jediničnom induktivitetu pomnoženom s dužinom voda.

e) Prema tome kratki vod manjeg napona možemo prikazati jednom jedinom impedancijom izmedju početka i kraja voda. Ta se impedancija sastoji od realnog dijela, koji je jednak ukupnom djelatnom otporu voda, i od imaginarnog dijela, u koji ulazi ukupni induktivni otpor voda. Kod slučaja kratkog voda je karakteristično to, da je struja na početku voda jednaka struji na kraju voda. Jedino se napon na početku voda razlikuje od napona na kraju voda.

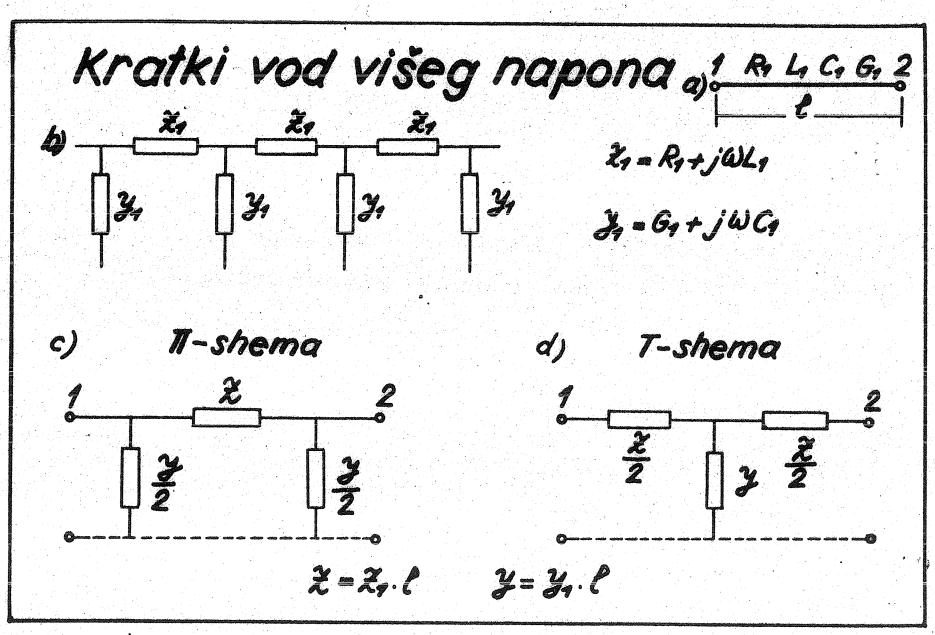
f) Ako struju i napone označimo kao što je učinjeno pod e) onda možemo postaviti postupak za električni proračun kao što je to učinjeno na desnoj strani slike. Tu je prikazan električni proračun u prvom redu pomoću grafičke meto-

de, i to bilo da pad napona u vodu konstruiramo pomoću dvije komponente, tj. pada napona u djelatnom otporu i pada napona u induktivnom otporu, bilo da pad napona konstruiramo odmah kao pad napona u impedanciji sa kutem, koji toj impedanciji odgovara. Konačno je dan i analitički izraz za električni proračun, pri čemu dakako treba koristiti simbolički račun.

Korisno je ovdje ponovno upozoriti, da se čitav proračun vrši za jednu fazu. Struja s kojom se računa jest ionako struja u jednoj fazi, impedancija se odnosi takodjer na jednu fazu, kao što je to u poglavlju o konstantama voda i provedeno, a za napone takodjer treba uzeti fazne napone, tj. napone izmedju faze i neutralnog zamišljenog vodiča.



Sl. 9.1



Sl. 9.2

KRATKI VOD VIŠEG NAPONA

Ovakav slučaj već dolazi u obzir kod prijenosa električne energije, gdje se može raditi i o vodovima manje dužine. Medjutim, jer se radi o višem naponu, ne možemo više zanemariti poprečnu granu, pa tako moramo uzeti u račun ne samo djelatni otpor i induktivitet, nego takodjer i kapacitet i odvod. Kako je u praksi odvod redovito veoma malen u usporedbi s kapacitivnom susceptancijom (naročito ako ne dolazi do korone), to se u praksi često kod električnog proračuna zanemaruje odvod. Mi ćemo ovdje, medjutim, ipak radi potpunosti uzeti i odvod u račun.

a) Osnov za provedbu električnog proračuna kod kratkog voda višeg napona dan je na slici 9.2, gdje je u prvom redu shematski prikazan vod sa svim konstantama.

b) Nadalje je prikazana nadoknadna shema takvog voda, i to samo za jedan njegov dio negdje izmedju početka i kraja voda. U toj shemi dolaze jedinične impedancije voda kao uzdužne grane i jedinične admitancije voda kao poprečne grane. Ovdje više nemamo opravdanja da skupimo sve uzdužne grane zajedno odnosno sve poprečne grane zajedno, jer to ovakva shema ne dopušta.

c) Medjutim, budući da se radi o kratkom vodu, možemo pribjeći jednom približnom rješenju, i to tako da npr. sve uzdužne grane koncentriramo u sredinu voda, a poprečne grane pola na početku voda i pola na kraju voda. U tom slučaju možemo sve uzdužne grane sabrati zajedno u jednu jedinu impedanciju, koja se dobiva množenjem jedinične impedancije sa dužinom voda. Polovinu poprečnih grana, koje smo koncentrirali na početku voda, takodjer možemo skupiti zajedno u jednu jedinu impedanciju, koju dobijemo kao polovicu umnoška jedinične admitancije sa dužinom voda. Analogno postupimo s poprečnim granama, koje smo koncentrirali na kraju voda. Na taj način dobivamo tzv. "Pi-shemu".

d) Ako postupimo obrnuto, tj. tako da sve poprečne grane koncentriramo u sredini voda, a uzdužne grane pola na početku i pola na kraju voda, onda ćemo dobiti tzv. nadoknadnu "T-shemu".

Gornji postupak možemo drugim riječima opisati ovako. Kratki vod višeg napona možemo nadoknaditi "Pi-shemom", kojoj je uzdužna grana jednaka ukupnoj impedanciji voda, a poprečne grane na početku i na kraju sheme jednake su polovici ukupne admitancije voda. Isto tako kratki vod višeg napona možemo prikazati pomoću tzv. "T-sheme", u kojoj je poprečna grana jednaka ukupnoj admitanciji voda, a uzdužne grane na početku i kraju jednake su polovici ukupne impedancije voda.

Treba naglasiti da prikazivanje kratkog voda višeg napona pomoću nadoknadne "Pi-sheme" i nadoknadne "T-sheme" nije egzaktno, jer smo bez ikakvog opravdanja koncentrirali jedinične konstante voda, koje su u stvari raspodijeljene duž čitavog voda. Ovakav se postupak može opravdati samo kod kratkog voda, jer će u takvom slučaju dobivena pogreška biti malena, pa je možemo zanemariti.

Treba napomenuti da uvedene nadoknadne sheme ne samo što ne daju egzaktne rezultate, nego niti ne prikazuju vod u potpunosti. Nadoknadne sheme nam mogu poslužiti samo za dobivanje električnih prilika na početku i na kraju voda, a ne prikazuju što se dogadja duž samog voda. Tako npr. struja u uzdužnoj grani "Pi-sheme" nipošto ne odgovara struji u vodu, jer dok je kod "Pi-sheme" struja u uzdužnoj grani konstantna, dotle se kod stvarnog voda struja kontinuirano mijenja duž čitavog voda. Analogno niti struje u poprečnim granama "Pi-sheme" ne odgovaraju tačno strujama u poprečnim granama voda. Poprečne grane u "Pi-shemi" stoje jedna pod naponom na početku, a druga pod naponom na kraju, dok se napon na poprečnim granama u stvarnom vodu kontinuirano mijenja duž čitavog voda.

Treba napomenuti da kod dugog voda s poprečnim granama prije uvedeni pojmovi ukupna impedancija i ukupna admitancija ne predstavljaju fizikalne veličine, koje bi imale stvarni smisao. To su samo matematski pojmovi, koje smo uveli radi jednostavnosti razmatranja.

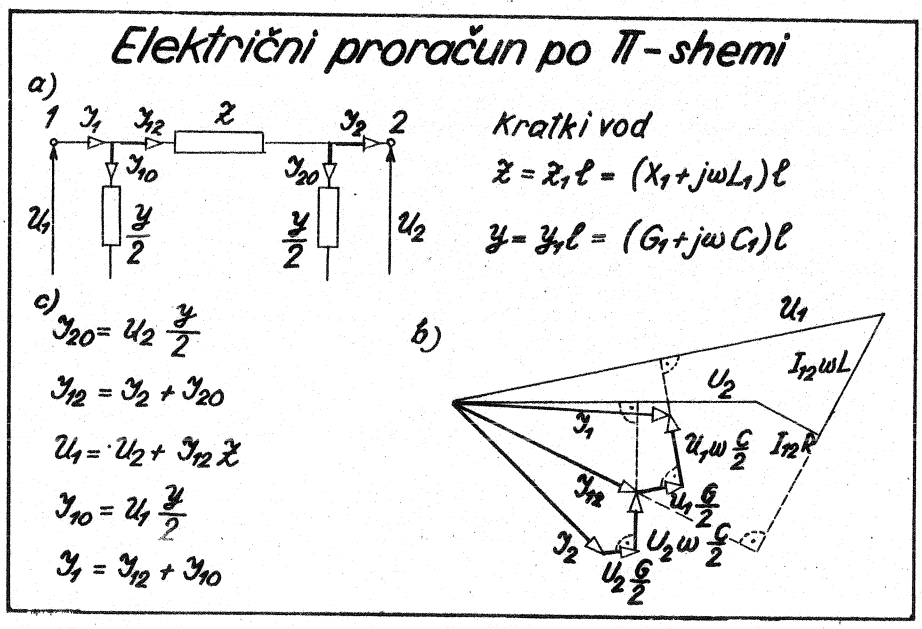
ELEKTRIČNI PRORAČUN PO "PI-SHEMI"

Ako kratki vod višeg napona prikažemo nadoknadnom "Pi-shemom", onda možemo električni proračun izvršiti na način, kao što je prikazano na slici 9.3.

a) Tu je najprije prikazana sama "Pi-shema", a zatim su označeni naponi i pojedine struje. Proračun "Pi-sheme", može se izvršiti prema formulama, koje su takodjer dane na slici, u smislu onoga što je prije rečeno.

Električni proračun može se izvršiti bilo grafički bilo analitički, što je jedno i drugo prikazano na slici. Pri tome smo pretpostavili, da su zadane prilike na kraju voda, tj. da je zadan fazni napon na kraju voda i struja na kraju voda. Medjutim, na analogni način može se provesti električni proračun i za slučaj da su zadane prilike na početku voda.

b) Kod grafičkog postupka najprije se nacrtaju vektori napona i struje na kraju voda. Zatim se toj struji doda struja u poprečnoj grani na kraju voda i dobivena vektorska suma odgovara struji, koja teče u uzdužnoj grani. Pomoću te struje izračuna se pad napona u uzdužnoj grani i doda naponu na kraju, pa se tako dobije napon na početku voda. Pomoću tog napona izračuna se struja u poprečnoj grani na početku, i ta se struja doda struji uzdužne grane,



Sl. 9.3

pa se kao rezultat dobije struja na početku. Time su odredjeni napon i struja na početku "Pi-sheme" odnosno na početku voda, pa se iz tih veličina mogu odrediti i druge električne veličine, npr. snaga, faktor snage i sl.

c) Analitički postupak ide tačno istim redom kao i grafički, pa su na slici prikazani izrazi pomoću kojih se takav postupak provodi.

ELEKTRIČNI PRORAČUN PO "T-SHEMI"

Ako kratki vod višeg napona prikažemo nadoknadnom "T-shemom", onda se električni proračun vrši na način, kako je prikazano na slici 9.4.

a) Tu je najprije prikazana "T-shema", a dani su i izrazi za izračunavanje njezinih uzdužnih grana i njezine poprečne grane. U slici su nadalje označeni pojedini naponi i struje na pojedinim mjestima u shemi.

Električni proračun je ponovno prikazan uz pretpostavku da su zadane električne prilike na kraju voda, a da se traže električne prilike na početku voda. I ovdje je prikazan grafički i analitički postupak kao i prije.

b) Kod grafičkog postupka najprije nacrtamo vektor napona i struje na kraju. Ista struja teče u uzdužnoj grani na kraju, pa pomoću njega izračunamo pad napona u uzdužnoj grani na kraju. Taj pad napona dodamo naponu na kraju i tako dobijemo napon u sredini sheme. Pomoću tog napona izračunamo struju u poprečnoj grani, pa tu struju dodamo struji na kraju, i tako dobijemo struju na početku sheme. Ta struja teče u uzdužnoj grani na početku, pa pomoću nje izračunamo pad napona u uzdužnoj grani na početku. Dodamo li taj pad napona naponu u sredini voda, dobit ćemo napon na početku sheme, tj. napon na početku voda.

c) Analitički postupak ide istim tokom kao i grafički, pa su na slici dani izrazi na takav postupak.

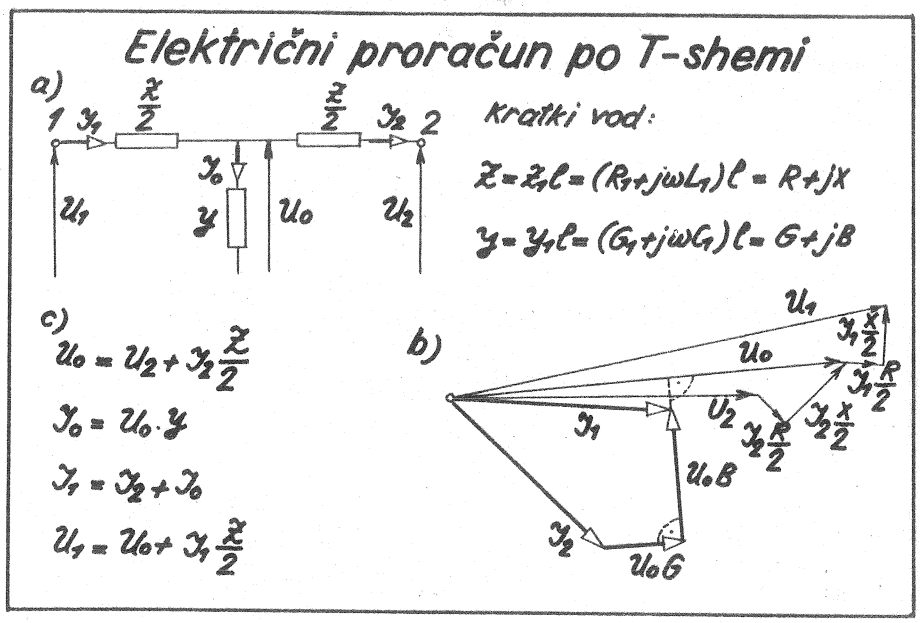
PRIMJER PRORAČUNA PO "PI-SHEMI"

Radi ilustracije dan je na slici 9.5 jedan primjer proračuna po "Pi-shemi".

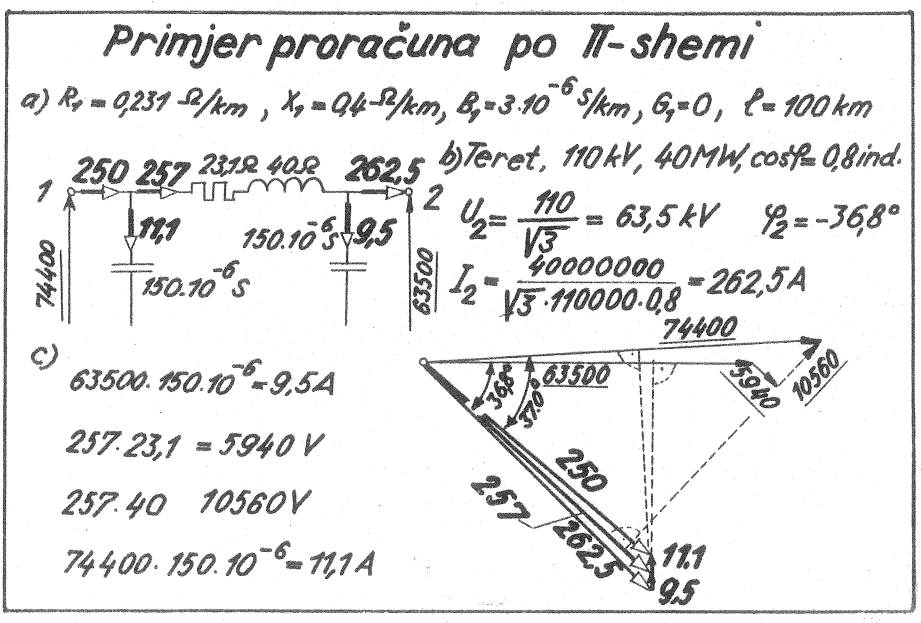
a) U prvom redu zadane su konstante voda, i to jedinični djelatni otpor, jedinični induktivni otpor, jedinična kapacitivna susceptancija, dok je odvod zanemaren. Nadalje je zadana i dužina voda.

b) U ovom primjeru zadane su električne prilike na kraju voda, i to tako, da je zadan linijski napon i djelatna snaga sa pripadnim faktorom snage.

U prvom redu treba da izračunamo fazni napon i struju na kraju voda. Budući da napon na kraju voda postavljamo u realnu os, to za njega treba izračunati samo iznos vektora, dok je kut vektora jednak nuli. Za struju naprotiv treba izračunati i iznos i kut vektora.



Sl. 9.4



Sl. 9.5

c) Račun je na slici proveden grafički, a potrebni računi za odredjivanje struja u poprečnim granama odnosno padova napona u uzdužnoj grani posebno su prikazani. Kao rezultat dobivamo: napon na početku voda $U_1 = 74.480$ V, struja na početku voda $I_1 = 250$ A, fazni kut na početku voda $\varphi_2 = -37{,}0°$.

d) Isti ćemo primjer sada ponoviti pomoću analitičkog postupka. U prvom redu prikazane su ukupna impedancija i ukupna amitancija voda. Nadalje su prikazani napon i struja na kraju voda prema prije izračunatim vrijednostima.

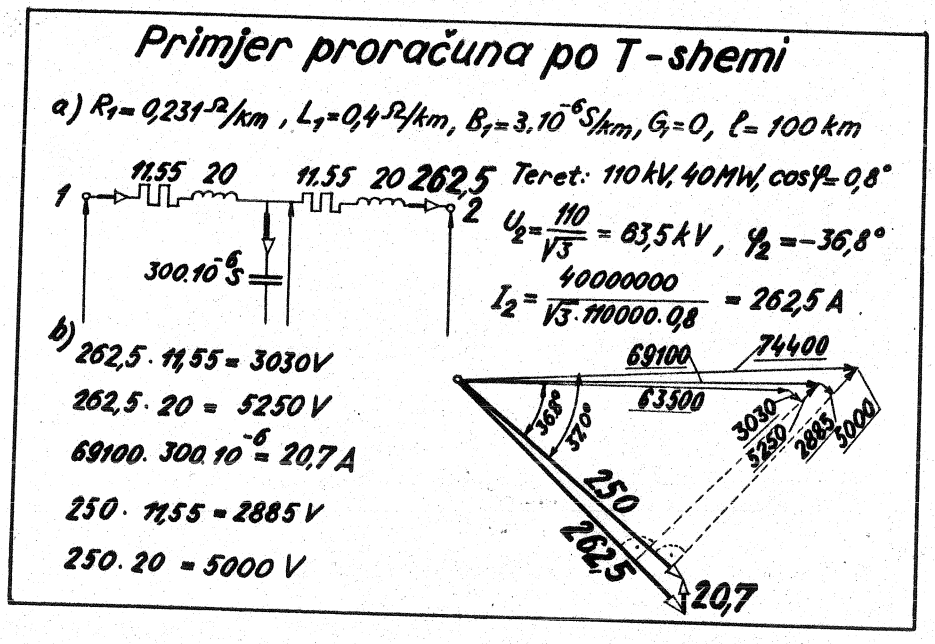
Postupak je proveden prema prije postavljenim izrazima i ne treba posebnog tumačenja. Dobiveni rezultati slažu se s rezultatima dobivenima grafičkim postupkom. (Vidi sliku 9.6 na strani 220)

PRIMJER PRORAČUNA PO "T-SHEMI"

Radi ilustracije na slici 9.7 je isti primjer izradjen na temelju "T-sheme".

a) U prvom redu dane su konstante voda i njegova dužina sa istim podacima kao i prije. Isto tako dane su iste vrijednosti za prilike na kraju voda odnosno za napon i struju na kraju voda.

b) Proračun je izvršen pomoću grafičkog postupka dok su potrebne veličine za padove napona u uzdužnim granama i za struju u poprečnoj grani posebno izračunate.



Sl. 9.7

Kao rezultat dobivamo iste vrijednosti koje smo dobili i kod proračuna po "Pi-shemi". To nam pokazuje da kod dužine voda od 100 km, kao što je slučaj u ovom primjeru, možemo bez daljnjega računati pomoću ovako približnog postupka, upotrebljavajući bilo "Pi-shemu" bilo "T-shemu".

c) Radi potpunosti isti je primjer na slici 9.8 izradjen analitičkim postupkom po "T-shemi". U prvom redu izračunate su vrijednosti za uzdužne grane i za poprečnu granu "T-sheme", a isto tako, dane su vrijednosti za struju napona na kraju voda. Proračun je izvršen prema prije postavljenim izrazima i posebno objašnjenje nije potrebno. Rezultati se slažu s prije dobivenim vrijednostima.

GRANICA TAČNOSTI PRIBLIŽNIH SHEMA

Istražit ćemo, do koje dužine voda možemo upotrebljavati približne sheme, tj. približnu "Pi-shemu" i približnu "T-shemu". Taj račun proveden je na slici 9.9 i 9.10.

Primjer proračuna po T-shemi

c) $\frac{\underline{Z}}{2} = 11{,}55 + j20\,\Omega$, $\underline{Y} = j300 \cdot 10^{-6}\,S$, $U_2 = 63500\,V$, $\underline{Y}_2 = 262{,}5\,\angle -36{,}8°$

$\underline{Y}_2 \frac{\underline{Z}}{2} = (210 - j157{,}5)(11{,}55 + j20) = 2425 + 3150 + j4200 - j1820 = 5575 + j2380\,V$

$\underline{U}_0 = 63500 + 5575 + j2380 = 69075 + j2380 = 69100\,\angle 2{,}0\,V$

$\left(U_0 = \sqrt{69075^2 + 2380^2} = 69100\,V,\ tg\,\delta = \frac{2380}{69075},\ \delta = 2{,}0°\right)$

$\underline{Y}_0 = 69100\,\angle 2{,}0° \cdot 300 \cdot 10^{-6}\,\angle 90° = 20{,}75\,\angle 92° = -0{,}7 + j20{,}7\,A$

$\underline{Y}_1 = (210 - j157{,}5) + (-0{,}7 + j20{,}7) = 209{,}3 - j136{,}8 = 250\,\angle -33{,}2\,A$

$\underline{Y}_1 \frac{\underline{Z}}{2} = (209{,}3 - j136{,}8)(11{,}55 + j20) = 2420 + 2735 + j4810 - j1580 = 5155 + j2600\,V$

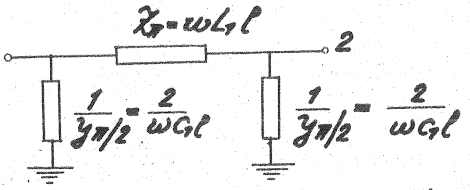
$\underline{U}_1 = (69075 + j2380) + (5155 + j2600) = 74230 + j4980 = 74400\,\angle 3{,}8°\,V$

$\varphi_1 = -33{,}2 - 3{,}8 = -37{,}0°$.

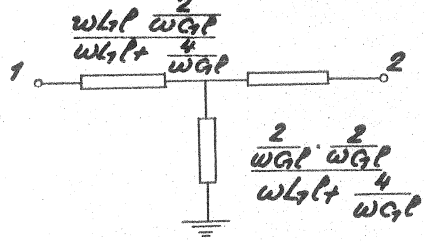
Sl. 9.8

Granica točnosti približnih shema

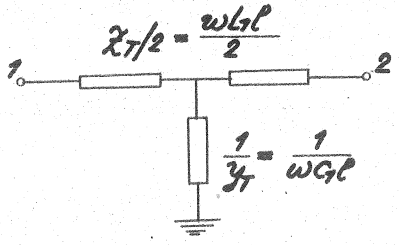
a) Π-shema



b) Transfigurirana Π-shema



c) T-shema



Sl. 9.9

a) U prvom redu prikazana je "Pi-shema" i izračunate su impedancije pojedinih grana "Pi-sheme", na način kao što je prije opisano.

b) U drugom redu je postavljena "T-shema", koja je dobivena transfiguracijom gornje "Pi-sheme". Po poznatim formulama dobiju se izrazi za tako dobivenu shemu, koji su uz pojedine grane upisani.

c) Na desno je postavljena "T-shema", a uz njene grane su takodjer upisane impedancije pojedinih grana, izračunate na način kao što je prije opisano.

Vidi se da impedancije "T-sheme" dobivene transfiguracijom "Pi-sheme", odnosno dobivene direktno, nisu jednake nego se medjusobno razlikuju. To nam takodjer ukazuje na netačnost približnih shema, jer kad bi te sheme bile tačne,

onda bi impedancije "T-sheme", dobivene na jedan odnosno na drugi način, morale biti medjusobno jednake.

Granica točnosti približnih shema (nastavak)

$$2x(\text{grješka}) \cong \frac{\omega L_1 \ell}{4} \cdot \frac{\omega C_1 \ell}{} = \ell^2 \frac{\omega^2}{4} L_1 C_1 \qquad \ldots (1)$$

slijedi: $\ell = \frac{2}{\omega} \cdot \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \sqrt{2x(\text{grješka})}$

$$\ell = \frac{2}{\omega} \cdot v \sqrt{2x(\text{grješka})}, \quad v = \text{brzina vala} \ldots (2)$$

Uz grješku manju od 0,5% $\quad \ell < \frac{2}{\omega} \cdot v \sqrt{0{,}01} \ldots (3)$

Za nadzemne vodove: $\ell < \frac{0{,}2}{314}\, 300000 \cong 200\,km$

Za kabele: $\ell < \frac{0{,}2}{314} \cdot 150000 \cong 100\,km$

Sl. 9.1o

Potrebni račun izvršen je na slici 9.1o. Očito je da će približna "Pi-shema" imati grešku u jednom smislu, a približna "T-shema" da će imati grešku u drugom smislu. Prema tome možemo uzeti da razlika u vrijednostima impedancija "T-sheme", dobivene na dva razna način, odgovara dvostrukoj grešci, jer bi stvarna vrijednost morala ležati negdje u sredini izmedju vrijednosti dobivene po "Pi-shemi" odnosno po "T-shemi".

Ako usporedimo vrijednosti za impedancije u transfiguriranoj "Pi-shemi" i u direktno dobivenoj "T-shemi", vidimo da razlika dolazi zbog prvog člana u nazivniku za impedancije transfigurirane "Pi-sheme". To vrijedi kako za uzdužnu tako i za poprečnu granu transfigurirane "Pi-sheme". Kad tog prvog člana u nazivniku ne bi bilo, onda bismo dobili iste vrijednosti, za impedancije obiju shema. Prema tome odnos prvog člana prema čitavom nazivniku, odnosno kod malih grešaka (što je praktički isto), odnos prvog člana prema drugom članu u nazivniku, odgovara dvostrukoj greški. To je i postavljeno u prvom redu na slici 9.1o, izraz (1). Iz tako postavljenog izraza slijedi izraz za dužinu voda ako unaprijed odredimo veličinu greške, izraz (2). U tom izrazu nalazi se kružna frekvencija, brzina vala koja slijedi iz jediničnog induktiviteta i jediničnog kapaciteta voda, te veličina greške.

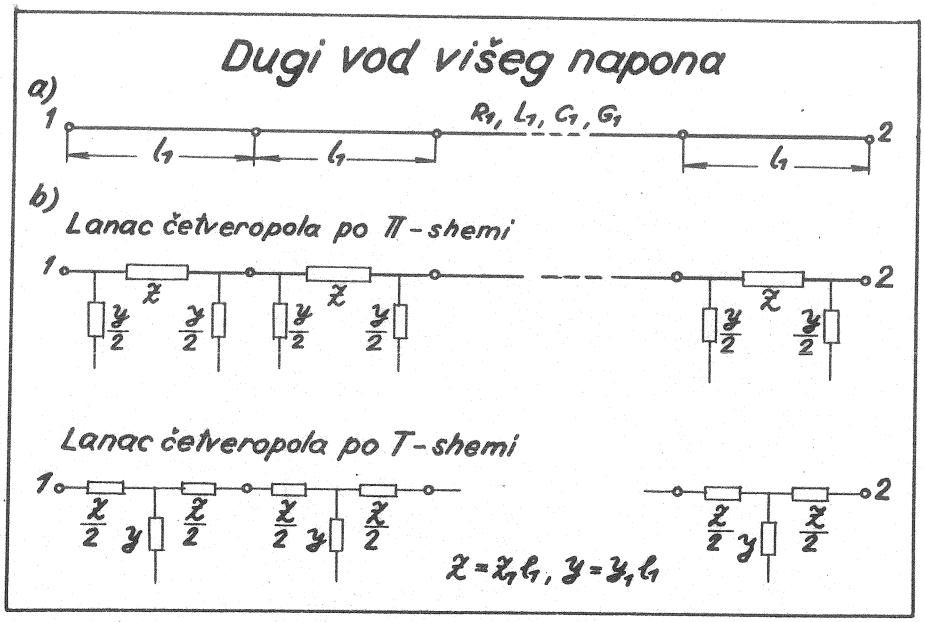
Ako kao grešku dopustimo najviše o,5%, onda ćemo dobiti granicu, do koje dužine voda smijemo upotrijebiti približne sheme, izraz (3). Za nadzemne vodove brzina vala iznosi 3oo.ooo km/sek, pa i granična dužina iznosi otprilike 2oo km. Kod kabela je brzina vala dva puta manja te iznosi oko 15o.ooo km/sek, tako da granična dužina kabela iznosi oko 1oo km.

DUGI VOD VIŠEG NAPONA

Kod voda, koji je duži od prije izračunatih graničnih dužina, za koje možemo primijeniti postupak s približnom "Pi-shemom" odnosno "T-shemom", greška bi bila prevelika, kad bismo postupili na isti način.

a) Medjutim ovdje možemo čitavu dužinu voda podijeliti na nekoliko odsjeka, od kojih svaki ne prelazi dužinu, za koju je primjena približnih shema dovoljno tačna. Takav postupak prikazan je na slici 9.11, gdje je u prvom redu prikazan dugi vod podijeljen na odsjeke, pri čemu računamo sa sve četiri konstante voda.

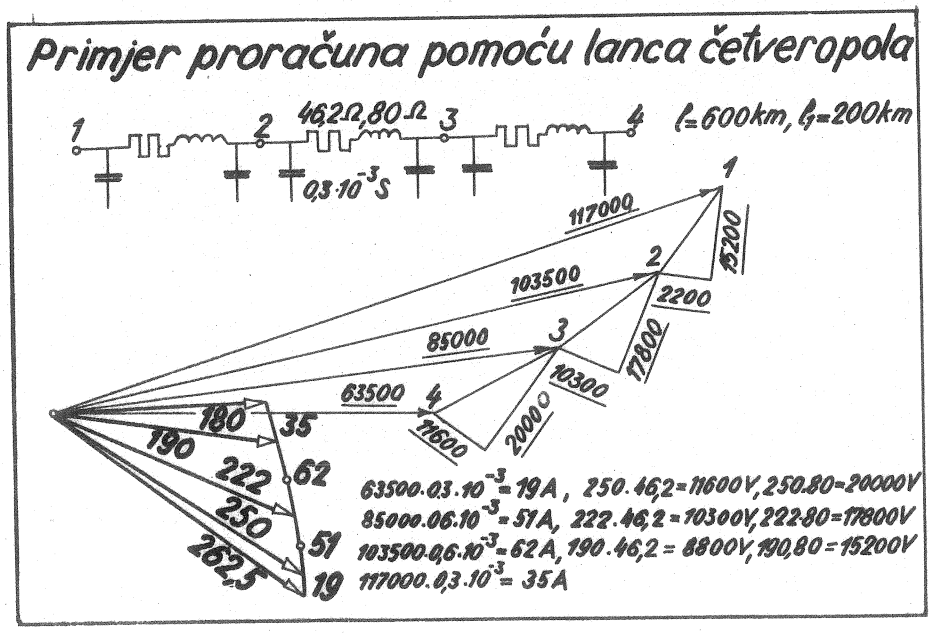
b) Svaki odsjek možemo prikazati bilo pomoću približne "Pi-sheme", bilo pomoću približne "T-sheme". Kako "Pi-shemu" tako i "T-shemu" možemo nazvati nazivom "četveropol", te ovako dobiveni postupak nazivamo postupak pomoću lanca



Sl. 9.11

četveropola. Na slici je prikazan lanac četveropola dobiven po "Pi-shemi", a isto tako i lanac četveropola dobiven po "T-shemi". Za svaki četveropol izračunaju se impedancija odnosno admitancija njegovih grana na način, kao što je to prije pokazano za približnu "Pi-shemu" odnosno približnu "T-shemu".

Postupak s lancem četveropola je u svojoj biti veoma jednostavan, ali zahtijeva dugotrajno računanje, ako se radi o većoj dužini voda. S druge strane imamo tu prednost, što kao rezultat dobijemo električne prilike ne samo na početku i na kraju voda nego i na pojedinim tačkama duž voda, što često može biti od interesa, naročito kod veoma dugih vodova.



Sl. 9.12

PRIMJER PRORAČUNA POMOĆU LANCA ČETVEROPOLA

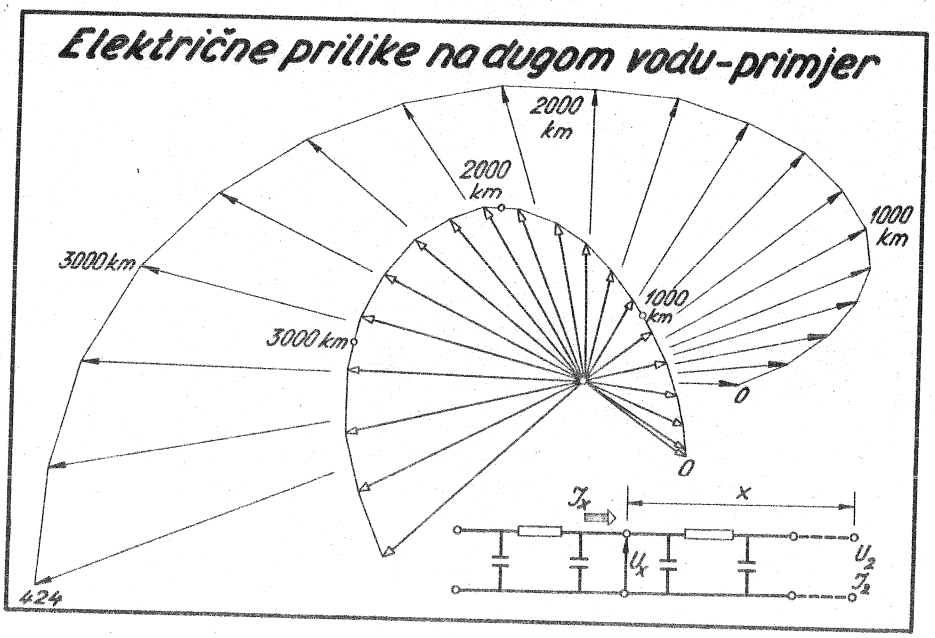
Radi ilustracije dan je primjer proračuna pomoću lanca četveropola, dobivenog na osnovu "Pi-shema". Proračun je proveden grafički i prikazan na slici 9.12.

Za ovaj primjer uzeti su isti brojčani podaci za konstante voda kao i u prijašnjim primjerima, ali je ukupna dužina voda uzeta 6oo km. Vod je podijeljen na tri odsjeka po 2oo km, i za pojedini odsjek izračunate su vrijednosti impedancije i admitancija u nadoknadnoj "Pi-shemi". Te su vrijednosti upisane u shemi na slici. Isto tako je pretpostavljeno, da su zadane prilike na kraju voda, tj. kod tačke označene brojkom 4, i da su zadani napon i struja na kraju voda isti kao i u prijašnjim primjerima. Postupak proračuna za pojedini četveropol isti je kao i prije, a vrijednost na početku jednog četveropola ulaze dalje u račun kao vrijednosti na kraju susjednog četveropola.

Za sam proračun prvo su nacrtani vektori napona i struje na kraju voda. Zatim je izračunata struja u poprečnoj grani na kraju zadnjeg četveropola, koja iznosi 19 A. Ta struja je vektorski dodana struji na kraju, pa je dobiven iznos od 25o A. S tom strujom izračunat je pad napona u djelatnom i u induktivnom otporu posljednjeg četveropola, koji iznose 11.6oo V odnosno 2o.ooo V. Ti su naponi vektorski dodani naponu na kraju pa je tako dobiven napon na početku zadnjeg četveropola, tj. napon u tački 3, koji iznosi 85.ooo V. S tim naponom izračunata je struja u poprečnim granama uz tačku 3, i to odmah za obje grane zajedno. Ta struja iznosi 51 A. Ako tu struju vektorski dodamo prijašnjoj struji od 25o A, onda dobivamo struju u uzdužnoj grani srednjeg četveropola, koja iznosi 222 A. S tom strujom računamo pad napona u uzdužnoj grani srednjeg četveropola i postupak na isti način nastavljamo dalje. Konačno kad dobijemo napon na početku koji iznosi 117.ooo V, onda možemo izračunati i struju u poprečnoj grani na početku prvog četveropola, te dobiti ukupnu struju na početku, koja iznosi 18o A. Vektorskim postupkom dobijemo dakako ne samo iznose napona i struja, nego i kut njihovog vektora.

Vektorska slika nam daje ne samo napon i struju na početku i kraju voda, i to po iznosu i kutu, nego takodjer i napon i struju u tačkama 2 i 3 na vodu. Ovim postupkom dobili smo tako prilike duž voda i to dakako diskontinuirano. Ali povezivanjem tih tačaka jednom krivuljom, možemo prilično tačno dobiti promjenu napona i promjenu struje duž voda.

Da bismo za isti primjer dobili uvid u električne prilike duž voda, ako je vod znatno dulji, nastavljen je gore prikazani račun dalje za daljnje odsjeke voda, sve do dužine od preko 3ooo km. Dobiveni rezultati, bez potrebnih računanja, prikazani su vektorski na slici 9.13. Promatrajući za napon i za struju promjenu iznosa i promjenu faznog kuta duž voda, a isto tako i promjenu faznog kuta izmedju struje i napona, vidimo da su na dugom vodu električne prilike sasvim specifične, pa će biti od interesa, da se time potanje pozabavimo.

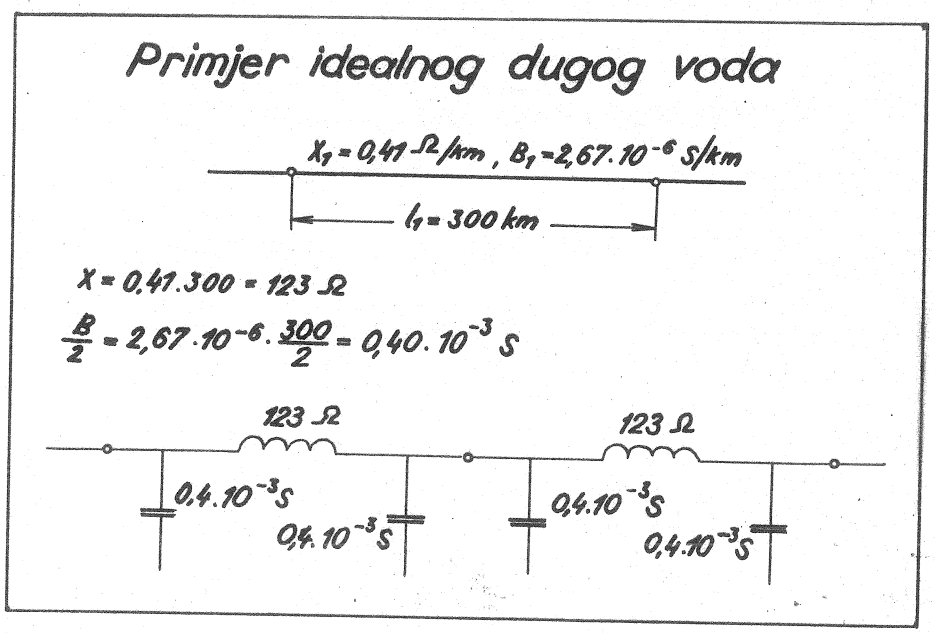


Sl. 9.13

1o. PRILIKE NA IDEALNOM VODU

ELEKTRIČNE PRILIKE NA DUGOM VODU

Postupak pomoću lanca četveropola omogućuje nam da općenito razmotrimo prilike na dugom vodu. Da bismo dobili što jednostavniju fizikalnu sliku, promatrat ćemo tzv. idealni vod, tj. vod kojemu smo zanemarili djelatni otpor i odvod. U takvom vodu nema gubitaka energije, pa ga zato i nazivamo idealnim vodom. Jedine konstante koje uzimamo u račun su induktivitet i kapacitet, a one u stvari i igraju glavnu ulogu u električnim prilikama na dugim vodovima. Opravdanost zanemarivanja djelatnog otpora i odvoda leži u tome, što je kod vodova vrlo visokog napona presjek vodiča razmjerno velik, pa je i djelatni otpor takvog voda prilično malen. S druge strane za odvod je već rečeno, da je razmjerno malen i da ga redovito možemo zanemariti.



Sl. 1o.1

Prilikom naših razmatranja uzet ćemo kao primjer idealni vod s jediničnim induktivnim otporom i s jediničnom kapacitivnom suspedancijom kao što je prikazano na slici 1o.1. Taj ćemo vod podijeliti na odsjeke po 3oo km što je doduše više od granične dužine koju smo prije izračunali, ali će za ova razmatranja to zadovoljiti. Svaki odsjek prikazat ćemo pomoću približne "Pi-sheme", pa su na slici izračunate i upisane odgovarajuće vrijednosti za impedanciju i admitanciju pojedinih grana.

PRAZNI HOD IDEALNOG DUGOG VODA

U prvom redu promatrat ćemo idealni dugi vod u praznom hodu. Prazni hod definiran je time da je struja na kraju voda jednaka nuli, a napon jednak nekoj odredjenoj vrijednosti. Mi ćemo u našem primjeru kao napon na kraju uzeti 1oo.ooo V.

Na slici 1o.2 (vidi na strani 22o) dani su najprije potrebni podaci za jedan odsjek idealnog voda u dužini od 3oo km. Proračun električnih prilika izvršen je na prije opisani način, a na slici su prikazani samo rezultati računa, tj. naponi u pojedinim tačkama, padovi napona u pojedinim odsjecima, struje u pojedinim poprečnim granama i struje u uzdužnim granama odnosno na karakterističnim tačkama voda. Pri tome je kraj voda crtan u gornjoj slici na desnoj strani, a vod prema početku nastavljen je u drugom redu takodjer od desna u lijevo i dalje u trećem redu od desna u lijevo.

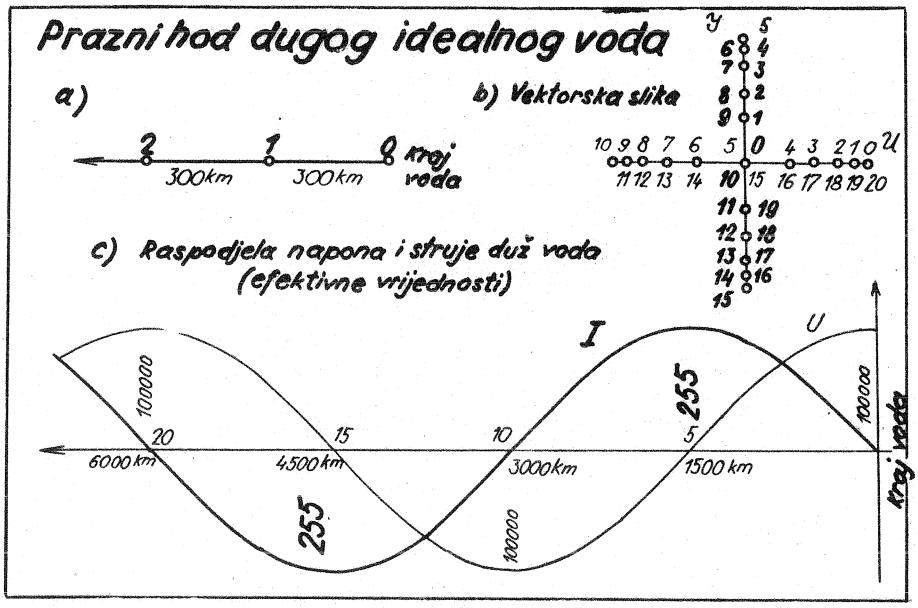
Kao što se iz dobivenih rezultata vidi, vrijednosti napona imaju uvijek samo realni član, a to znači da vektor napona ostaje uvijek na realnom

pravcu. Struja naprotiv ima samo imaginarni član, i to znači da je kut izmedju napona i struje uvijek jednak 90°. Pri tome struja na nekim mjestima prethodi, a na nekim zaostaje za naponom.

Prije odredjene prilike na dugom vodu prikazane su na drugi način na slici 10.3.

a) Tu je u prvom redu shematski prikazan dugi vod gdje su pojedine tačke na razmaku od 300 km označene brojkama 0, 1, 2, itd. od kraja prema početku voda.

b) Desno gore dana je vektorska slika napona i struja prema prije dobivenim vrijednostima. U stvari tu su vektori napona i struja prikazani u Gaussovoj ravnini i za pojedinu tačku voda vektoru odgovara dužina od ishodišta pa do tačke definirane pripadnim brojem. Vidimo da svi vektori napona ostaju na realnoj osi, makar poprimaju njihovi iznosi pozitivni i negativni predznak. Isto tako vidimo da svi vektori struje ostaju na pravcu, koji se poklapa s imaginarnom osi koordinatnog sistema tj. da je kut izmedju napona i struje uvijek jednak 90°. Iznos struje takodjer poprima pozitivne i negativne vrijednosti. Iz toga slijedi da je struja prema naponu na nekim tačkama voda induktivna, a na drugim tačkama voda kapacitivna.

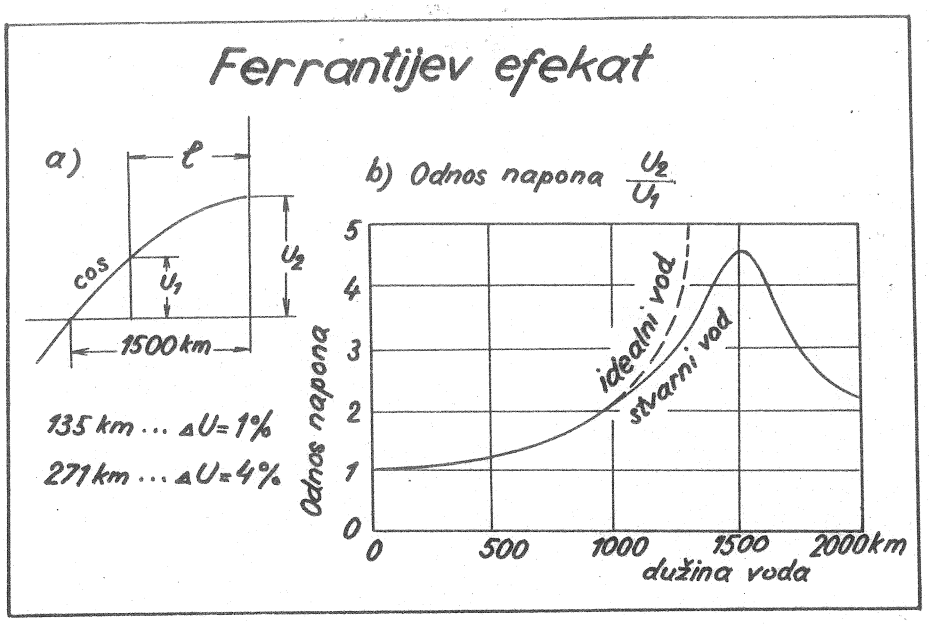


Sl. 10.3

c) Na dnu slike prikazana je raspodjela napona i struje duž voda bez obzira na fazni kut. Pri tome su prikazane efektivne vrijednosti napona i struja. Vidi se, da se napon duž voda mijenja po krivulji koja odgovara kozinusoidi, dok se struja mijenja duž voda po krivulji, koja odgovara sinusoidi. Na mjestima, gdje efektivna vrijednost napona pada na nulu, efektivna vrijednost struje poprima svoju maksimalnu vrijednost. I obrnuto, tamo gdje je struja jednaka nuli, napon poprima maksimalnu vrijednost. Nadalje vidimo, da amplituda kozinusoide ostaje konstantna, tj. da je maksimalna vrijednost napona jednaka 100.000 V na sva tri mjesta duž voda, gdje napon poprima maksimalnu vrijednost. Isto tako i amplituda sinusoide je konstantna, tj. struja dosiže vrijednost od 255 A tamo, gdje god struja poprima maksimalnu vrijednost. Isto tako vidimo da na udaljenosti od 6.000 km od kraja voda napon i struja poprimaju tu istu vrijednost kao i na kraju voda, pa da se odatle dalje slika raspodjele napona i struje ponavlja. Jednom periodu promjene napona odnosno struje duž voda odgovara dakle dužina od 6.000 km.

FERRANTIJEV EFEKAT

a) Na slici 10.4 još je jednom prikazana krivulja raspodjele napona duž voda, i to za dužinu voda od 1500 km. Napon na desnom kraju te krivulje prikazuje napon na kraju voda, a napon na bilo kojoj tački krivulje prikazuje napon na početku voda za dotičnu dužinu voda. Vidimo, da je napon na kraju voda veći od na-



Sl. 1o.4

pona na početku voda, i to je karakteristično za dugi vod u praznom hodu. Ovo nazivamo Ferrantijevim efektom.

b) Na desnoj strani nacrtan je dijagram odnosa napona prema dužini voda. Kao odnos napona crtan je odnos napona na kraju prema naponu na početku. Po zakonu kozinusa može se taj odnos lako izračunati, i on je na dijagramu prikazan crtkanom linijom. Taj odnos za dužinu voda od 0 km iznosi 1. Za nešto veće dužine voda polako raste iznad 1 te kod dužine od 1ooo km dostiže vrijednost 2, a nakon toga naglo raste, tako da za dužinu voda od 15oo km dostiže beskonačno veliku vrijednost. To naravno vrijedi samo za idealni vod, dok kod stvarnog voda odnos napona ne može rasti u beskonačnost, jer u vodu postoje gubici energije. Na istom dijagramu punom linijom prikazan je odnos napona za neki stvarni vod. Vidimo da ipak odnos napona dosiže vrijednost iznad 4.

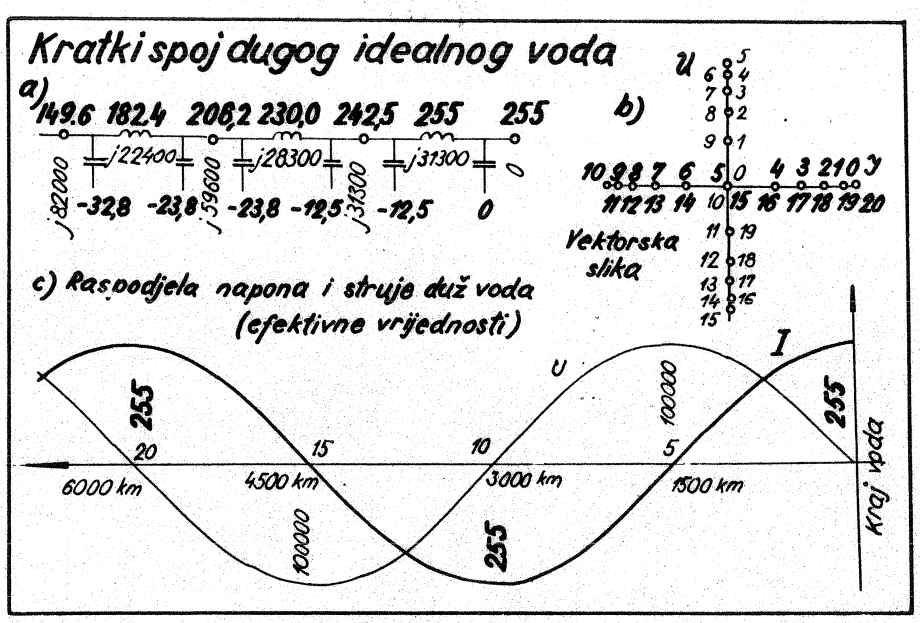
Ako želimo odrediti povišenje napona na kraju u postocima, možemo se poslužiti vrijednostima za funkciju kozinusa. Dužini od 15oo km odgovara četvrtina perioda kozinusoide, pa lako možemo odrediti dužinu, za koju se dobiva povišenje napona od 1%. Ta dužina iznosi 135 km. Za dužinu od 271 km dobivamo povišenje napona od 4%. Iz toga vidimo da u području dužina voda do otprilike 2oo km možemo smatrati da je povišenje napona uslijed Ferrantijeva efekta proporcionalno kvadratu napona.

KRATKI SPOJ DUGOG IDEALNOG VODA

Razmotrit ćemo nadalje električne prilike na dugom vodu za drugi karakteristični slučaj, tj. za kratki spoj na kraju voda. Kratki spoj definiran je time, da je napon na kraju jednak nuli, dok struja ima neku odredjenu vrijednost. Za ovaj primjer uzet ćemo struju na kraju voda isto toliku, kolika je bila maksimalna vrijednost struje kod slučaja u praznom hodu, tj. 255 A. Prilike voda u kratkom spoju prikazane su na slici 1o.5.

a) U prvom redu prikazane su vrijednosti napona i struje u pojedinim granama lanca četveropola, na isti način kao što je to bilo učinjeno kod praznog hoda. Vidimo, da dobivamo praktički iste brojčane vrijednosti kao kod slučaja u praznom hodu, ali počam od 15oo km od kraja voda pa dalje. Zbog toga ovdje i nisu ispisane vrijednosti napona i struja za čitavu dužinu voda, jer te vrijednosti možemo uzeti sa slike 1o.2. Ovdje medjutim treba napomenuti, da kod struje imamo uvijek samo realni član, dok kod napona imamo samo imaginarni član. To opet znači da su struja i napon medjusobno pomaknuti u fazi za 9o°.

b) Na temelju brojčanih podataka nacrtana je na desnoj strani vektorska slika napona i struja, analogno kao što smo to učinili kod praznog hoda.



Sl. 1o.5

c) Isto tako nacrtana je raspodjela napona i struje duž voda, i to opet njihovih efektivnih vrijednosti. U ovom slučaju dobili smo, da se struja od kraja prema početku voda mijenja po zakonu kozinusa, a da se napon mijenja po zakonu sinusa. I ovdje smo dobili sve amplitude, kozinusoide odnosno sinusoide, medjusobno jednake, tj. napon uvijek dosiže 1oo.ooo V, dok struja uvijek dosiže 255 A. Takodjer se ponavlja i to, da tamo, gdje struja ima vrijednost nule, napon poprima svoju maksimalnu vrijednost, i obrnuto tamo gdje napon poprima vrijednost nulu, struja poprima svoju maksimalnu vrijednost. Takodjer i ovdje period promjene napona i struje duž voda iznosi 6.ooo km, te se dalje raspodjela napona i struje ponavlja.

DISKUSIJA ELEKTRIČNIH PRILIKA U IDEALNOM VODU

Razmotrit ćemo najprije malo potanje električne prilike u idealnom vodu, koji je na kraju otvoren. Brojčani podaci navedeni su na slici 1o.6.

U prvom redu su izračunate vrijednosti jediničnog induktiviteta i jediničnog kapaciteta za idealni vod, koji smo prije uzeli u razmatranje, izrazi (1). Nadalje je izračunata energija magnetskog polja na 1 km dužine voda, i to na onom mjestu gdje struja postiže maksimum. Isto tako je izračunata energija električnog polja na dužini od 1 km voda, ali ovaj put na onom mjestu gdje napon postiže maksimum, izrazi (2). Iz rezultata vidimo, da su te dvije energije po iznosu medjusobno jednake.

Ako razmotrimo prilike na idealnom vodu u praznom hodu, za različite vodove i za različite zadane podatke, uvijek ćemo dobiti, da su energija magnetskog polja po jedinici dužine voda na mjestu maksimuma struje i energija električnog polja po jedinici dužine voda na mjestu maksimuma napona medjusobno jednake. Možemo dakle izraze za energiju magnetskog polja i energiju električnog polja medjusobno izjednačiti, kao što je dalje učinjeno na istoj slici. Iz toga uslova dobijemo kao rezultat, da je odnos maksimalne vrijednosti napona prema maksimalnoj vrijednosti struje uvijek konstantan, izraz (3). Taj odnos ima dimenziju otpora i zove se valni otpor. Iz istog uslova dobijemo i matematski izraz za valni otpor, izraz (4).

Na istoj slici je radi kontrole izračunat odnos maksimalne vrijednosti napona i maksimalne vrijednosti struje, a takodjer je izračunata vrijednost valnog otpora prema dobivenom izrazu. U oba slučaja dobili smo dakako isti rezultat. Ova razmatranja možemo ponoviti za idealni vod u kratkom spoju, pa ćemo, dakako, doći opet do istih rezultata i do istih zaključaka.

Diskusija prilika u dugom vodu

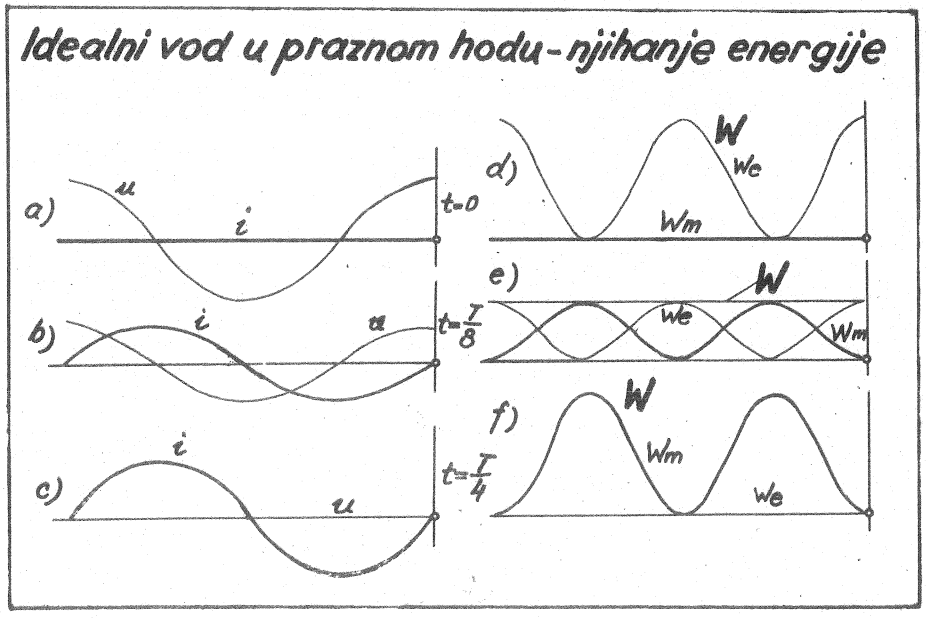
$$L_1 = X_1 : \omega = 0{,}41 : 314 = 1{,}304 \cdot 10^{-3}\ H/km$$
$$C_1 = B_1 : \omega = 2{,}67 \cdot 10^{-6} : 314 = 8{,}50 \cdot 10^{-9}\ F/km \quad \Big\} \ldots (1)$$

$$W_m = \frac{I_{max}^2 \cdot L_1}{2} = \frac{255^2 \cdot 1{,}304 \cdot 10^{-3}}{2} = 42{,}5\ J/km$$
$$W_e = \frac{U_{max}^2 \cdot C_1}{2} = \frac{100000^2 \cdot 8{,}5 \cdot 10^{-9}}{2} = 42{,}5\ J/km \quad \Big\} W_m = W_e \cdots (2)$$

$$\frac{I_{max}^2 \cdot L_1}{2} = \frac{U_{max}^2 \cdot C_1}{2} \qquad \frac{100000}{255} = 392\ \Omega \quad \ldots (3)$$

$$\frac{U_{max}}{I_{max}} = Z_v = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = \text{valni otpor} \qquad \sqrt{\frac{1{,}304 \cdot 10^{-3}}{8{,}50 \cdot 10^{-9}}} = 392\ \Omega \quad \ldots (4)$$

Sl. 1o.6



Sl. 1o.7

NJIHANJE ENERGIJE U IDEALNOM VODU

Razmotrit ćemo sada momentalne vrijednosti napona i struje u idealnom vodu, i to prvo, kad se taj vod nalazi u praznom hodu. To je načinjeno na slici 1o.7.

a) Na slici su s lijeve strane najprije nacrtane momentalne vrijednosti napona i struje duž voda dugog 6.ooo km i to za momenat, kad se vremenska zraka poklapa sa smjerom vektora napona. U tom momentu napon duž čitavog voda poprima tjemenu vrijednost, pa dobijemo istu sliku raspodjele napona duž voda kao i za efektivnu vrijednost, samo što su amplitude $\sqrt{2}$ puta veće. U istom momentu vektor struje stoji okomito prema vremenskoj zraci, tako da su momentalne vrijednosti struje duž čitavog voda u tom času jednake nuli.

b) U sredini s lijeve strane nacrtane su momentalne vrijednosti napona i struje za momenat, dok je vremenska os prošla samo kut od 45°.

c) Na donjoj slici s lijeve strane nacrtane su momentalne vrijednosti napona i struje za momenat kad je vremenska os prošla jednu četvrtinu kruga. U tom momentu struja duž voda postiže tjemenu vrijednost na svakom mjestu, dok je napon duž čitavog voda jednak nuli.

Kao što se iz slike momentalnih vrijednosti napona i struje za različite momente vidi, na pojedinim tačkama voda imamo njihanje vrijednosti napona i struje. Pri tome, tamo gdje je struja uvijek jednaka nuli, napon njiše u najširim granicama. I obrnuto, na onim mjestima, gdje je napon uvijek jednak nuli, struja njiše u najširim granicama.

Na desnoj strani slike nacrtana je raspodjela energije duž voda za iste prije promatrane momente. Energija električnog polja proporcionalna je kvadratu vrijednosti napona, a energija magnetskog polja proporcionalna je kvadratu vrijednosti struje. Ukupna energija u vodu dobiva se, ako sumiramo energiju električnog i energiju magnetskog polja.

d) Na gornjoj slici s desne strane nacrtane su energije električnog i magnetskog polja duž voda za momenat t=0. U tom momentu energija magnetskog polja duž čitavog voda jednaka je nuli, dok energija električnog polja postiže svoju maksimalnu vrijednost. Ukupna energija u vodu sastoji se samo od energije električnog polja.

e) Na srednjoj slici s desne strane nacrtane su energije električnog i magnetskog polja za momenat, kad je vremenska zraka prešla samo kut od 45°. U tom momentu suma energije električnog polja i energije magnetskog polja daje jednu horizontalnu liniju što znači, da je ukupna energija u vodu u tom času jednaka na bilo kojoj tački voda.

f) Na donjoj slici s desne strane nacrtane su energija električnog i energija magnetskog polja za momenat, kad je vremenska zraka prošla kut od 90°. U tom momentu je energija električnog polja duž čitavog voda jednaka nuli, dok energija magnetskog polja dosiže svoju maksimalnu vrijednost.

Iz desne slike vidimo, da u vodu postoji stalno pretvaranje energije električnog polja u energiju magnetskog polja i obrnuto. Nadalje se vidi, da ukupna energija voda nije fiksirana na jedno mjesto, nego da energija njiše duž voda. Pri tome u ovom primjeru za dužinu voda od 6.000 km nikakva energija ne ulazi u vod, niti ikakva energija izlazi iz voda.

PRIRODNA SNAGA U DUGOM IDEALNOM VODU

Sada ćemo razmotriti treći karakteristični pogonski slučaj na dugom idealnom vodu. Uzet ćemo, da imamo na kraju voda opterećenje, pa ćemo kao napon na kraju voda odabrati prije uzetu vrijednost od 100.000 V, a za struju takodjer prije odabranu vrijednost od 255 A. Nadalje moramo odabrati i fazni kut izmedju napona i struje na kraju, pa ćemo kao najjednostavnije uzeti, da su napon i struja u fazi.

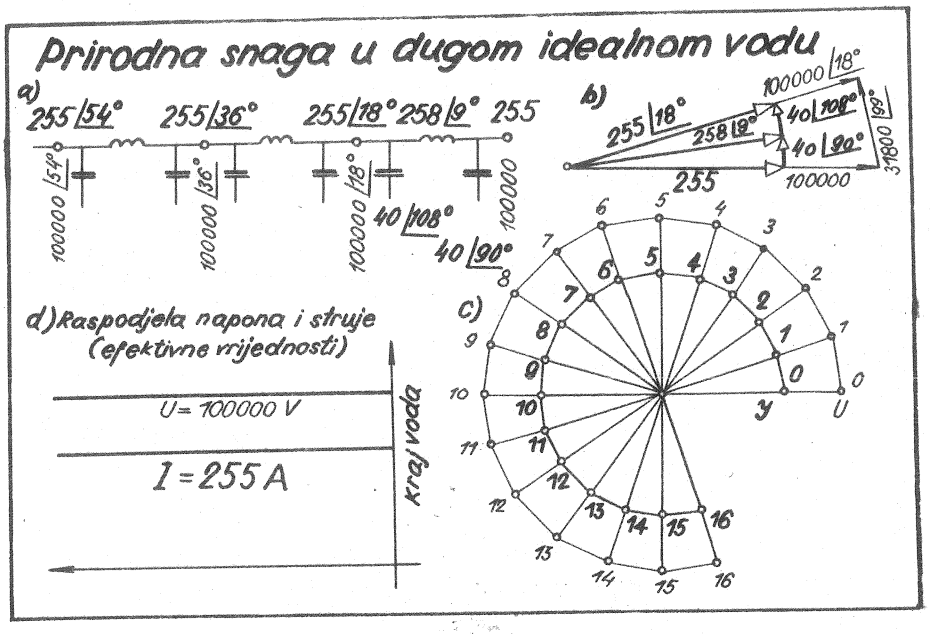
a) Na slici 10.8 su u prvom redu prikazane vrijednosti napona i struja u pojedinim tačkama voda, a isto tako i u pojedinim granama, što nam je bilo potrebno za proračun. Sam proračun ovdje nije prikazan, ali je izvršen na način kao što je to prije pokazano za proračun električnih prilika u "Pi-shemi".

b) Desno gore je na slici prikazana vektorska slika napona i struja, pa se vidi da u jednom odsjeku voda od 300 km dodje do okretanja naponskog vektora za 18°, dok iznos vektora ostaje nepromijenjen. Isto tako se i vektor struje okrene za 18°, dok mu iznos ostane nepromijenjen. Prema tome na početku zadnje "Pi-sheme" ostaju napon i struja medjusobno u fazi. Prilike u slijedećoj "Pi-shemi" su potpuno analogne samo što počinjemo s naponom i strujom, koji su oboje zaokrenuti prema naponu i struji na kraju za 18°.

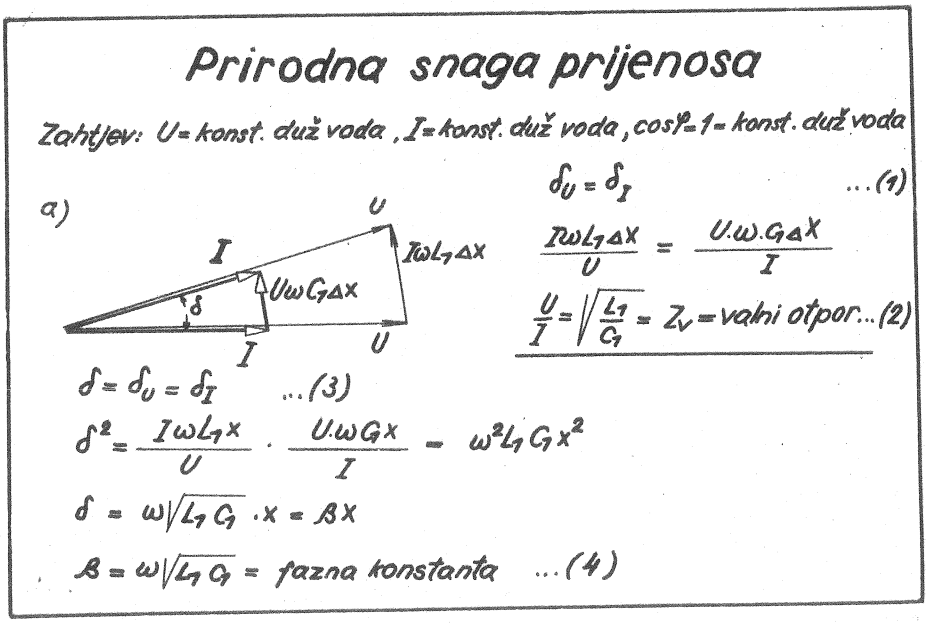
c) Prema tome se za svakih daljnjih 300 km voda dobiva samo okretanje vektora napona i struje za 18°, dok im iznosi ostaju nepromijenjeni. Vektorska slika napona i struje prikazana je desno dolje.

d) Raspodjela napona i struje duž voda, i to njihovih efektivnih vrijednosti, prikazana je na istoj slici lijevo dolje, gdje se vidi da se efektivne vrijednosti napona i struje duž voda ne mijenjaju.

Kod slučaja prijenosa, koji smo nazvali prijenosom "prirodne snage" vidimo da imamo slijedeće prilike: napon i struja po svojoj efektivnoj vrijednosti ostaju nepromijenjeni duž voda, kut izmedju napona i struje duž voda ostaje nepromijenjen i jednak nuli. Zbog čega ovakvu snagu u vodu nazivamo "prirodnom snagom", bit će objašnjeno kasnije.



Sl. 1o.8



Sl. 1o.9

USLOVI ZA PRIRODNU SNAGU PRIJENOSA

Ako kao zahtjeve za prilike u vodu postavimo, da su napon i struja duš voda konstantni i da je kut medju njima jednak 0, onda iz toga možemo dobiti uslov za prirodnu snagu prijenosa. To je učinjeno na slici 1o.9.

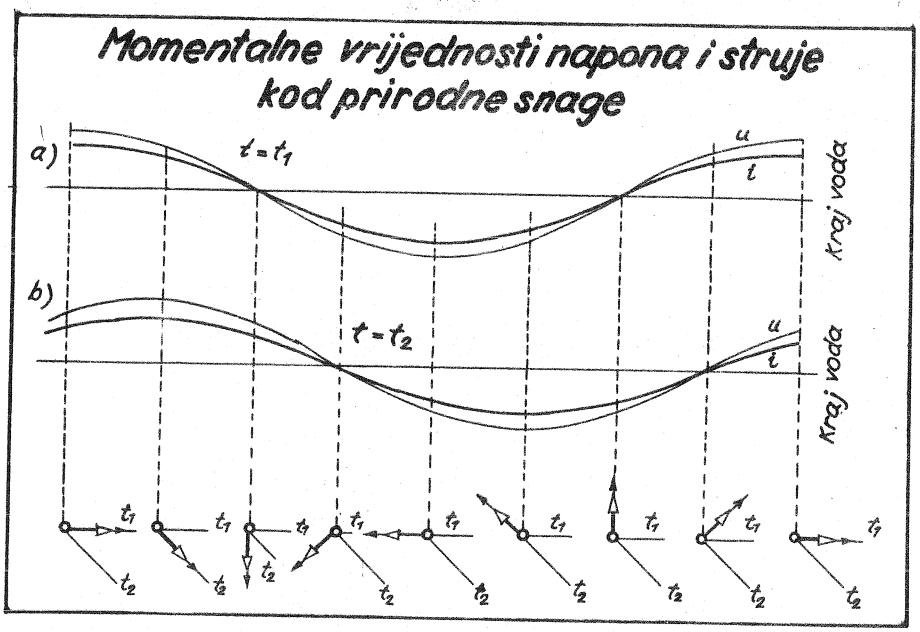
a) Najprije je postavljena vektorska slika napona i struje u jednoj tački voda, a zatim isto toliki iznos napona odnosno struje za drugu tačku voda, pri čemu kut izmedju vektora iznosi neku vrijednost, koja odgovara promatranoj dužini voda. U vektorskom dijagramu upisan je iznos za pad napona a isto tako za iznos za razliku struje.

Ako prijašnji zahtjev izrazimo matematski, možemo pisati, da je kut pomaka za vektor napona jednak kutu pomaka za vektor struje, izraz (1). Iz sličnosti dvaju trokuta na vektorskom dijagramu slijedi konačno uslov za odnos izmedju napona i struje, koji je jednak drugom korjenu iz odnosa jediničnog induktiviteta i jediničnog kapaciteta, izraz (2). Taj izraz nazivamo valnim otporom, a objašnjenje za taj naziv dat ćemo kasnije.

Isto tako možemo postaviti izraz za kut pomaka vektora napona duž voda, izraz (3). Taj kut jednak je kako za napon tako i za struju pa konačno dobijemo, da je taj kut jednak nekoj konstanti puta dužina voda, za koju taj kut promatramo. Dobivena konstanta ovisna je o pogonskoj frekvenciji i o induktivitetu i kapacitetu voda, a zove se fazna konstanta, jer o njoj ovisi fazni kut napona i struje u odnosu na napon i struju u početnoj tački promatranja, izraz (4).

MOMENTALNE VRIJEDNOSTI NAPONA I STRUJE KOD PRIRODNE SNAGE

Dosada smo promatrali efektivne vrijednosti napona i struje duž voda, a sada ćemo razmotriti, kako stoji s momentalnim vrijednostima napona i struje duž voda, u kojem se prenosi prirodna snaga. To je prikazano na slici 1o.1o.



Sl. 1o.1o

Na dnu slike nacrtan je vektorski prikaz napona i struje na pojedinim tačkama voda, kojemu dužina iznosi 6.ooo km. Vektorski prikaz nacrtan je za tačke voda na medjusobnoj udaljenosti od 75o km, tako da se za tu dužinu voda i vektor napona i vektor struje okrenu za kut od 45°. Kao što smo već vidjeli, napon i struja ostaju duž čitavog voda medjusobno u fazi. Uz vektorski prikaz napona i struje ucrtane su i dvije vremenske zrake, i to jedna horizontalno u desno, a druga pomaknuta za 45° u smjeru okretanja vremenske zrake. Te su dvije vremenske zrake označene sa t_1 i t_2.

a) Gore u slici prikazane su momentalne vrijednosti napona i struje za momenat $t = t_1$. Momentalnu vrijednost napona u pojedinoj tački voda dobijemo tako, da na tom mjestu ucrtamo dužinu, koja je jednaka dužini projekcije naponskog vektora na vremensku os. Vidimo, da smo za momentalne vrijednosti napona duž voda dobili krivulju, koja se duž voda mijenja po zakonu kozinusa. Analogni postupak za struju dovodi do rezultata, da se i momentalne vrijednosti struje mijenjaju duž voda po zakonu kozinusa. Budući da su napon i struja duž voda uvijek medjusobno u fazi, to je jasno da u odredjenom promatranom momentu imaju i napon i struja maksimalnu vrijednost na istoj tački voda, a takodjer poprimaju i vrijednost nula na istoj tački voda.

b) Na slici ispod toga nacrtane su momentalne vrijednosti napona i struje za momenat $t = t_2$. Opet dobijemo istu sliku kao i prije, samo što je čitava slika pomaknuta udešno za dužinu od 75o km.

Kad bismo nacrtali i treću sliku za još jedan kasniji momenat, dobili bismo istu raspodjelu momentalnih vrijednosti napona i struje ali još više pomaknutu udesno. Očito je, da će kroz vrijeme, koje odgovara jednom punom okretu vremenske zrake, slika momentalnih vrijednosti napona i struje prijeći put u dužini od 6.000 km. Prema tome vidimo, da se čitava pojava može opisati kao jedan sinusoidalni val, koji se kreće duž voda brzinom svjetlosti, jer u vremenu od 1/50 sek prijedje put od 6.000 km. Na taj način došli smo do takve fizikalne slike, koja nam kaže, da se energija kod prenosa prirodne snage prenosi duž voda u obliku vala, i to brzinom svjetlosti.

11. PUTNI VALOVI NA DUGIM VODOVIMA

PUTNI VAL U IDEALNOM VODU

a) Razmotrit ćemo najprije na jednom jednostavnom slučaju, kako dolazi do putnih valova. U tu svrhu uzet ćemo idealni vod, tj. vod koji nema gubitaka energije, odnosno kojemu su i otpor i odvod jednaki nuli. Taj vod ćemo na početku priključiti na stalni izvor istosmjernog napona, dok ćemo vod uzeti veoma dugačak, tako da nas zasada ne zanima, kakvo je stanje na kraju voda. Vidi sliku 11.1.

b) Kod idealnog voda preostaju od konstanata samo induktivitet i kapacitet, koji su jednolično raspodijeljeni duž voda. Vod dakle možemo nadomjestiti shemom spoja kao na slici, gdje se izmjenjuju uzdužne grane s induktivitetom i poprečne grane s kapacitetom. Rezultat našeg razmatranja bit će to tačniji, što pojedine grane odgovaraju kraćim odsjecima voda.

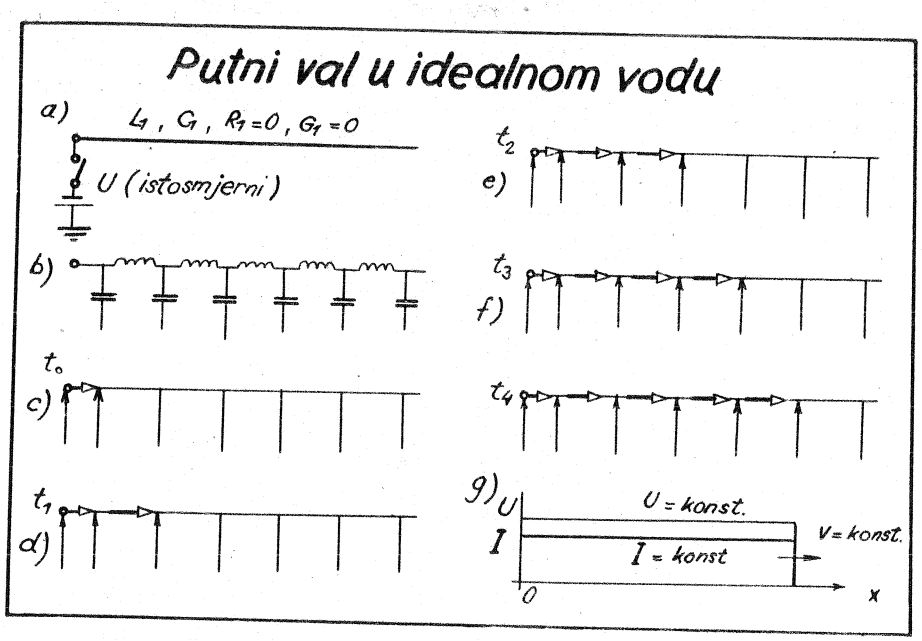
c) U nekom momentu "t_0" ukopčamo sklopku i time priključimo na početak voda napon "U". U našoj nadoknadnoj shemi spoja ništa ne stoji na putu izmedju izvora i prve poprečne grane, pa će se kapacitet prve poprečne grane momentalno nabiti do punog napona "U". Ali iza prve poprečne grane dolazi uzdužna grana s induktivitetom, koji se protivi porastu struje, tako da u prvom momentu u uzdužnoj grani neće teći nikakva struja. U momentu ukapčanja, tj. u momentu "t_0" postoji dakle napon samo na početku voda, dok je ostali dio voda bez napona i bez struje.

d) Sada, medjutim, prva uzdužna grana stoji pod punim naponom. Zbog induktiviteta u uzdužnoj grani struja će u njoj rasti postepeno, pa će trebati neko vrijeme, dok struja u uzdužnoj grani postigne punu vrijednost. Ta struja puni kapacitet druge poprečne grane, jer joj u tome ništa ne stoji na putu, dok naprotiv struja neće teći u drugu uzdužnu granu, jer se tu induktivitet protivi porastu struje. To će ići sve dotle, dok se kapacitet druge poprečne grane ne nabije do punog napona "U", u kojem momentu dodje do izjednačenja napona s obje strane induktiviteta. Taj momenat označili smo sa "t_1". Vidimo, da u tom momentu prvi odsjek voda stoji pod naponom "U" i da u njemu teče neka odredjena struja. Jakost struje u uzdužnoj grani odredjena je narinutim naponom, kapacitetom poprečne grane i vremenom, koje je bilo potrebno da se taj kapacitet nabije.

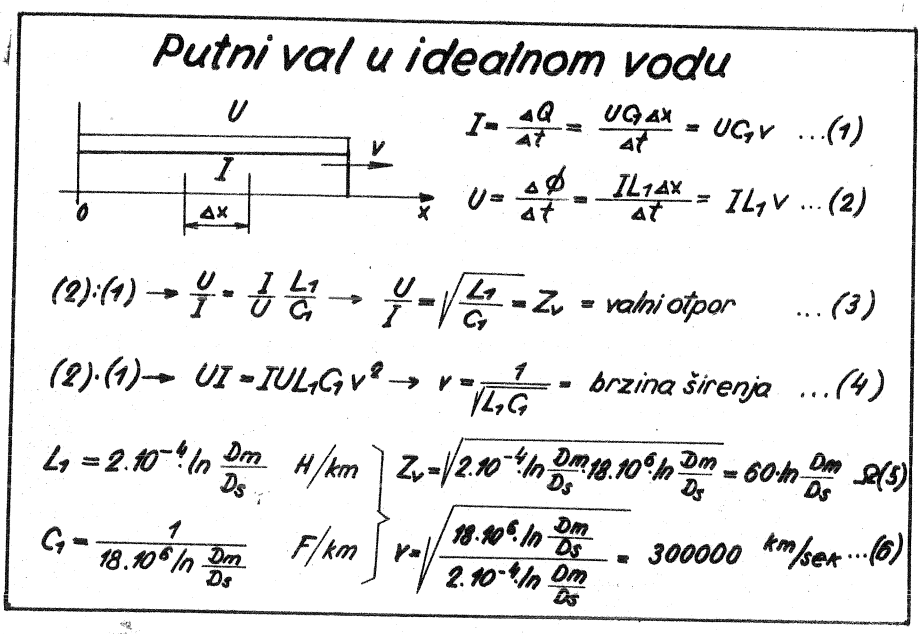
e) Sad se ista pojava ponavlja za drugi odsjek voda. Uslijed razlike napona na drugom induktivitetu probija se kroza nj struja, koja puni treći kapacitet. Ta struja teče i kroz prvi induktivitet. Za punjenje trećeg kapaciteta bit će potrebno isto vrijeme kao i za punjenje drugog kapaciteta, pa će dakle nakon jednakog razmaka vremena, tj. u momentu "t_2" drugi odsjek voda doći pod puni napon "U" i u njemu će teći ista struja, koja je u momentu "t_1" tekla u prvom odsjeku, a koja dakako i sada teče i u prvom i u drugom odsjeku voda.

f) Budući da smo pretpostavili jednolični vod, sa istim jediničnim induktivitetom i kapacitetom po čitavoj dužini, očito je da će opet nakon jednakog vremenskog razmaka, tj. u momentu "t_3" i napon i struja zahvatiti i treći odsjek, a u momentu "t_4" će napon i struja zahvatiti i četvrti odsjek voda i tako dalje. Vidimo da napon i struja prodiru postepeno u vod jednoličnom brzinom i da u istom momentu stignu do iste tačke voda.

g) Tu pojavu nazivamo putnim valovima, pa kažemo da se u vodu javljaju naponski i strujni putni val, koji duž voda putuju jednoličnom brzinom "v". U danom momentu će i napon i struja stići do iste tačke na vodu, pa ćemo duž čitavog tog dijela voda imati konstantni napon "U" i konstantnu struju "I". Na ostalom dijelu voda će i napon i struja biti jednaki nuli.



Sl. 11.1



Sl. 11.2

KARAKTERISTIKE PUTNOG VALA

Na slici 11.2 prikazan je vod s putnim valom, i to naponskim i strujnim putnim valom. Na istoj slici prikazan je i odsječak voda, koji je označen sa "Δx". Promatrat ćemo električne prilike na tom odsječku voda.

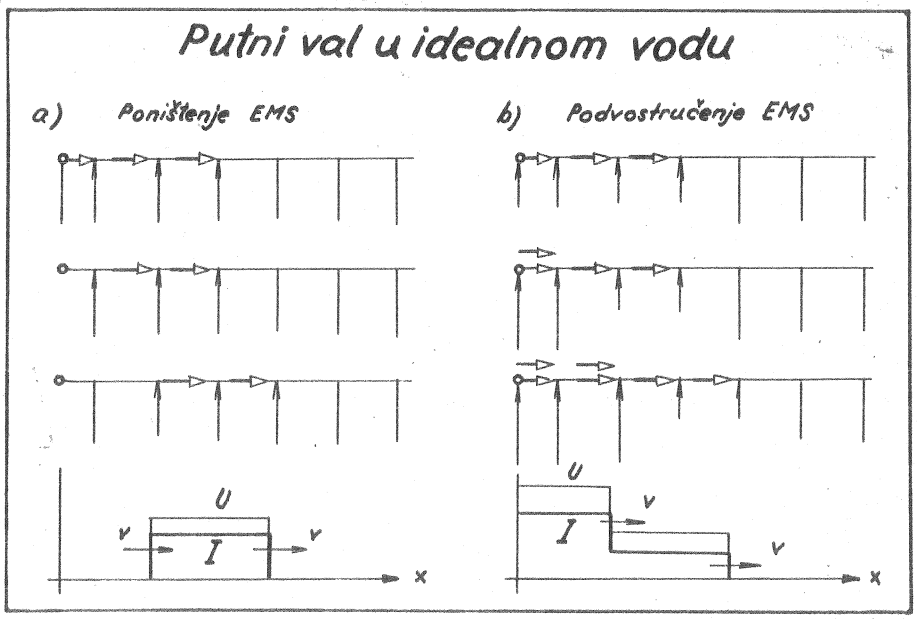
Struja u vodu jednaka je naboju promatranog odsječka voda podijeljenom s vremenom, koje je potrebno da putni val prodje taj odsječak voda. Ako naboj tog odsječka voda prikažemo naponom u vodu i kapacitetom tog odsječka, dobijemo konačno izraz za struju, koji je dan umnoškom napona, jediničnog kapaciteta i brzine širenja vala, izraz (1). Budući da je brzina širenja vala konstantna, to je naime možemo prikazati kao kvocijent konačne dužine voda i vremena, koje je potrebno da val prodje tu dužinu voda.

Za napon možemo pisati, da je jednak kvocijentu promjene magnetskog toka u promatranom odsječku voda i vremena, kroz koje putni val prodje taj odsječak voda. Kroz promatrano vrijeme se u promatranom odsječku mijenja magnetski tok od nule do pune vrijednosti, a puna vrijednost toka dana je umnoškom struje i induktiviteta tog odsječka. Konačno dobijemo izraz za napon, koji je dan umnoškom struje, jediničnog induktiviteta i brzine putnog vala, izraz (2).

Ako dobivena dva izraza za napon i struju medjusobno podijelimo, dobivamo uslov, da je odnos napona i struje konstantan, a tu konstantnu veličinu nazivamo valnim otporom, i ona je jednaka drugom korjenu iz kvocijenta jediničnog induktiviteta i jediničnog kapaciteta, izraz (3).

Ako ista dva izraza medjusobno pomnožimo dobijemo uslov za izračunavanje brzine širenja vala u vodu. Brzina širenja jednaka je recipročnoj vrijednosti od drugog korjena iz umnoška jediničnog induktiviteta i jediničnog kapaciteta, izraz (4).

Za idealni vod možemo pisati izraze za jedinični induktivitet i jedinični kapacitet kao što je prikazano na istoj slici. Pri tome veličina D_m prikazuje srednju geometrijsku udaljenost izmedju vodiča, a veličina D_s prikazuje vlastitu srednju geometrijsku udaljenost jedne faze. Kod idealnog voda potonja veličina jednaka je u formuli za induktivitet i u formuli za kapacitet, jer kod idealnog voda struja teče samo po površini vodiča uslijed djelovanja skinefekta.



Sl. 11.3

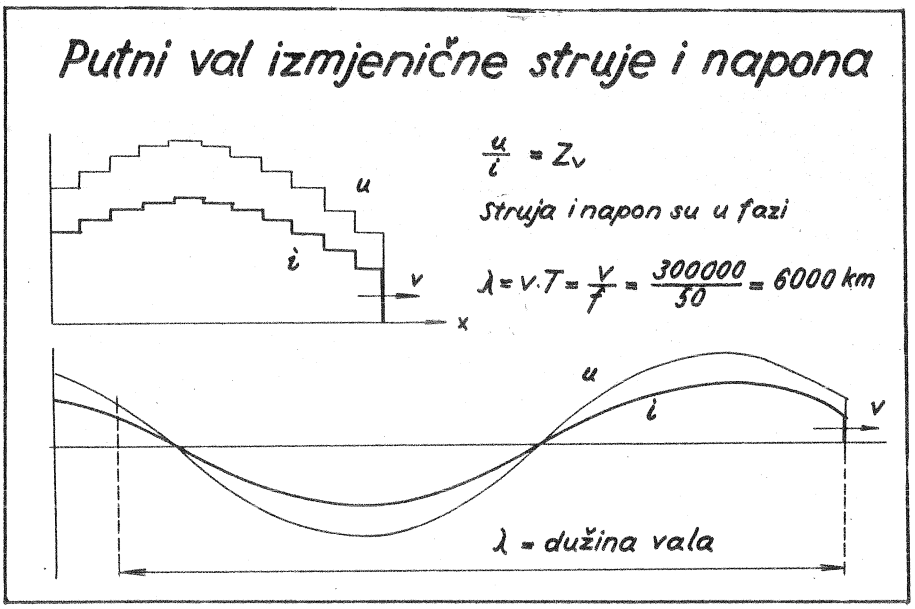
Ako te izraze za induktivitet i kapacitet uvrstimo u prije dobivene izraze za valni otpor i brzinu širenja vala, dobit ćemo izraze (5) i (6). Za valni otpor dobivamo izraz, u koji ulaze samo njegove geometrijske veličine. Za brzinu širenja dobivamo vrijednost od 300 000 km/sek, a to je jednako brzini svjetlosti u vakuumu.

PROMJENA AMPLITUDE VALA

Na slici 11.3 prikazane su prilike kod promjene narinute elektromotorne sile na početku voda.

a) Na lijevoj strani prikazane su prilike kod poništenja elektromotorne sile. Na najgornjoj slici prikazano je stanje u vodu, kad je val već dopro do izvjesne dubine voda. Pri tome je upotrijebljen isti način crtanja kao i kod prijašnjih slika. Ako u tom momentu isključimo elektromotornu silu na početku voda, onda se dogadja slijedeće. Na onom dijelu voda, dokle su doprli naponski i strujni val, imamo u vodu napon i struju. Struja ne može naglo prestati da teče i ona zbog tromosti induktiviteta želi da teče i dalje. Zbog toga se struja probija i u induktivitet slijedećeg odsječka voda, a potrebni naboj crpi se

iz prvog kapaciteta, koji se zbog toga prazni. Struja koja teče kroz slijedeći odsječak puni kapacitet toga odsječka. Nakon nekog vremena imamo dakle takvu situaciju, da su se u slijedećem odsječku uspostavili i napon i struja, dok je u prvom odsječku nestalo i napona i struje. Drugim riječima možemo to reći ovako: oblik raspodjele napona i struje u vodu kreće se i dalje duž voda brzinom svjetlosti, ali naponski i strujni val imaju odredjenu dužinu, danu početnim uslovima u momentu isključenja elektromotorne sile. Kad taj val prodje promatranom tačkom voda, iza toga opet se na vodu uspostavlja stanje bez napona i struje.



Sl. 11.4

b) Na desnoj strani iste slike prikazane su prilike za slučaj, kad se elektromotorna sila na početku voda podvostruči. I opet započinjemo razmatranje u momentu kad je putni val već dosegao izvjesnu dubinu voda, i u tom momentu podvostručimo elektromotornu silu. Onaj dio vala, koji je već prodro u vod, putovat će i dalje duž voda istom brzinom i s istim oblikom. Iza toga slijedit će novi val s dva puta većom amplitudom, kako za napon tako i za struju.

PUTNI VAL IZMJENIČNE STRUJE I NAPONA

Prijašnja razmatranja omogućuju nam da si stvorimo fizikalnu sliku i o električnim prilikama u vodu, kojemu je na početku narinut izmjenični napon sinusoidalnog oblika, slika 11.4. Sinusoidalni napon možemo zamisliti da je sastavljen od kratkotrajnih napona konstatne vrijednosti, tako da imamo stepeničasti oblik napona, koji ima približno sinusoidalni oblik. Iz onoga što je prije rečeno očito je, da će i oblik naponskog vala u vodu imati stepeničasti oblik približno sinusoidalnog izgleda. No ne samo da će naponski val imati takav oblik, nego će i svakoj stepenici naponskog vala odgovarati i jedna stepenica strujnog vala, a pri tome će odnos izmedju napona i struje biti konstantan i jednak valnom otporu.

Ako sada zamislimo, da stepenice napona postaju sve manje, dobit ćemo konačno čisti oblik sinusoidalnog napona. No istodobno će i strujni val preći u čisti sinusoidalni oblik. Iz dobivene fizikalne slike očito slijedi, da će odnos izmedju momentalnih vrijednosti napona i struje uvijek biti jednak valnom otporu. To znači, da su struja i napon medjusobno u fazi, a odnos efektivnih vrijednosti napona i struje jednak je valnom otporu.

U ovom slučaju možemo govoriti i o dužini vala, a to je udaljenost izmedju one dvije tačke voda, na kojima su momentalne vrijednosti napona odnosno struje medjusobno jednake. Kod izmjeničnog napona frekvencije 5o Hz dužina vala iznosi 6 ooo km. Na početku voda naime napon treba vrijeme od 1/5o sek da opet postigne istu momentalnu vrijednost, a kroz to vrijeme val s brzinom 3oo ooo km/sek predje dužinu od 6 ooo km.

PUTNI VAL U KABELU

Razmotrit ćemo prilike koje vrijede za putni val u kabelu. Razlika prema pojavi u nadzemnom vodu uzrokovana je time, što je induktivitet i kapacitet kabela drugačiji, nego što je kod nadzemnog voda.

Induktivitet i kapacitet ovise o geometrijskim dimenzijama i svojstvima materijala. Kod kabela je razmak izmedju vodiča mnogo manji, a osim toga oko vodiča nalazi se dielektrik, koji ima veću dielektričku konstantu nego uzduh oko vodiča nadzemnog voda.

Na veličinu induktiviteta utječe ovdje samo razlika u geometrijskim dimenzijama, jer se i kod kabela kao i kod nadzemnog voda radi o nemagnetskom materijalu. Prema prosječnim vrijednostima, koje imamo u praksi, možemo postaviti da je induktivitet kabela oko pet puta manji od induktiviteta nadzemnog voda, kao što je prikazano na slici 11.4, izraz (1).

Iz istih geometrijskih razloga bit će kapacitet kabela pet puta veći, ali zbog toga što se oko vodiča ne nalazi uzduh nego kruti dielektrik, bit će kapacitet još toliko puta veći, koliko iznosi relativna dielektričnost dielektrika. Ako uzmemo kao prosječno, da relativna dielektričnost kod kabela iznosi 4, onda će kapacitet kabela biti okruglo 2o puta veći od kapaciteta nadzemnog voda, izraz (2).

Iz ovih podataka slijedi odnos valnog otpora kabela prema valnom otporu nadzemnog voda, ako u formulu za valni otpor uvrstimo kod kabela 5 puta manji induktivitet i 2o puta veći kapacitet. Kao rezultat dobijemo, da je valni otpor kabela okruglo lo puta manji od valnog otpora nadzemnog voda, pa možemo uzeti da valni otpor kabela iznosi okruglo 4o oma, izraz (3).

Ako analogno postupimo za brzinu širenja vala u kabelu, te uvrstimo prijašnje odnose u formulu za brzinu, dobit ćemo da je brzina vala u kabelu okruglo dva puta manja od brzine vala u nadzemnom vodu, tj. da iznosi okruglo 15o.ooo km/sek, izraz (4).

REFLEKSIJA VALA NA OTVORENOM KRAJU VODA

Kod voda konačne dužine val će nakon nekog vremena stići do kraja. Najprije ćemo razmotriti, što se dogadja kad je vod na kraju otvoren. Električne prilike u takvom slučaju razmotrit ćemo na slici 11.6.

a) Na gornjem crtežu s lijeve strane prikazane su prilike u vodu, kad je val stigao do njegovog kraja. Duž čitavog voda imat ćemo konstantnu struju, a isto tako duž čitavog voda imat ćemo i konstantni napon. No kad strujni val stigne do kraja voda, struja ne može teći dalje, jer je vod na kraju otvoren.

Putni val u kabelu

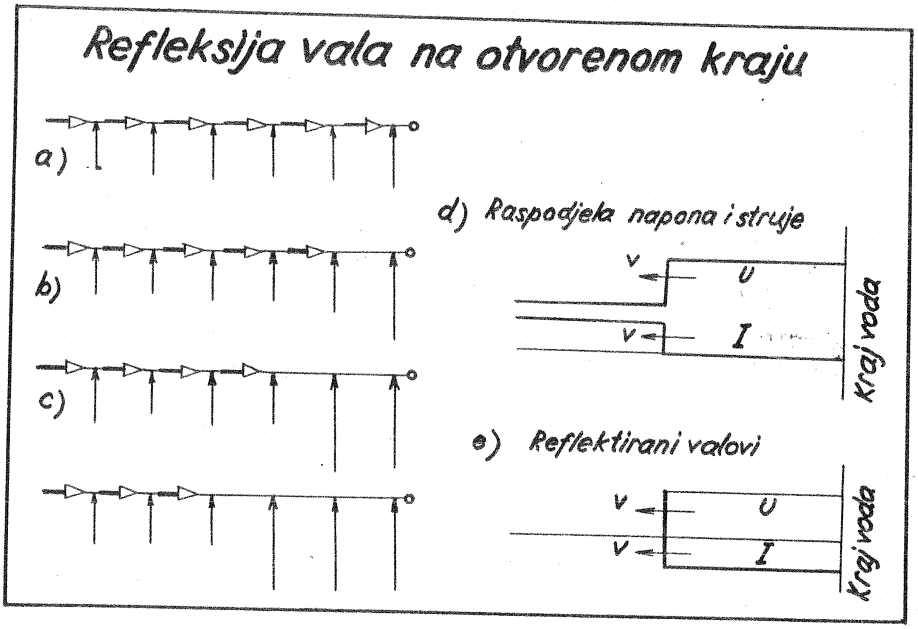
$$\frac{L_{kab}}{L_{n.v.}} \cong \frac{1}{5} \qquad \ldots (1)$$

$$\frac{C_{kab}}{C_{n.v.}} \cong 5 \cdot \varepsilon = 5.4 \qquad \ldots (2)$$

$$\frac{Z_{vkab}}{Z_{vn.v}} = \sqrt{\frac{1}{5.5.4}} = \frac{1}{10} \longrightarrow Z_{vkab} \cong 40\,\Omega \quad \ldots (3)$$

$$\frac{V_{kab}}{V_{n.v.}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{5}\cdot 5 \cdot 4}} = \frac{1}{2} \longrightarrow V_{kab} \cong 150000\ km/s \quad (4)$$

Sl. 11.5



Sl. 11.6

Struja u vodu se medjutim zbog tromosti induktiviteta želi održati. Zbog toga će struja nastaviti da teče u vodu na račun toga, što će se puniti posljednji kapacitet voda. To će ići dotle, dok se posljednji kapacitet voda ne nabije dvostrukim nabojem i dok prema tome ne postigne dvostruki napon. U promatranom vremenu kapacitet s povišenim naponom suprotstavlja se struji, tako da struja u posljednjem odsječku voda postepeno postaje sve manja i konačno padne na nulu. Nakon nekog vremena imat ćemo dakle takvo stanje, da će u posljednjem odsječku voda napon biti dvostruk a struja jednaka nuli.

b) Sad se za slijedeći odsječak (brojeći od kraja) ponavlja ista igra. Struja u preostalom dijelu voda želi naime i dalje da teče, pa se to događja na račun toga, što se kapacitet pretposljednjeg odsječka puni nabojem. To ide sve dotle dok se taj kapacitet ne napuni dvostrukim nabojem, i dok mu se prema tome napon ne popne na dvostruko. Kroz to vrijeme napon tog kapaciteta suprotstavljat će se struji, tako da će struja u pretposljednjem odsječku postajati sve manja i konačno pasti na nulu. Nakon tog vremena imat ćemo dakle i u pretposljednjem odsječku podvostručen napon, dok će struja biti jednaka nuli.

c) Cijela se igra ponavlja sad dalje u trećem odsječku od kraja, pa u četvrtom odsječku od kraja itd. Drugim riječima, vidimo da se sada stanje sa podvostručenim naponom širi u suprotnom smjeru tj. od kraja voda prema početku. Isto tako se stanje u pogledu struje, tj. promjena, koja se sastoji u tome, da je struja pala na nulu, takodjer širi od kraja voda prema početku.

d) Takve prilike prikazane su na gornjem crtežu s desne strane slike. Na prikazanom crtežu vidi se, da se podvostručenje napona i poništenje struje širi od kraja voda prema početku brzinom "v", dok na preostalom dijelu voda imamo naponske i strujne prilike kao i prije, nego što je val stigao do kraja voda.

e) Ukupne električne prilike na vodu nakon što je početak vala stigao do kraja voda, možemo prikazati pomoću reflektiranih valova. Stanje na vodu prikazujemo naime kao superpoziciju dvaju valova, i to jednog polaznog vala i jednog reflektiranog vala. Što se tiče napona, polazni val nosi sa sobom amplitudu "U", pa i reflektirani val mora imati istu amplitudu i isti predznak, kako bi zajedno s polaznim valom dao ukupno dvostruko veliki napon. Što se tiče struje, reflektirani val mora imati istu amplitudu ali protivni predznak, tako da zajedno s polaznim valom amplitude "I" kao rezultat dobijemo struju jednaku nuli.

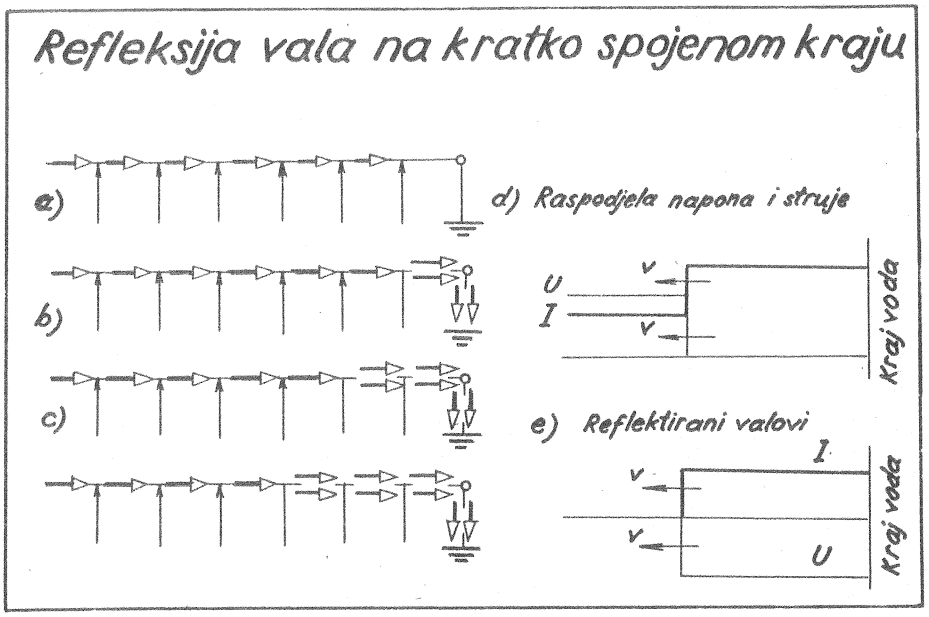
Iz gornjih razmatranja slijedi, da se naponski i strujni val na otvorenom kraju voda reflektiraju ovako: naponski val reflektira se s istom amplitudom i istim predznakom, a strujni val reflektira se s istom amplitudom ali sa suprotnim predznakom.

REFLEKSIJA VALA NA KRATKO SPOJENOM KRAJU VODA

Električne prilike na vodu, koji je na kraju kratko spojen, i to nakon što putni val stigne do tog kratko spojenog kraja, razmotrit ćemo na temelju slike 11.7.

a) Na crtežu s lijeve strane gore prikazane su najprije prilike u momentu, kad val stigne do kraja voda. U tom momentu duž čitavog voda imamo konstantnu struju, a isto tako duž čitavog voda imamo konstantni napon.

b) Kad val stigne do kraja voda, koji je kratko spojen, onda se više ništa ne suprotstavlja prodiranju struje. Struja u vodu zbog tromosti induktiviteta želi da i dalje teče, te se ona bez poteškoća zatvara kroz mjesto kratkog spoja. Osim toga imamo kapacitet krajnjeg odsječka voda pod punim naponom, koji je takodjer kratko spojen. Napon se zbog toga u tom kapacitetu ne može održati, i taj napon takodjer tjera neku struju kroz kratko spojeni kraj voda. Ukratko kroz kraj voda teče ukupno dvostruka struja i to djelomično na račun struje u vodu, a djelomično na račun toga što se kapacitet krajnjeg odsječka prazni sve, dok se sasvim ne isprazni i dok mu napon ne padne na nulu.



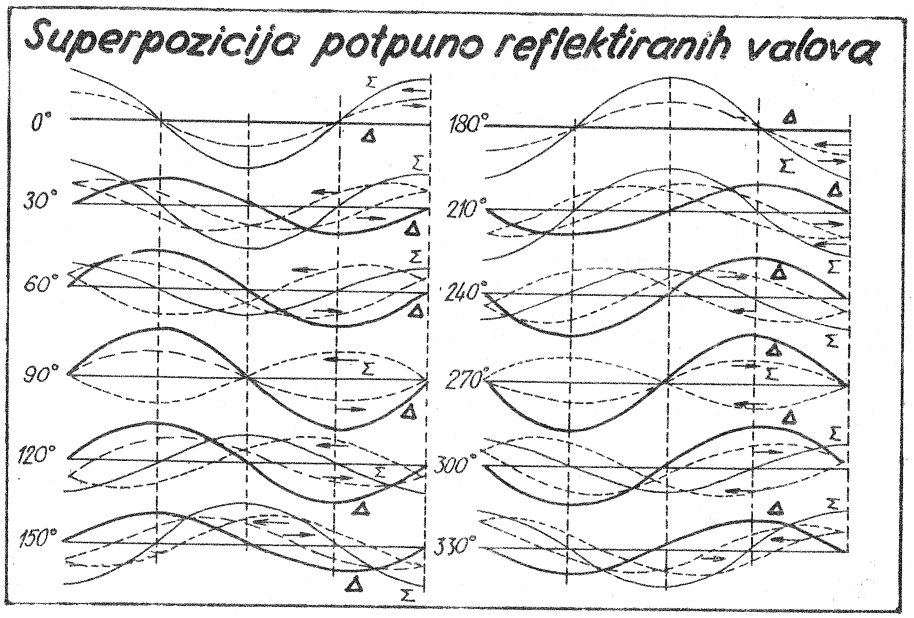
Sl. 11.7

c) Cijela se igra sad ponavlja dalje u slijedećem odsječku od kraja, pa u četvrtom od kraja itd. Drugim riječima, vidimo da se stanje s poništenjem napona i podvostručenjem struje širi u suprotnom smjeru, tj. od kraja voda prema njegovu početku.

d) Takve su prilike prikazane na desnom gornjem crtežu. Poništenje napona i podvostručenje struje širi se ulijevo brzinom "v", dok na preostalom dijelu voda imamo naponske i strujne prilike kao i prije, nego što je val stigao do kraja voda.

e) Ukupne električne prilike na vodu, nakon što je početak vala stigao do kraja voda, možemo i ovdje prikazati pomoću refleksije valova. Reflektirani val napona mora imati istu amplitudu ali protivni predznak, jer će tako superpozicija polaznog i reflektiranog vala dati poništenje napona. Reflektirani val struje naprotiv mora uz istu amplitudu imati isti predznak, jer tako superpozicijom dvaju strujnih valova dobijemo podvostručenje struje.

Iz gornjih razmatranja slijedi, da se naponski i strujni val na kratko spojenom kraju voda reflektiraju ovako: naponski val reflektira se s istom amplitudom ali protivnim predznakom, a strujni val reflektira se s istom amplitudom i istim predznakom.



Sl. 11.8

SUPERPOZICIJA PUTNIH VALOVA

Stanje u vodu možemo prikazati kao superpoziciju polaznog i povratnog putnog vala.

Za slučaj prijenosa prirodne snage nema refleksije na kraju voda pa nema ni reflektiranog povratnog vala, tj. njegov iznos je u svako doba i na svakom mjestu jednak nuli. To vrijedi i za naponski i za strujni povratni val. Na taj način naponsko i strujno stanje u vodu dano je kod prirodne snage prijenosa samo s polaznim valom. To se potpuno slaže s našim razmatranjima, koja smo proveli u vezi prijenosa prirodne snage.

Za slučaj otvorenog ili kratko spojenog kraja voda, naprotiv imamo puni iznos reflektiranog vala, radi se jedino o tome da li se val reflektira s istim ili suprotnim predznakom. Superpozicija polaznog i potpunog reflektiranog vala za razne vremenske momente prikazana je na slici 11.8. Polazni val ima oblik sinusoide, što odgovara narinutom naponu sinusoidalnog oblika. Promatrani dio voda iznosi dužinu jednog punog vala, tj. dužinu od 6ooo km uz pretpostavljenu frekvenciju od 5o Hz.

Polazni val prikazan je crtkanom linijom i označen strelicom udesno. U momentu definiranom kutem vremenske zrake od 0^o (prvi crtež s lijeve strane na slici), kad se taman maksimalna vrijednost polaznog vala nalazi na kraju voda, reflektirani val (označen strelicom ulijevo) se tačno poklapa s polaznim valom. (Reflektirani povratni val najlakše možemo konstruirati na taj način, da polazni val zamislimo produženim iza kraja voda, i onda taj dio vala prekrenemo oko kraja voda prema natrag). Na istom je crtežu prikazana suma (crtana tankom punom crtom i označena znakom Σ) i razlika (crtana debelom punom crtom i označena znakom Δ) polaznog i povratnog vala.

Na slijedećem crtežu prikazano je stanje u momentu definiranom kutem vremenske zrake od $3o^o$, tj. dvanaestim dijelom od punog kruga. Kroz to vrijeme putni valovi prijedju dvanaesti dio od dužine putnog vala, tj. dvanaesti dio od 6ooo km, što iznosi 5oo km. Polazni val je opet prikazan crtkanom linijom, a povratni val je prikazan tačkanom linijom (reflektirani val možemo konstruirati iz polaznog vala kao što je prije rečeno, ili ga dobiti pomicanjem povratnog vala iz gornje slike ulijevo za dužinu od 5oo km). I ovdje su konstruirane suma i razlika putnih valova i označene kao prije.

Na isti način je na daljnjim crtežima prikazano stanje na vodu u daljnjim momentima, tj. za kuteve vremenske zrake od $6o^o$, $9o^o$ itd. sve do $33o^o$, dok kutu od $36o^o$ odgovara isto stanje kao za 0^o, i onda se opet sve ponavlja.

Promatrajmo sada redom po crtežima krivulju, koja prikazuje sumu putnih valova. Vidimo da za 0^0 ta krivulja ima maksimalne amplitude, koje se u slijedećim crtežima smanjuju, dok kod 90^0 ne bude vrijednost duž čitavog voda jednaka nuli. Zatim amplitude opet rastu, ali sa suprotnim predznakom, i postižu maksimum u momentu, kojem odgovara kut od 180^0. Dalje opet amplitude padaju, sve do nule u momentu s kutem od 270^0, i onda opet rastu sa suprotnim predznakom da bi u momentu sa kutem od 360^0 postigle opet maksimum.

Kao što vidimo, kod sume putnih valova se vrijednost amplituda u pojedinim tačkama harmonički mijenja s vremenom. Pri tome čvorišta (tačke na kojima je amplituda uvijek jednaka nuli) ostaju nepomična, a isto tako i trbusi (gdje amplitude postižu najveće vrijednosti) ostaju nepomični. Dobili smo dakle stojni val.

Provedemo li isto takva razmatranja za diferenciju putnih valova, vidimo da smo opet dobili stojni val, samo što su sada čvorišta i trbusi zamijenili mjesta obzirom na sumu putnih valova.

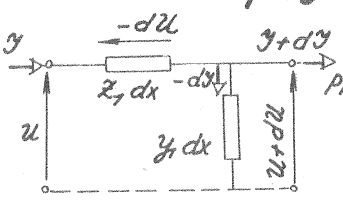
Suma putnih valova nam prikazuje superpoziciju polaznog vala s povratnim valom, koji se reflektirao s istim predznakom. To odgovara naponskim valovima kod otvorenog kraja voda (napon se podvostručio na kraju voda) odnosno strujnim valovima kod kratko spojenog kraja (struja se podvostručila na kraju voda). Diferencija putnih valova nam naprotiv prikazuje superpoziciju polaznog vala s povratnim valom, koji se reflektirao sa suprotnim predznakom. To odgovara naponskim valovima kod kratko spojenog kraja (napon pada na nulu na kraju voda) odnosno strujnim valovima kod otvorenog kraja voda (struja na kraju jednaka je nuli).

Kao što se vidi fizikalna slika, koju smo dobili superpozicijom polaznog i povratnog vala, potpuno se poklapa s onim, što smo i prije bili dobili kao rezultat razmatranja putem vektorskog računa u lancu četveropola.

12. PRIJENOSNE JEDNADŽBE VODA

Promatrajući prilike na vodu kao superpoziciju dvaju valova (polaznog i povratnog) , mogli bismo naći općenito izraze za prilike u vodu kod bilo kojeg pogonskog stanja, i to ako i ne zanemarimo gubitke, nego ako uzmemo i sve konstante voda u račun. Ipak nećemo poći tim putem, nego drugim, koji je uobičajen kod izvoda tzv. prijenosnih jednadžbi, koje nam odredjuju stanje u vodu.

Izvod prijenosnih jednadžbi



$Z_1 = R_1 + j\omega L_1$ $\quad Y_1 = G_1 + j\omega C_1$ ... (1)

Promjena napona $\quad -dU = I Z_1 dx$ $\quad \frac{dU}{dx} = -Z_1 I$

Promjena struje $\quad -dI = U Y_1 dx$ ... (2) $\quad \frac{dI}{dx} = -Y_1 U$ ... (3)

$$\frac{d^2U}{dx^2} = -Z_1 \frac{dI}{dx} = Z_1 Y_1 U = \gamma^2 U \qquad \frac{d^2I}{dx^2} = -Y_1 \frac{dU}{dx} = Z_1 Y_1 I = \gamma^2 I \quad ... (4)$$

$$Z_1 Y_1 = \gamma^2 \rightarrow \gamma = \sqrt{Z_1 Y_1} \quad ... (5)$$

$$U = A_1 \cdot \epsilon^{-\gamma x} + A_2 \epsilon^{+\gamma x} \qquad I = B_1 \epsilon^{-\gamma x} + B_2 \epsilon^{+\gamma x} \quad ... (6)$$

Dokaz: $\frac{dU}{dx} = A_1 \cdot \epsilon^{-\gamma x}(-\gamma) + A_2 \epsilon^{+\gamma x}\gamma$

$$\frac{d^2U}{dx^2} = A_1 \cdot \epsilon^{-\gamma x}(-\gamma)(-\gamma) + A_2 \epsilon^{+\gamma x} \cdot \gamma \cdot \gamma = \gamma^2 (A_1 \epsilon^{-\gamma x} + A_2 \epsilon^{+\gamma x}) = \gamma^2 U$$

Sl. 12.1

IZVOD PRIJENOSNIH JEDNADŽBI

Polazimo od elementarnog dijela voda, dužine "dx". Ako je jedinična uzdužna impedancija voda označena sa "Z_1", a jedinična poprečna admitancija voda sa "Y_1", i ako su definirane izrazima (1) na slici 12.1, onda možemo elementarni dio voda prikazati ekvivalentnom shemom kao na istoj slici. Pri tome nije važan medjusobni raspored uzdužne grane "$Z_1 dx$" i poprečne grane "$Y_1 dx$", jer se radi o elementarnom dijelu voda čija dužina teži k nuli.

Ako u tom elementarnom dijelu voda promjena napona iznosi "dU", a promjena struje "dI", možemo postaviti za te promjene osnovne izraze (2). Dijeleći te izraze sa "dx" dobivamo izraze (3), koji nam kažu, da se napon duž voda mijenja kao umnožak struje i jedinične impedancije, a struja duž voda se mijenja kao umnožak napona i jedinične admitancije.

Izraze (3) ćemo derivirati i srediti, pa dobijemo izraze (4), koji su gradjeni na isti način i za napon i za struju. Izrazi (4) nam kažu, da je druga derivacija napona po dužini voda proporcionalna naponu na tom mjestu voda, a analogno vrijedi i za struju. Pri tome smo uveli novu konstantu "γ", ovisnu o konstantama voda, a definiranu izrazom (5).

Rješenje dobivenih dviju diferencijalnih jednadžbi drugog reda dano je u izrazima (6), gdje su A_1, A_2, B_1 i B_2 konstante, koje moramo još odrediti. Rješenja za napon i struju su potpuno jednaka, razlikuju se jedino u vrijednostima spomenutih konstanata. Ispravnost rješenja dokazana je time što je rješenje za napon dva puta derivirano, pa je dobiven isti izraz koji je trebalo riješiti. Formalno isti dokaz vrijedi i za rješenje za struju.

Diskusija općeg rješenja

$U = A_1 \epsilon^{-\gamma x} + A_2 \epsilon^{+\gamma x} \qquad I = B_1 \epsilon^{-\gamma x} + B_2 \epsilon^{+\gamma x} \qquad \gamma = \sqrt{Z_1 Y_1} = \alpha + j\beta \ldots (1)$

$A_1' \epsilon^{-\gamma x} \rightarrow A_1' \epsilon^{j\omega t} \epsilon^{-\gamma x} = A_1' \epsilon^{j\omega t - (\alpha + j\beta)x} = A_1' \epsilon^{-\alpha x} \epsilon^{j(\omega t - \beta x)} = A_1^* (2)$

$A_2' \epsilon^{+\gamma x} \rightarrow A_2' \epsilon^{j\omega t} \epsilon^{+\gamma x} = A_2' \epsilon^{j\omega t} \epsilon^{(\alpha + j\beta)x} = A_2' \epsilon^{\alpha x} \epsilon^{j(\omega t + \beta x)} = A_2^* (3)$

$\epsilon^{-\alpha x}$ ... Ako x raste, A_1^* pada → α = konstanta gušenja

$\epsilon^{j(\omega t - \beta x)}$ ... x = konst. → A_1^* rotira sa t (ω = kružna frekvencija)

t = konst. → A_1^* rotira sa x → β = fazna konstanta

$\omega t - \beta x = konst. \rightarrow \frac{x}{t} = \frac{\omega}{\beta}$ = brzina → val prodire u desno

$\omega t + \beta x = konst.$ → val prodire u lijevo → γ = konst. prodiranja

Sl. 12.2

DISKUSIJA OPĆEG RJEŠENJA

Dobiveno opće rješenje za stanje na vodu ćemo sada prodiskutirati. Na slici 12.2 su u prvom retku ponovno ispisana dobivena općenita rješenja, kao i izraz za konstantu "γ". Konstanta "γ" je kompleksni broj, pa ga možemo pisati kao sumu realnog i imaginarnog člana, pri čemu uvodimo nove konstante "α" i "β", kao što je učinjeno u izrazu (1). Razmotrit ćemo rješenje za napon, jer analogno vrijedi i za struju, budući da su oba rješenja isto gradjena.

Prvi član rješenja za napon u stvari sadrži i vremenski operator $\epsilon^{j\omega t}$, koji se u običnom simboličkom računu redovito ne piše. Ali ako želimo promatrati promjenu stanja s vremenom, to su nam važne i momentalne vrijednosti napona, pa taj operator ne smijemo izostaviti. Kako se nadalje konstanta "A_1" odnosi na efektivnu vrijednost, to je kod promatranja momentalnih vrijednosti moramo množiti sa $\sqrt{2}$ da dobijemo tjemenu vrijednost, a tu ćemo radi jednostavnosti označiti sa "A_1'". Ako sad još konstantu "γ" raščlanimo kao u izrazu (1),

te onda sve sredimo, dobit ćemo izraz (2), koji nam vrijedi za prvi član rješenja za napon (a taj ćemo označiti sa A_1^+). Eksponenti u izrazima (2) i (3) sadrže neke konstante (α, β, ω) i neke promjenljivice (x, t). Promatrajmo utjecaj tih promjenljivica, i to najprije na prvi član rješenja A_1.

Ako "x" raste, to zbog faktora $\epsilon^{-\alpha x}$ pada iznos od A_1, i to po eksponencijalnoj funkciji. Na taj način se iznos prvog člana u rješenju prigušuje, pa i konstantu "α" nazivamo konstanta gušenja.

Nadalje ako držimo da bude x = konst., to zbog faktora $\epsilon^{j(\omega t - \beta x)}$ vidimo da član A_1 rotira s vremenom t, odnosno njegova momentalna vrijednost se mijenja harmonički s vremenom. Drugim riječima na svakoj tački voda se napon mijenja sinusoidalno. Za brzinu promjene mjerodavna je konstanta ω, tj. kružna frekvencija.

Ako pak u jednom momentu gledamo promjenu člana A_1 duž voda, onda moramo smatrati da je t = konst, a da se "x" mijenja. Zbog istog faktora vidimo da A_1 rotira sa "x", tj. duž voda se mijenja fazni kut. Za veličinu promjene faznog kuta mjerodavna je konstanta β, koju zbog toga nazivamo faznom konstantom.

Kao što vidimo (zanemarivši ovaj čas prigušenje) vrijednost člana A_1^+ mijenja se sinusoidalno s vremenom i s dužinom voda. Promatramo li uslov da vrijednost člana ne bude promijenjena, moramo postaviti da je $\omega t - \beta x = \text{konst.}$ Da taj uslov bude ispunjen mora se kod kontinuirane promjene vremena kontinuirano mijenjati i dužina "x". To znači da će konstantna vrijednost člana A_1 kontinuirano putovati duž voda, i to brzinom koja je definirana sa $\frac{x}{t} = \frac{\omega}{\beta}$. Budući da se vrijednost "t" stalno povećava, to se mora povećavati i vrijednost "x", tj. prvi član A_1 u rješenju za napon predstavlja val, koji putuje udesno.

Promatramo li na isti način drugi član A_2 vidimo da zbog razlike u predznacima dobivamo val, koji putuje ulijevo. Oba vala medjutim imaju i faktor koji dovodi do prigušenja. Ukupno rješenje naponskih prilika na vodu dano je dakle superpozicijom dvaju valova, jednog koji putuje udesno i drugog koji putuje ulijevo. Vidimo lijepo slaganje s fizikalnom slikom od prije.

Zbog toga što smo ovdje uzeli u račun djelatni otpor i odvod voda, to imamo i gubitke energije, pa se amplitude obaju valova ujedno i prigušuju. Način prodiranja vala kroz vod definiran je dakle ukupnom konstantom "γ", koju zbog toga nazivamo konstanta prodiranja.

Što se tiče brzine prodiranja valova, lako je uvidjeti da za idealni vod bez gubitaka (ako se postavi $Z_1 = j\omega L_1$ i $Y_1 = j\omega C_1$ te $\alpha = 0$) dobivamo kao brzinu već poznati izraz za brzinu svjetlosti u vakuumu.

PRVI OBLIK PRIJENOSNIH JEDNADŽBI

Iz prije dobivenog općeg rješenja izvest ćemo sada prvi oblik prijenosnih jednadžbi, time da iz graničnih uslova odredimo konstante u općem rješenju. To je načinjeno na slici 12,3, gdje su u prvom retku ponovljeni izrazi za opće rješenje napona i struje (1), a u drugom retku su dani izrazi za prvu derivaciju napona odnosno struje po vremenu (2), u smislu onoga, što je već prije bilo izvedeno.

Kao granične uslove postavit ćemo prilike na početku voda. Ako dužinu voda mjerimo od početka prema kraju, kao što je prikazano na skici, onda je početak voda definiran sa x = 0. Napon i struju na početku voda označit ćemo sa "U_1" odnosno "I_1". Ako to uvrstimo u izraze (1) i (2), dobit ćemo izraze (3) i (4). Nadalje uvodimo novu konstantu Z_c, koja je definirana izrazom (5), i koja opet ovisi o konstantama voda te je karakteristična za promatrani vod. Kako ta konstanta ima dimenziju impedancije, to je nazivamo karakterističnom impedancijom. Na taj način dobijemo dva sistema jednadžbi, iz kojih odmah slijede izrazi za tražene konstante, (6) do (9). Uvrstimo li te izraze u (1) dobijemo konačni oblik jednadžbi za napon i struju na bilo kojem mjestu voda (1o), u ovisnosti o naponu i struji na početku voda i o udaljenosti od početka voda. Ovaj oblik prijenosnih jednadžbi još uvijek jasno ukazuje na to, da se naponske i strujne prilike mogu dobiti superpozicijom dvaju valova u vodu.

OSTALI OBLICI PRIJENOSNIH JEDNADŽBI

Osim navedenog oblika prijenosnih jednadžbi upotrebljavaju se i daljnji oblici, koje ćemo izvesti na slici 12.4. Na toj slici je najprije ponovljen prvi oblik prijenosnih jednadžbi, izraz (1), a zatim su ti izrazi nešto

Prvi oblik prijenosnih jednadžbi

$$U = A_1 e^{-\gamma x} + A_2 e^{\gamma x} \qquad I = B_1 e^{-\gamma x} + B_2 e^{\gamma x} \quad \ldots(1)$$

$$\frac{dU}{dx} = -\gamma(A_1 e^{-\gamma x} - A_2 e^{\gamma x}) = -Z_1 I \qquad \frac{dI}{dx} = -\gamma(B_1 e^{-\gamma x} - B_2 e^{\gamma x}) = -Y_1 U \quad (2)$$

Granični uslovi: $x = 0$, $U = U_1$, $I = I_1$ — 1 ——x→ 2

$$U_1 = A_1 + A_2 \qquad I_1 = B_1 + B_2 \quad \ldots(3)$$

$$\gamma(A_1 - A_2) = Z_1 I_1 \qquad \gamma(B_1 - B_2) = Y_1 U_1 \quad \ldots(4)$$

$$\frac{Z_1}{\gamma} = \frac{Z_1}{\sqrt{Z_1 Y_1}} = \sqrt{\frac{Z_1}{Y_1}} = Z_c, \quad \frac{\gamma}{Y_1} = \frac{\sqrt{Z_1 Y_1}}{Y_1} = \sqrt{\frac{Z_1}{Y_1}} = Z_c = \text{karakt. imped.} (5)$$

$$\left.\begin{aligned} A_1 + A_2 &= U_1 \\ A_1 - A_2 &= Z_c I_1 \end{aligned}\right\} \quad A_1 = \frac{1}{2}(U_1 + Z_c I_1)(6), \; B_1 + B_2 = I_1 \quad \left.\begin{aligned} B_1 &= \frac{1}{2}\left(I_1 + \frac{U_1}{Z_c}\right)(8) \\ B_2 &= \frac{1}{2}\left(I_1 - \frac{U_1}{Z_c}\right)(9) \end{aligned}\right\}$$

$$A_2 = \frac{1}{2}(U_1 - Z_c I_1)(7), \; B_1 - B_2 = \frac{U_1}{Z_c}$$

$$U = \frac{1}{2}(U_1 + Z_c I_1)e^{-\gamma x} + \frac{1}{2}(U_1 - Z_c I_1)e^{\gamma x} \qquad I = \frac{1}{2}\left(I_1 + \frac{U_1}{Z_c}\right)e^{-\gamma x} + \frac{1}{2}\left(I_1 - \frac{U_1}{Z_c}\right)e^{\gamma x} \quad (10)$$

Sl. 12.3

Ostali oblici prijenosnih jednadžbi

$$U = \frac{1}{2}(U_1 + Z_c I_1)e^{-\gamma x} + \frac{1}{2}(U_1 - Z_c I_1)e^{\gamma x} \qquad I = \frac{1}{2}\left(I_1 + \frac{U_1}{Z_c}\right)e^{-\gamma x} + \frac{1}{2}\left(I_1 - \frac{U_1}{Z_c}\right)e^{\gamma x} \quad (1)$$

$$U = U_1 \frac{1}{2}(e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}) - Z_c I_1 \frac{1}{2}(e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}) \qquad I = I_1 \frac{1}{2}(e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}) - \frac{U_1}{Z_c}\frac{1}{2}(e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}) \quad (2)$$

$$U = U_1 \operatorname{ch}\gamma x - Z_c I_1 \operatorname{sh}\gamma x \qquad I = I_1 \operatorname{ch}\gamma x - \frac{U_1}{Z_c}\operatorname{sh}\gamma x \quad \ldots(3)$$

1 ——x→ 2 : U_1 I_1 x $\operatorname{ch}\gamma x$ $\operatorname{sh}\gamma x$

1 ←x—— 2 : U_2 I_2 $(-x)$ $\operatorname{ch}(-\gamma x) = \operatorname{ch}\gamma x$ $\operatorname{sh}(-\gamma x) = -\operatorname{sh}\gamma x$

$$U = U_2 \operatorname{ch}\gamma x + Z_c I_2 \operatorname{sh}\gamma x \qquad I = I_2 \operatorname{ch}\gamma x + \frac{U_2}{Z_c}\operatorname{sh}\gamma x \quad \ldots(4)$$

$$x = \ell, \; \gamma x = \gamma\ell = \sqrt{Z_1 Y_1}\,\ell = \sqrt{Z_1\ell \cdot Y_1\ell} = \sqrt{Z Y} = \theta, \; Z = Z_1\ell, \; Y = Y_1\ell \quad (5)$$

$$Z_c = \frac{Z_1}{\gamma} = \frac{Z_1\ell}{\gamma\ell} = \frac{Z}{\theta} \qquad \frac{1}{Z_c} = \frac{Y_1}{\gamma} = \frac{Y_1\ell}{\gamma\ell} = \frac{Y}{\theta}$$

$$U_1 = U_2 \operatorname{ch}\theta + I_2 Z \frac{\operatorname{sh}\theta}{\theta} \qquad I_1 = I_2 \operatorname{ch}\theta + U_2 Y \frac{\operatorname{sh}\theta}{\theta} \quad \ldots(6)$$

Sl. 12.4

preuređeni, tako da su članovi sa "U_1", odnosno sa "I_1" skupljeni zajedno, izrazi (2). Vidimo da faktori uz "U_1", "$Z_c I_1$", "I_1" odnosno "U_1/Z_c" predstavljaju poznate izraze za hiperbolni sinus odnosno kosinus, pa na taj način možemo prijenosne jednadžbe jednostavno i pisati, izraz (3).

Želimo li izvesti prijenosne jednadžbe za zadane prilike na kraju voda mjereći dužinu od kraja voda prema početku, nije potrebno da ponovimo izvod postavljajući granične uslove za kraj voda. Kao što je prikazano na skici, možemo "U_1" i "I_1" bez daljnjega zamijeniti sa "U_2" i "I_2", ako "x" zamijenimo sa "-x". Odatle slijedi da pred izrazom sa "ch x" ne moramo mijenjati predznak, dočim ga pred izrazom sa "sh x" moramo promijeniti. Tako dobijemo odmah traženi oblik prijenosnih jednadžbi, izraz (4).

Ako u dobivene izraze prijenosnih jednadžbi umjesto bilo koje dužine "x" uvrstimo dužinu voda "ℓ", dobit ćemo napon i struju na jednom kraju voda u ovisnosti o naponu i struji na drugom kraju voda. Tako dobiveni izrazi se mogu još preinačiti, kao što je na slici učinjeno s izrazima (4). Tu smo uveli izraze (5) za ukupnu impedanciju "Z" i ukupnu admitanciju "Y", te veličinu "Θ". Konačno dobijemo izraze (6), u kojima se nalaze faktori s hiperbolnim funkcijama. Oba ta faktora su to bliža jedinici, što je vod kraći, i kod sasvim kratkog voda vidimo da se napon na početku dobiva tako, da naponu na kraju dodamo pad napona u impedanciji, a struju na početku voda dobivamo tako da struji na kraju dodamo gubitak struje u admitanciji. Kod voda konačne dužine, medjutim, u svakom članu se pojavljuje faktor s hiperbolnom funkcijom, i taj faktor je očito kompleksna veličina.

DIJAGRAMI ZA OČITAVANJE HIPERBOLNIH FAKTORA

Radi lakšeg postavljanja prijenosnih jednadžbi izradio je Woodruff dijagrame za očitavanje vrijednosti spomenutih faktora s hiperbolnim funkcijama. Na slici 12.5 prikazana je skica dijagrama za očitavanje faktora ch Θ. Postupak je slijedeći: najprije se izračuna izraz $ZY = \Theta^2$, pa se prema iznosu i kutu te kompleksne veličine u odgovarajućem koordinatnom sistemu nadje pripadna tačka. Ta ista tačka u drugom koordinatnom sistemu (koji odgovara kompleksnoj veličini ch Θ) definira iznos i kut od ch Θ.

Na slici 12.6 je nadalje dan dijagram za očitavanje vrijednosti iznosa i kuta od $\frac{\text{sh}\,\Theta}{\Theta}$. Postupak je potpuno isti kao i za prijašnji dijagram.

Za konkretnu upotrebu mogu se koristiti dijagrami koji su priloženi knjizi Woodruff, Principi prijenosa električne energije, Zagreb, Školska knjiga 1954.

PRIMJER PRORAČUNA PO DIJAGRAMU WOODRUFFA

Na slici 12.7 dan je primjer za postavljanje prijenosnih jednadžbi uz korištenje dijagrama po Woodruffu. U prvom retku su zadani podaci voda. Zatim su izračunate ukupna impedancija i ukupna admitancija voda i konačno njihov umnožak. S tom veličinom ulazimo u dijagrame, te očitavamo vrijednost hiperbolnih faktora. Zatim računamo umnožak faktora $\frac{\text{sh}\,\Theta}{\Theta}$ sa "Z" odnosno sa "Y". Time imamo izračunate sve potrebne veličine i možemo napisati prijenosne jednadžbe.

PRIMJER PRORAČUNA SA HIPERBOLNIM FUNKCIJAMA

Dijagrami po Woodruffu crtani su za vodove do neke odredjene dužine. Ako se radi o dužem vodu ili nam dijagrami ne stoje na raspolaganju, možemo hiperbolne funkcije izračunati. Primjer za to dan je na slici 12.8, a radit ćemo prema izrazima (4) sa slike 12.4.

U prvom retku dani su podaci voda s dužinom $\ell = 600$ km. Zatim je izračunata konstanta "γ" i njen umnožak s dužinom. Taj kompleksni izraz možemo pisati kao sumu realnog i imaginarnog člana. Dalje možemo koristiti izraze (1) i (2) za raščlanjivanje hiperbolnih funkcija s kompleksnim argumentom. Iz tablica očitamo vrijednosti pojedinih hiperbolnih odnosno trigonometrijskih funkcija (eventualno možemo te vrijednosti izračunati iz poznatih izraza za razvijanje tih funkcija u red).

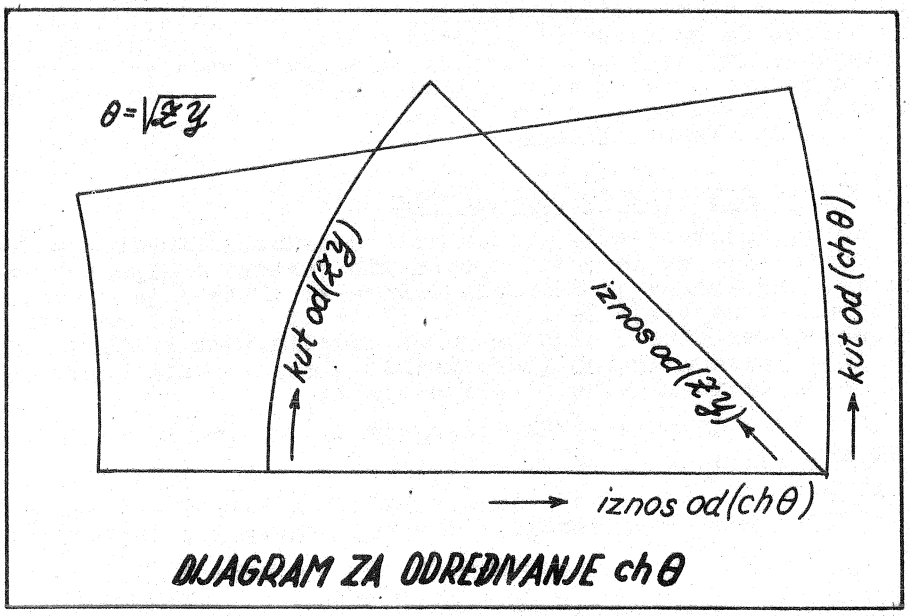
Proračun je nastavljen na slici 12.9, gdje su prema izrazima (1) i (2) sa slike 12.8 izračunate vrijednosti "sh $\gamma\ell$" odnosno "ch $\gamma\ell$". Nadalje je izračunata vrijednost za "Z_c", te umnožak odnosno kvocijent od "sh $\gamma\ell$" i "Z_c". Time su izračunate sve potrebne veličine pa možemo ispisati prijenosne jednadžbe.

PRIMJER PRORAČUNA S PRIJENOSNIM JEDNADŽBAMA

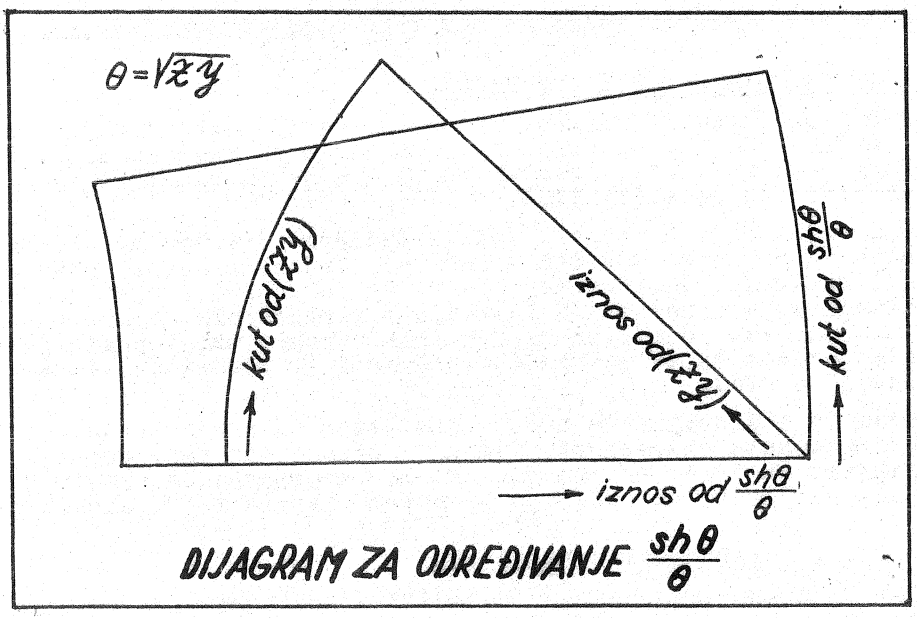
Primjer upotrebe prijenosnih jednadžbi za odredjivanje prilika u vodu prikazan je na slici 12.1o. Uzet ćemo prijenosne jednadžbe izračunate u prijašnjem primjeru (slika 12.9). Te su prijenosne jednadžbe ponovno napisane u prvom retku na slici 12.1o. U drugom retku su zadane prilike na kraju voda. Bez obzira kako su te prilike zadane, potrebno je izračunati fazni napon, i struju na kraju voda. Zadani napon redovito polažemo u realnu referentnu os, tako da je kut napona "U_2" jednak nuli.

Ako u prijenosne jednadžbe uvrstimo dobivene vrijednosti za napon i struju na kraju voda, dobit ćemo vrijednosti za napon i struju na početku voda.

Odatle možemo odrediti fazni kut izmedju napona i struje na početku voda, pa i faktor snage na početku voda, kao što se vidi na istoj slici. Iz dobivenih podataka možemo dakako izračunati i druge eventualno potrebne veličine (snagu, kut medju vektorima napona itd.).



Sl. 12.5



Sl. 12.6

Primjer proračuna po diagramu Woodruffa

Zadano: $R_1 = 0{,}231\ \Omega/km$, $X_1 = 0{,}4\ \Omega/km$, $B_1 = 3{,}0 \cdot 10^{-6}\ S/km$, $G_1 = 0$, $\ell = 400\ km$

$z = (0{,}231 + j0{,}4)400 = 0{,}46 \angle 60° \cdot 400 = 184 \angle 60°\ \Omega$

$y = (0 + j3{,}0 \cdot 10^{-6})400 = 3{,}0 \cdot 10^{-6} 400 \angle 90° = 1{,}20 \cdot 10^{-3} \angle 90°\ S$

$zy = 184 \angle 60° \cdot 1{,}20 \cdot 10^{-3} \angle 90° = 0{,}221 \angle 150°$

Iz diagrama: $ch\,\theta = 0{,}907 \angle 3{,}4°$, $\frac{sh\,\theta}{\theta} = 0{,}9685 \angle 1{,}07°$

$z \frac{sh\,\theta}{\theta} = 184 \angle 60° \cdot 0{,}9685 \angle 1{,}07° = 178{,}3 \angle 61{,}07°\ \Omega$

$y \frac{sh\,\theta}{\theta} = 1{,}20 \cdot 10^{-3} \angle 90° \cdot 0{,}9685 \angle 1{,}07° = 1{,}163 \cdot 10^{-3} \angle 91{,}07°\ S$

$U_1 = U_2 \cdot 0{,}907 \angle 3{,}4° + J_2 \cdot 178{,}3 \angle 61{,}07°$

$J_1 = J_2 \cdot 0{,}907 \angle 3{,}4° + U_2 \cdot 0{,}001163 \angle 91{,}07°$

Sl. 12.7

Primjer proračuna sa hiperbolnim funkcijama

Zadano: $Z_1 = 0{,}46 \angle 60°\ \Omega/km$, $Y_1 = 3{,}0 \cdot 10^{-6} \angle 90°\ S/km$, $\ell = 600\ km$

$\delta = \sqrt{0{,}46 \angle 60° \cdot 3 \cdot 10^{-6} \angle 90°} = \sqrt{138 \cdot 10^{-6} \angle 150°} = 1{,}176 \cdot 10^{-3} \angle 75°$

$\delta\ell = 1{,}176 \cdot 10^{-3} \angle 75° \cdot 600 = 0{,}706 \angle 75° = 0{,}1828 + j0{,}6822 = a + jb$

$ch(a+jb) = ch\,a \cdot \cos b + j\,sh\,a \cdot \sin b$ ... (1)

$sh(a+jb) = sh\,a \cdot \cos b + j\,ch\,a \cdot \sin b$ ... (2)

$sh\,a = sh\ 0{,}1828 = 0{,}1838$

$ch\,a = ch\ 0{,}1828 = 1{,}0167$

$\sin b = \sin 0{,}6822 = 0{,}6305$

$\cos b = \cos 0{,}6822 = 0{,}7762$

Sl. 12.8

Primjer proračuna sa hiperbolnim funkcijama (nastavak)

$sh\gamma\ell = 0{,}1838 \cdot 0{,}7762 + j\,1{,}0167 \cdot 0{,}6305 =$

$= 0{,}1462 + j\,0{,}642 = 0{,}657 \angle 77{,}5°$

$ch\gamma\ell = 1{,}0167 \cdot 0{,}7762 + j\,0{,}1838 \cdot 0{,}6305 =$

$= 0{,}790 + j\,0{,}1158 = 0{,}80 \angle 8{,}2°$

$Z_c = \sqrt{\frac{0{,}46 \angle 60°}{3 \cdot 10^{-6} \angle 90°}} = \sqrt{0{,}1533 \cdot 10^{-6} \angle -30°} = 392 \angle -15° \ \Omega$

$Z_c \cdot sh\gamma\ell = 392 \angle -15° \cdot 0{,}657 \angle 77{,}5° = 257{,}8 \angle 62{,}5° \ \Omega$

$\frac{sh\gamma\ell}{Z_c} = \frac{0{,}657 \angle 77{,}5°}{392 \angle -15°} = 0{,}00167 \angle 92{,}5° \ S$

$U_1 = U_2 \cdot 0{,}80 \angle 8{,}2° + J_2 \cdot 257{,}8 \angle 62{,}5° \ V.$

$J_1 = J_2 \cdot 0{,}80 \angle 8{,}2° + U_2 \cdot 0{,}00167 \angle 92{,}5° \ A.$

Sl. 12.9

Primjer proračuna sa prijenosnim jednadžbama

$U_1 = U_2 \cdot 0{,}80 \angle 8{,}2° + J_2 \cdot 257{,}8 \angle 62{,}5°$ $\quad J_1 = J_2 \cdot 0{,}80 \angle 8{,}2° + U_2 \cdot 0{,}00167 \angle 92{,}5°$

$U_2 = 63{,}5\ kV,\ P_2 = 40\ MW,\ \cos\varphi_2 = 0{,}8 \rightarrow J_2 = 262{,}5 \angle -36{,}8°\ A$

$U_1 = 63500 \cdot 0{,}80 \angle 8{,}2° + 262{,}5 \angle -36{,}8° \cdot 257{,}8 \angle 62{,}5° =$

$= 50800 \angle 8{,}2° + 67700 \angle 25{,}7° = (50200 + j\,7200) + (61100 + j\,29300) =$

$= 111300 + j\,36500 = 117000 \angle 18{,}2°\ V$

$J_1 = 262{,}5 \angle -36{,}8° \cdot 0{,}80 \angle 8{,}2° + 63500 \cdot 0{,}00167 \angle 92{,}5°$

$= 210 \angle -28{,}6° + 106 \angle 92{,}5° = (184 - j\,101) + (-4{,}6 + j\,106) =$

$= 179{,}4 + j\,5 = 179{,}5 \angle 1{,}7°\ A$

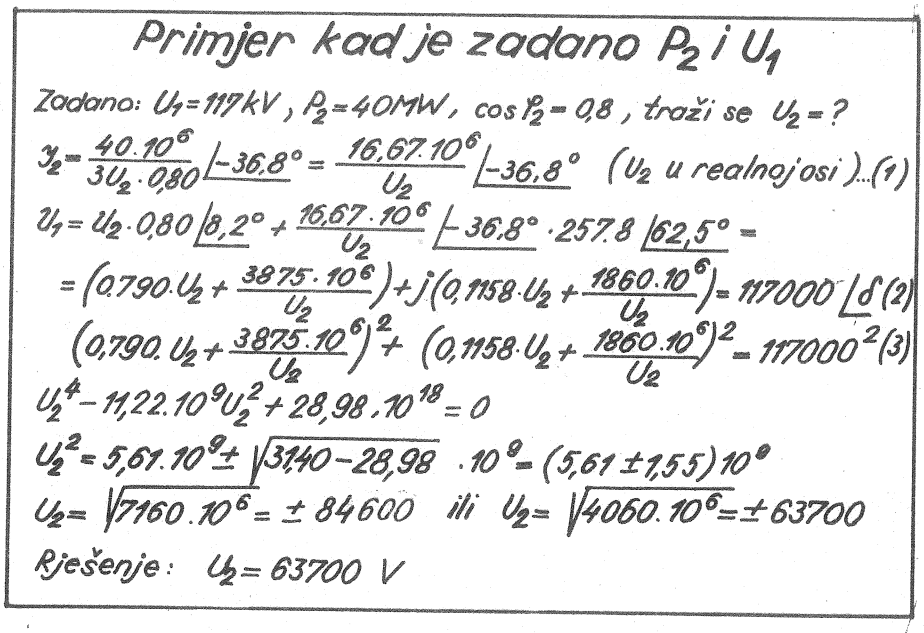
$\varphi_1 = 18{,}2 - 1{,}7 = 16{,}5° \qquad \cos\varphi_1 = 0{,}96$

Sl. 12.1o

PRIMJER KAD SU ZADANE PRILIKE NA OBA KRAJA VODA

Ima slučajeva, kad nisu zadane prilike samo na jednom kraju voda, nego djelomično na jednom a djelomično na drugom kraju. Kako se takav zadatak može riješiti pomoću prijenosnih jednadžbi, pokazano je na slici 12.11.

Uzmimo, da je zadan napon na početku voda i snaga na kraju voda, npr. putem djelatne snage i faktora snage. Brojčani podaci navedeni su u prvom retku na slici. Traži se napon na kraju voda.



Sl. 12.11

Prvo postavimo izraz za struju na kraju voda, u koji izraz ulazi nepoznati iznos napona na kraju voda "U_2", koji napon položimo u realnu os, izraz (1). Zatim postavimo prijenosnu jednadžbu za primarni napon i sredimo tako da skupimo zajedno realne odnosno imaginarne članove, pa to izjednačimo s primarnim naponom kojemu znamo iznos, ali ne znamo koliki mu je fazni kut "δ". Tako dobijemo izraz (2) na slici 12.11.

U tom izrazu nalaze se dvije nepoznanice, ali znamo da iznosi pojedinih članova predstavljaju stranice pravokutnog trokuta, pa možemo postaviti izraz (3) prema Pitagorinom poučku. Time smo dobili izraz sa samo jednom nepoznanicom "U_2", pa to možemo lako riješiti. Dobijemo doduše 4 rješenja, ali samo jedno od njih redovito zadovoljava. Sada je i ostale eventualno tražene veličine lako izračunati.

PRIJENOSNE JEDNADŽBE ZA VOD BEZ GUBITAKA

Ako u izvedenim prijenosnim jednadžbama postavimo $R_1 = 0$ i $G_1 = 0$, dobit ćemo prijenosne jednadžbe za idealni vod bez gubitaka, što je učinjeno na slici 12.12. Tu je u prvom redu izračunata konstanta prodiranja "γ", koja se svodi na sam imaginarni član "$j\beta$", izraz (1), budući da je realni član $\alpha = 0$. To već znači da nema prigušenja ni kod napona ni kod struje, nego imamo samo rotaciju njihovih vektora duž voda.

Nadalje je uz korištenje poznatoga izraza za brzinu svjetlosti u vakuumu izveden izraz (2) za faznu konstantu β, iz čega se vidi da za frekvenciju $f = 50$ Hz dobijemo rotaciju vektora za puni krug (2π odnosno 360^0) ako se duž voda pomaknemo za 6.000 km.

U izrazu (3) izračunata je karakteristična impedancija za idealni vod, pa se vidi da se ona svodi na izraz valnog otpora, s time da predstavlja čisti djelatni otpor. Ipak i ovdje treba razlikovati pojam karakteristične impedancije, koja nam služi za simboličko računanje sa sinusoidalnim veličinama, od valnog otpora, koji je svojstvo samog voda bez obzira radi li se o sinusoidalnim naponima i strujama ove ili one frekvencije, ili se uopće ne radi o sinusoidalnim veličinama.

Prijenosne jednadžbe za vod bez gubitaka

$$\gamma = \sqrt{Z_1 Y_1} = \sqrt{(R_1 + j\omega L_1)(G_1 + j\omega C_1)} = j\omega\sqrt{L_1 C_1} = j\beta \qquad \ldots (1)$$

$$\beta = \omega\sqrt{L_1 C_1} = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi \cdot 50}{300000} = \frac{2\pi}{6000} \qquad \ldots (2)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z_1}{Y_1}} = \sqrt{\frac{R_1 + j\omega L_1}{G_1 + j\omega C_1}} = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = Z_v \;, \quad \varphi = 0 \qquad \ldots (3)$$

$$\left.\begin{aligned} U_1 &= U_2 \operatorname{ch}\gamma x + Z_c Y_2 \operatorname{sh}\gamma x = U_2 \operatorname{ch} j\beta x + Z_v \cdot Y_2 \operatorname{sh} j\beta x \\ Y_1 &= Y_2 \operatorname{ch}\gamma x + \frac{U_2}{Z_c} \operatorname{sh}\gamma x = Y_2 \operatorname{ch} j\beta x + \frac{U_2}{Z_v} \operatorname{sh} j\beta x \end{aligned}\right\} \ldots (4)$$

$$\operatorname{ch} j\beta x = \cos\beta x \;, \quad \operatorname{sh} j\beta x = j \sin\beta x \qquad \ldots (5)$$

$$\left.\begin{aligned} U_1 &= U_2 \cos\beta x + j Z_v \cdot Y_2 \sin\beta x \\ Y_1 &= Y_2 \cos\beta x + j \frac{U_2}{Z_v} \sin\beta x \end{aligned}\right\} \ldots (6)$$

Sl. 12.12

Dalje su postavljene prijenosne jednadžbe s tako izvedenim veličinama, izrazi (4). Ako sad koristimo izraze (5) za hiperbolne funkcije imaginarnog argumenta, onda nam hiperbolne funkcije prelaze u trigonometrijske. Konačno dobijemo oblik prijenosnih jednadžbi za idealni vod bez gubitaka kako se vidi u izrazima (6).

POGONSKE PRILIKE U IDEALNOM VODU

Izvedene prijenosne jednadžbe za idealni vod možemo iskoristiti za analizu pogonskih prilika, što smo prije bili učinili na konkretnim primjerima putem lanca četveropola. Na slici 12.13 su u prvom retku ponovno napisane prijenosne jednadžbe za vod bez gubitaka, a dalje su analizirana tri karakteristična pogonska stanja.

a) Prazni hod definiran je time, što je struja na kraju voda jednaka nuli. Zbog toga u prijenosnim jednadžbama otpada član sa strujom "I_2". Vidi se, da se napon duž voda mijenja po zakonu kozinusa i ostaje uvijek sam sa sobom u fazi. Struja se pak mijenja po zakonu sinusa i ostaje uvijek samo sa sobom u fazi, ali je prema naponu uvijek okrenuta za 90°.

b) Kratki spoj definiran je time, što je napon na kraju voda jednak nuli. Sada u prijenosnim jednadžbama otpadaju članovi s naponom "U_2". Vidimo, da se napon mijenja po zakonu sinusa a struja po zakonu kozinusa, da i napon i struja ostaju duž voda sami sa sobom u fazi, ali da medjusobno stoje uvijek pod kutem od 90°.

c) Prijenos prirodne snage definiran je time, što je odnos napona i struje jednak valnom otporu. Time faktori u oba člana svake prijenosne jednadžbe postaju medjusobno jednaki, pa ih možemo izvaditi kao zajednički faktor, a preostali izraz možemo pisati kao eksponencijalnu funkciju s imaginarnim eksponentom što u stvari predstavlja rotaciju vektora. Iz dobivenih izraza slijedi, da i napon i struja ostaju u svojoj efektivnoj vrijednosti nepromijenjeni duž voda, da su napon i struja medjusobno uvijek u fazi, i da zajedno rotiraju kako se pomičemo duž voda.

Kao što vidimo, dolazimo naravno do istih rezultata do kojih smo bili došli i prijašnjom analizom.

KARAKTERISTIKE PRIJENOSA PRIRODNE SNAGE

Karakteristike prijenosa prirodne snage rezimirane su na slici 12.14 gdje su osim činjenica navedene i posljedice.

1) Napon je kod prijenosa prirodne snage konstantan duž čitavog voda. Na taj način je izolacija voda u čitavoj dužini jednako opterećena, a to znači da

Pogonske prilike u idealnom vodu

$$U_1 = U_2 \cos\beta x + jZ_v I_2 \sin\beta x \qquad I_1 = I_2 \cos\beta x + j\frac{U_2}{Z_v}\sin\beta x$$

a) Prazni hod : $I_2 = 0$

$$U_1 = U_2 \cos\beta x \qquad I_1 = j\frac{U_2}{Z_v}\sin\beta x$$

b) Kratki spoj : $U_2 = 0$

$$U_1 = jZ_v I_2 \sin\beta x \qquad I_1 = I_2 \cos\beta x$$

c) Prirodna snaga: $U_2 = Z_v I_2$

$$U_1 = U_2(\cos\beta x + j\sin\beta x) = U_2 \epsilon^{j\beta x}$$

$$I_1 = I_2(\cos\beta x + j\sin\beta x) = I_2 \epsilon^{j\beta x}$$

Sl. 12.13

KARAKTERISTIKE PRIJENOSA PRIRODNE SNAGE

1) Napon konstantan duž voda →	Najbolje iskorištena izolacija voda. Povoljno za režim napona.
2) Struja konstantna duž voda →	Najbolje iskorišten vodič obzirom na I^2R gubitke
3) $\cos\varphi = 1$ duž čitavog voda →	Jalova snaga se ne prenosi ni u jednom dijelu voda.
4) Nema reflektiranog vala →	Najpovoljniji način prijenosa energije.
5) Energija električnog i magnetskog polja su jednake →	Nema njihanja energije duž voda.

Sl. 12.14

može biti i najbolje iskorištena. Napon na oba kraja voda je isti, a to je povoljno za režim napona i druge mjere za regulaciju napona nisu potrebne.

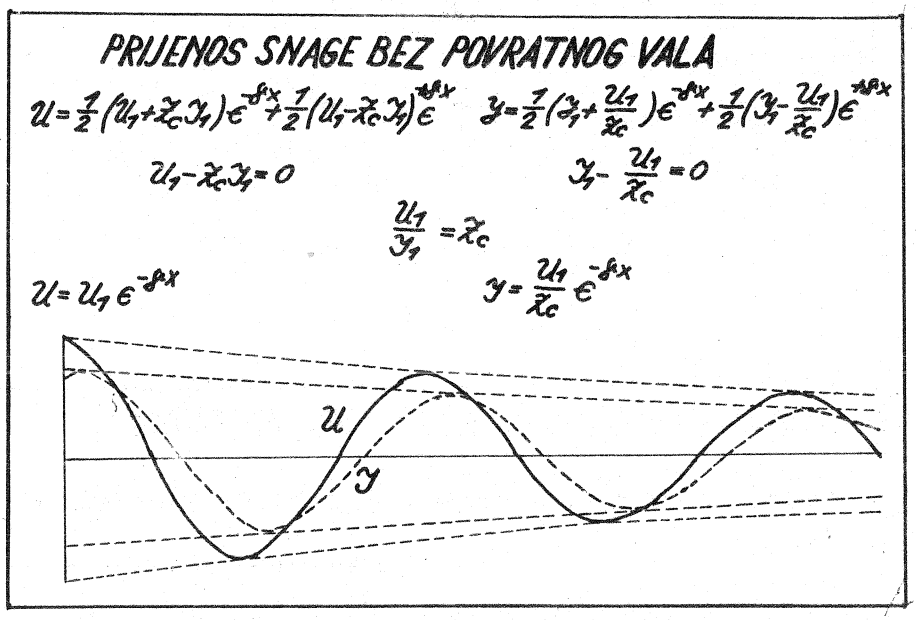
2) Struja je takodjer konstantna duž voda. To znači, da su Džaulovi gubici jednaki duž čitavog voda, tj. da je vodič najbolje iskorišten za vodjenje struje (ovo dakako vrijedi samo za vod, koji ima djelatni otpor, ali ionako idealni vod u prirodi ne postoji, nego je to samo aproksimacija stvarnom stanju).

3) Faktor snage jednak je jedinici duž čitavog voda. To znači da se prenosi čista djelatna snaga i nimalo jalove snage, niti u jednom dijelu voda. Kako prijenos jalove snage povlači za sobom dodatne gubitke energije, to znači da je prijenos prirodne snage i u tom smislu povoljan, jer tih dodatnih gubitaka nema (opet promatrajući idealni vod kao aproksimaciju stvarnoga).

4) Refleksija valova na kraju voda ne postoji, nego postoji samo polazni energetski val. To opet ukazuje na korist ovakvog načina prijenosa, jer povratni energetski val opet zahtijeva neke gubitke energije.

5) Energija električnog polja i energija magnetskog polja su međusobno jednake, što znači da nema njihanja energije duž voda.

Sve gore navedene karakteristike predstavljaju prednosti prijenosa prirodne snage pred drugim pogonskim stanjima kod prijenosa električne energije. Stoga često težimo za takvim načinom prijenosa, pogotovo kod najviših napona (koji sa sobom donose svoje probleme). Ipak ne treba previše kruto težiti za prijenosom prirodne snage, jer time sebi u izvjesnoj mjeri vežemo ruke. Zbog toga vodovi redovito prenose i znatno veće snage, nego što je prirodna snaga voda (iako eventualno vodovi najvišeg napona i ne u tolikoj mjeri), i to na račun manjeg stepena korisnosti i upotrebe sredstava za regulaciju napona.



Sl. 12.15

PRIJENOS SNAGE BEZ POVRATNOG VALA

Kod stvarnih vodova s gubicima ne možemo govoriti o prijenosu prirodne snage, ako želimo da budemo egzaktni. Ali možemo govoriti o prijenosu snage bez povratnog vala, tj. samo s polaznim valom, koji se na kraju voda ne reflektira. Takav način prijenosa prikazan je na slici 12.15, gdje su u prvom retku napisane prijenosne jednadžbe u svom obliku.

Iz tih jednadžbi očito slijedi uslov da povratni val bude jednak nuli. Taj je uslov jednak za napon i za struju a glasi: odnos napona i struje mora biti jednak karakterističnoj impedanciji. Na taj način se prijenosna jednadžba i za napon i za struju svodi na vrlo jednostavni oblik prigušenog polaznog vala. Kako karakteristična impedancija nije čisti djelatni otpor nego obično ima negativni fazni kut, to i struja nije više u fazi s naponom nego prethodi naponu.

PRILAGODJENJE POGONA PRIJENOSU PRIRODNOM SNAGOM

Želimo li pogon prilagoditi načinu prijenosa prirodne snage, moramo načiniti dvoje:

1) Ne prenositi nikakvu jalovu snagu,
2) Prenošenu djelatnu snagu uskladiti s prirodnom snagom voda.

Prvom zahtjevu možemo lako udovoljiti na taj način, da jalovu snagu, koju zahtijevaju potrošači, ne proizvodimo kod izvora energije nego u težištu potrošnje, npr. u neekonomičnim, rezervnim ili neopterećenim elektranama u sinhronim kompenzatorima ili u kondenzatorskim baterijama.

Djelatna snaga, koju zahtijevaju potrošači, neprekidno se mijenja, pa zato ne može biti prilagodjena prirodnoj snazi voda. Ali zato možemo postići obrnuto, da prirodnu snagu voda prilagodimo snazi prijenosa. To bismo najlakše mogli postići mijenjanjem napona. Ali, jer radimo po sistemu konstantnog napona, ovaj način otpada.

U tom pogledu postoje razne druge mogućnosti, koje su prikazane na slici 12.16 (vidi stranu 221).

1) Ako je snaga prijenosa manja od prirodne snage voda, onda možemo upotrijebiti ili poredne ili serijske prigušnice rasporedjene duž voda (npr. na udaljenosti od nekih 400 km), skica 1. Ako upotrijebimo poredne prigušnice, onda se time smanjuje kapacitet voda, pa se vodu povećava valni otpor odnosno smanjuje prirodna snaga. Ako primijenimo serijske prigušnice, povećava se induktivitet, pa se opet povećava valni otpor i smanjuje prirodna snaga. U praksi se upotrebljavaju poredne prigušnice, koje se ukapčaju kod malo opterećenih vodova, i to redovito preko tercijarnog namota transformatora.

2) Ako je snaga prijenosa veća od prirodne snage voda, onda možemo upotrijebiti poredne i serijske kondenzatore (skica 2). Upotrijebimo li poredne kondenzatore, poveća se kapacitet voda, pa se smanjuje valni otpor, a prirodna snaga poveća. Ako se upotrijebe serijski kondenzatori, smanji se induktivitet onda, pa se opet smanji valni otpor i poveća prirodna snaga voda. U praksi se upotrebljavaju i poredni i serijski kondenzatori priključeni direktno na vod.

3) Umjesto prigušnica odnosno kondenzatora možemo upotrijebiti i sinhrone kompenzatore, ali samo u porednom spoju (priključene preko transformatora), jer zbog velikog napona voda serijski spoj ne dolazi u obzir (skica 3). Udešavanjem uzbude možemo prirodnu snagu voda prilagoditi prijenosnoj snazi bez obzira bila potonja veća ili manja, i bez obzira u kojoj mjeri.

4) Najudobnije bi bilo, da u potpunosti kompenziramo i induktivitet i kapacitet voda, i to pomoću serijskih kondenzatora i porednih prigušnica, koji su prikladno dimenzionirani prema induktivitetu odnosno kapacitetu (skica 4). Takav vod bez induktiviteta i kapaciteta bio bi za pogon izmjeničnom strujom veoma ugodan, a ponašao bi se slično kao vod u pogonu s istosmjernom strujom. Ipak zbog velike cijene ovakva potpuna kompenzacija se ne upotrebljava.

5) Potpunu kompenzaciju induktiviteta a donekle i kapaciteta vodova dugih nekoliko tisuća kilometara predložili su u SSSR-u pomoću tzv. razmaknutih vodiča. Za jednu fazu položena su dva vodiča paralelno na prikladnu udaljenost, jedan od njih priključen je na izvor energije, a drugi na potrošača (skica 5). Ispravnim dimenzioniranjem može se postići potrebna kompenzacija induktiviteta. Za potpunu kompenzaciju kapaciteta potrebne su još poredne prigušnice.

13. PRILIKE NA STVARNOM VODU

Da se dobije slika o tome koliko se razlikuju prilike na stvarnom vodu od prilika na idealnom vodu, izračunate su prilike duž 380 kV-nog voda za razna pogonska stanja. Za vod je uzeta izvedba švedskog voda 380 kV s dva vodiča u snopu.

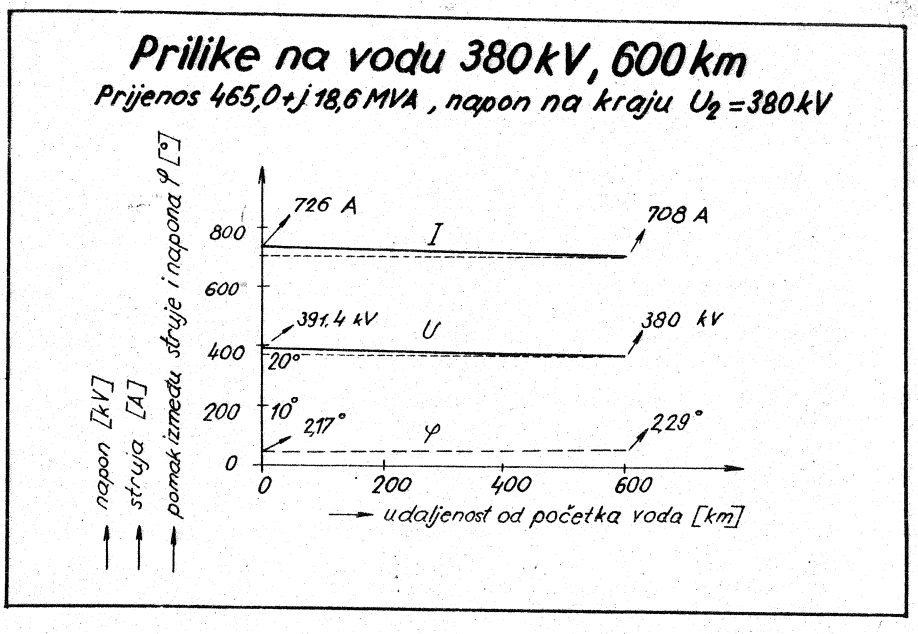
PRILIKE KOD PRIJENOSA BEZ POVRATNOG VALA

Na temelju karakteristične impedancije utvrdjeno je opterećenje na kraju voda, koje odgovara prijenosu bez povratnog vala, s time da linijski napon na kraju voda bude 380 kV. Za takvo opterećenje na kraju utvrdjene su prilike duž voda dugog 800 km i prikazane na slici 13.1.

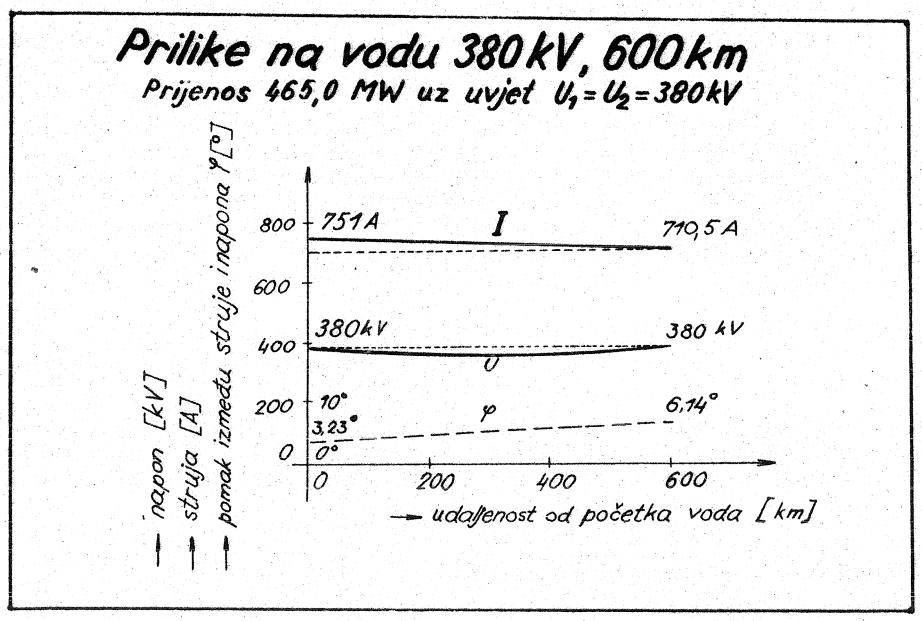
Kao što se vidi i napon i struja se neznatno povećavaju od kraja prema početku voda, ukupno povišenje napona iznosi 3%. Fazni kut izmedju struje i napona se također minimalno mijenja, ukupna promjena iznosi $0{,}12^{\circ}$, a i to samo zbog netačnog računanja. Električne prilike se dakle ne razlikuju mnogo od idealnog slučaja kod voda bez gubitaka.

PRILIKE KOD PRIJENOSA PRIRODNE SNAGE

Na slici 13.2 prikazane su električne prilike na istom vodu, ali kod prijenosa djelatne snage u iznosu jednakom prirodnoj snazi. Pri tome je postavljen uslov da napon na početku i na kraju voda iznosi 380 kV, što zahtijeva prijenos odredjenog iznosa jalove snage.



Sl. 13.1



Sl. 13.2

Kao što se vidi, napon se neznatno smanjuje u sredini voda (najveće smanjenje ne dostiže niti 1%) dok struja opet neznatno raste od kraja prema početku voda. Fazni kut izmedju napona i struje se sada mijenja nešto jače. Ipak se električne prilike ne razlikuju bitno od prilika na idealnom vodu.

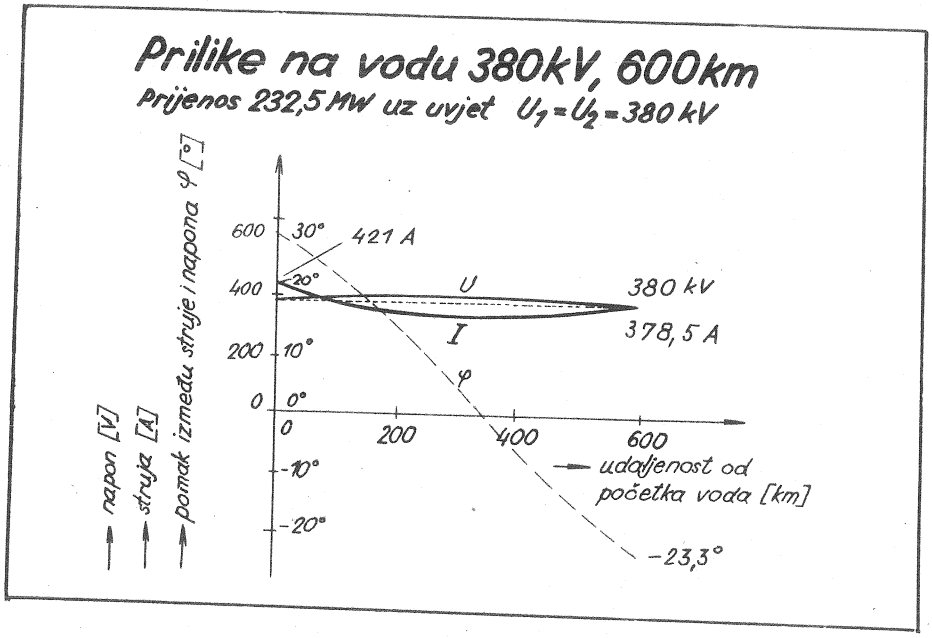
PRILIKE KOD PRIJENOSA SNAGE MANJE OD PRIRODNE

Na slici 13.3 prikazane su električne prilike na istom vodu, ali kod prijenosa djelatne snage u iznosu jednakom polovici prirodne snage. Pri tome je opet postavljen uslov da napon na početku i na kraju voda iznosi 380 kV, što opet zahtijeva prijenos odredjenog iznosa jalove snage.

Kao što se vidi, još uvijek se u pogledu napona mogu postići dobre prilike duž voda, napon se u sredini voda naime samo nešto povećava (oko 4%). Struja, naprotiv, je u sredini voda nešto manja, a na početku opet veća nego na kraju, ali promjene nisu velike. Veoma se mijenja fazni kut izmedju napona i struje, od -23,3° na kraju voda do +29,9° na početku.

PRILIKE KOD PRIJENOSA SNAGE VEĆE OD PRIRODNE

Na slici 13.4 prikazane su električne prilike na istom vodu, ali kod prijenosa djelatne snage u iznosu jednakom 15o% od prirodne snage. Pri tome je opet postavljen uslov, da napon na početku i na kraju voda iznosi 38o kV, što zahtijeva prijenos odredjenog iznosa jalove snage.



Sl. 13.3

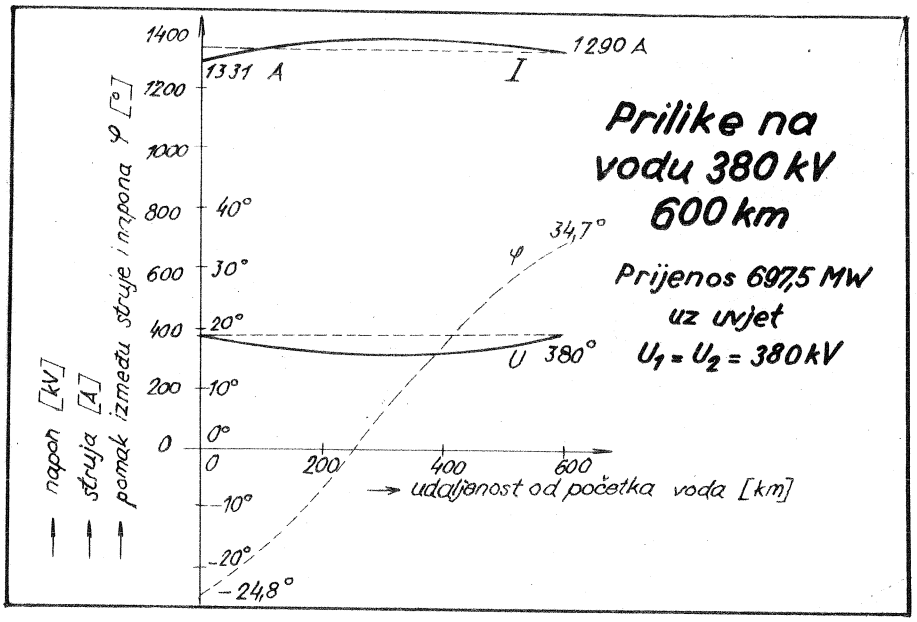
Kao što se vidi, sada je napon u sredini niži nego na početku i kraju voda, a sniženje iznosi oko 16%. Struja pak je u sredini voda nešto veća nego na kraju, dok je na početku manja od struje na kraju voda. Fazni kut se opet veoma mijenja, i to od +34,7° na kraju do -24,8° na početku voda.

To, što je struja na početku voda po iznosu manja od struje na kraju voda ne treba da nas nimalo zbuni. Faktor snage je, naime, na početku voda povoljniji, pa je i djelatna snaga na početku voda (795,5 MW) veća od djelatne snage na kraju voda (697,5 MW), dok razlika odlazi na gubitke u vodu.

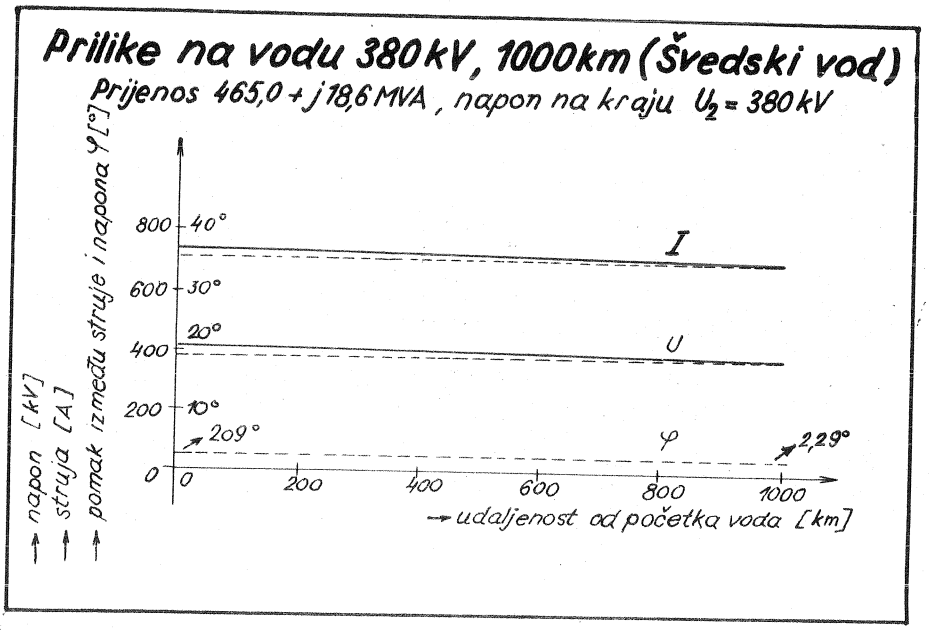
PRILIKE NA VODU DUGOM 1ooo km

Kod dužeg voda će karakterističnost električnih prilika duž voda još jače doći do izražaja. Primjera radi izračunate su prilike za 38o kV-ni vod švedske izvedbe dug 1ooo km.

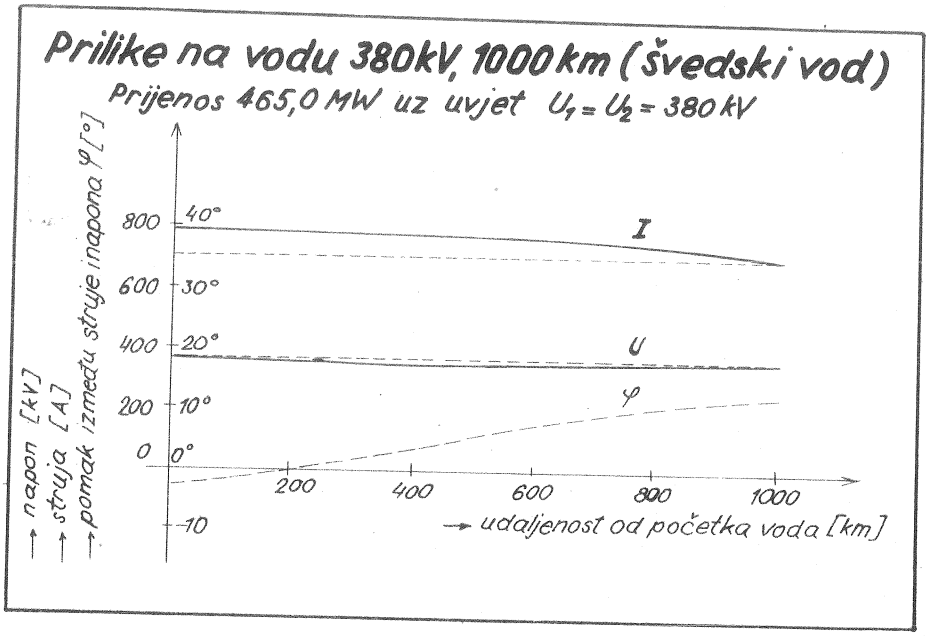
Na slici 13.5 dane su prilike za prijenos bez povratnog vala. Na slici 13.6 dane su prilike za prijenos djelatne snage u iznosu 1oo% prirodne snage uz uslov, da su naponi na početku i kraju jednaki, a na slici 13.7 dane su prilike za prijenos 5o% prirodne snage uz isti uslov u pogledu napona.


Prilike na vodu 380 kV 600 km
Prijenos 697,5 MW uz uvjet $U_1 = U_2 = 380$ kV
1290 A
1331 A
I
U
380°
34,7°
φ
-24,8°
napon [kV]
struja [A]
pomak između struje i napona φ [°]
udaljenost od početka voda [km]
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
40°
30°
20°
10°
0°
-10°
-20°

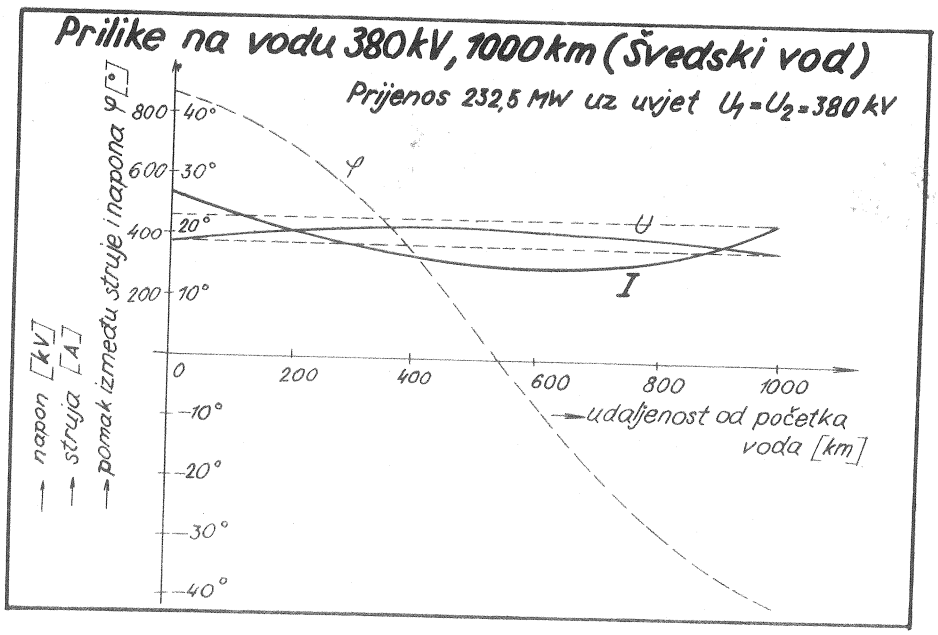
Sl. 13.4


Prilike na vodu 380 kV, 1000 km (Švedski vod)
Prijenos 465,0 + j 18,6 MVA, napon na kraju $U_2 = 380$ kV
I
U
φ
2,09°
2,29°
napon [kV]
struja [A]
pomak između struje i napona φ [°]
udaljenost od početka voda [km]
0
200
400
600
800
1000
40°
30°
20°
10°

Sl. 13.5

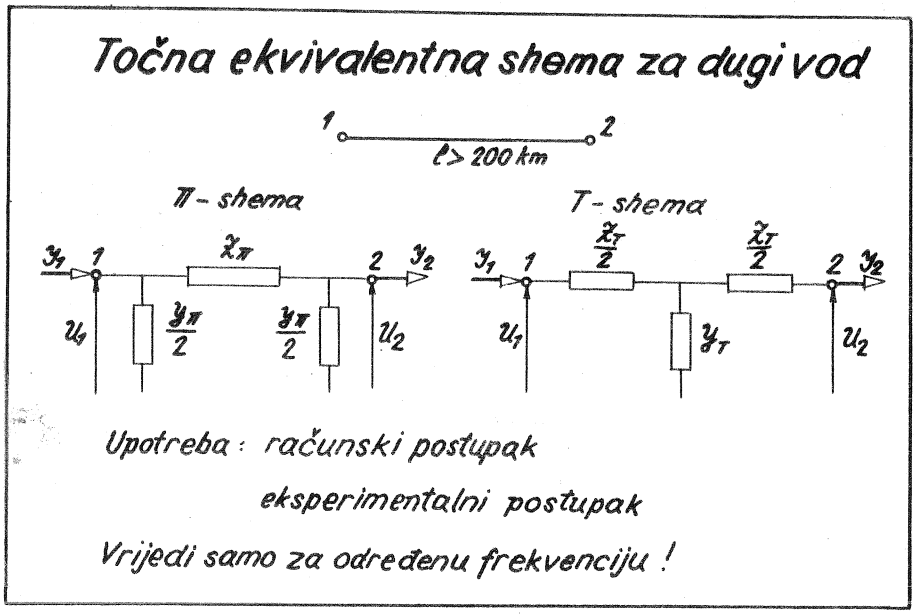

Prilike na vodu 380kV, 1000km (švedski vod)
Prijenos 465,0 MW uz uvjet $U_1 = U_2 = 380$ kV
→ napon [kV]
→ struja [A]
→ pomak između struje i napona φ [°]
800
600
400
200
0
40°
30°
20°
10°
0°
-10
I
U
φ
200
400
600
800
1000
→ udaljenost od početka voda [km]

Sl. 13.6


Prilike na vodu 380kV, 1000km (Švedski vod)
Prijenos 232,5 MW uz uvjet $U_1 = U_2 = 380$ kV
→ napon [kV]
→ struja [A]
→ pomak između struje i napona φ [°]
800
600
400
200
40°
30°
20°
10°
0
-10°
-20°
-30°
-40°
φ
U
I
200
400
600
800
1000
→ udaljenost od početka voda [km]

Sl. 13.7

14. TAČNE EKVIVALENTNE SHEME VODA



Sl. 14.1

TAČNA EKVIVALENTNA SHEMA ZA DUGI VOD

Ako vod ima priličnu dužinu, onda upotreba prije prikazanih Pi- i T-shema dovodi do prevelike pogreške, kao što je to bilo i prikazano. Ali ipak se mogu postaviti Pi-shema i T-shema, koje daju tačne rezultate, samo što parametre tih shema računamo na drugi način (slika 14.1). Jasno je samo po sebi da svaka od tih shema mora biti simetrična, jer je i vod simetričan.

Ovakve tačne ekvivalentne sheme mogu se upotrijebiti za odredjivanje električnih prilika na dugom vodu bilo računskim bilo eksperimentalnim postupkom. Tačnost tih shema slijedi iz zahtjeva, da dadu iste vrijednosti za napon i struju na oba kraja voda. Iz toga ujedno slijedi, da se ove sheme mogu upotrijebiti samo za odredjivanje prilika na krajevima voda, a inače uzdužne i poprečne grane shema nemaju nikakve veze s uzdužnim i poprečnim granama voda. Nadalje, budući da se izrazi za odredjivanje parametra tačnih shema dobivaju simboličkim računom, to tako izračunati parametri vrijede samo za odredjenu frekvenciju tj. onu koja je uzeta u račun.

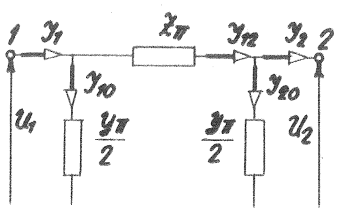
PARAMETRI TAČNE Pi-sheme

Proračun parametara tačne Pi-sheme prikazan je na slici 14,2, gdje je na skici prikazana Pi-shema s potrebnim oznakama. Polazeći od kraja, kao da su zadani napon "U_2" i struja "I_2", pa računajući duž Pi-sheme, možemo dobiti izraz (1) za napon na početku Pi-sheme.Ako želimo da Pi-shema dade iste rezultate kao i vod, moramo izraz (1) usporediti s izrazom (2) koji daje napon na početku dugog voda, a to je jedna od prije izvedenih prijenosnih jednadžbi.

Desne strane izraza (1) i (2) moraju dakle uvijek biti medjusobno jednaki. Oba izraza imaju po dvije iste neovisne promjenljivice (U_2 i I_2), pa ti izrazi mogu uvijek biti jednaki samo onda, ako su faktori uz svaku od tih primjenljivica medjusobno jednaki. Time dobijemo uslove za odredjivanje parametara Pi-sheme.

Izjednačivši faktore uz "I_2" dobijemo izraz za impedanciju uzdužne grane, a izjednačivši faktore uz "U_2" dobijemo izraz za admitanciju poprečnih grana. Time je dobiveno sve što nam je potrebno. Kad bismo analogno izjednačili izraze za struju "I_1", dobili bismo opet iste izraze.

Parametri točne Π-sheme



Iz Π-sheme slijedi :

$$\mathcal{Y}_{20} = U_2 \frac{\mathcal{Y}_\Pi}{2}$$

$$\mathcal{Y}_{12} = \mathcal{Y}_2 + \mathcal{Y}_{20} = \mathcal{Y}_2 + U_2 \frac{\mathcal{Y}_\Pi}{2}$$

$$U_1 = U_2 + \mathcal{Y}_{12} \mathcal{Z}_\Pi = U_2 + \left(\mathcal{Y}_2 + U_2 \frac{\mathcal{Y}_\Pi}{2}\right) \mathcal{Z}_\Pi$$

$$U_1 = U_2 \left(1 + \frac{\mathcal{Z}_\Pi \mathcal{Y}_\Pi}{2}\right) + \mathcal{Y}_2 \mathcal{Z}_\Pi \quad \ldots \text{ ovo vrijedi za Π-shemu} \quad \ldots(1)$$

$$U_1 = U_2 \operatorname{ch} \gamma\ell + \mathcal{Y}_2 \mathcal{Z}_c \operatorname{sh} \gamma\ell \quad \ldots \text{ ovo vrijedi za dugi vod} \quad \ldots(2)$$

Slijedi: $\mathcal{Z}_\Pi = \mathcal{Z}_c \operatorname{sh} \gamma\ell$

$$\frac{\mathcal{Y}_\Pi}{2} = \frac{\operatorname{ch}\gamma\ell - 1}{\mathcal{Z}_c \operatorname{sh}\gamma\ell} = \frac{\operatorname{ch}\gamma\ell - 1}{\mathcal{Z}_\Pi} \quad \left(\text{jer je } 1 + \frac{\mathcal{Z}_\Pi \mathcal{Y}_\Pi}{2} = \operatorname{ch}\gamma\ell\right)$$

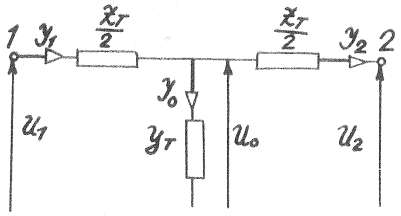
Sl. 14.2

PARAMETRI TAČNE T-SHEME

Proračun parametara tačne T-sheme prikazan je na slici 14.3, gdje je na skici prikazana T-shema s potrebnim oznakama. Opet polazimo od kraja, kao da su zadani napon "U_2" i struja "I_2", pa računajući duž T-sheme, dobijemo konačno izraz (1) za struju na početku T-sheme. Taj izraz moramo izjednačiti s izrazom (2), tj. s prijenosnom jednadžbom, koja daje struju na početku dugog voda.

Iz istih razloga kao kod proračuna parametara tačne Pi-sheme, moramo izjednačiti faktore uz nezavisne promjenljivice "I_2"i "U_2", pa tako dobijemo tražene izraze za parametre tačne T-sheme.

Parametri točne T-sheme



Iz T-sheme slijedi

$$U_0 = U_2 + \mathcal{Y}_2 \frac{\mathcal{Z}_T}{2}$$

$$\mathcal{Y}_0 = U_0 \mathcal{Y}_T = \left(U_2 + \mathcal{Y}_2 \frac{\mathcal{Z}_T}{2}\right) \mathcal{Y}_T$$

$$\mathcal{Y}_1 = \mathcal{Y}_2 + \mathcal{Y}_0 = \mathcal{Y}_2 + U_2 \mathcal{Y}_T + \mathcal{Y}_2 \frac{\mathcal{Z}_T}{2} \mathcal{Y}_T$$

$$\mathcal{Y}_1 = \mathcal{Y}_2 \left(1 + \frac{\mathcal{Z}_1}{2} \mathcal{Y}_T\right) + U_2 \mathcal{Y}_T \quad \ldots \text{ ovo vrijedi za T- shemu} \quad \ldots(1)$$

$$\mathcal{Y}_1 = \mathcal{Y}_2 \operatorname{ch}\gamma\ell + \frac{U_2}{\mathcal{Z}_c} \operatorname{sh}\gamma\ell \quad \ldots \text{ ovo vrijedi za dugi vod} \quad \ldots(2)$$

Slijedi $\mathcal{Y}_T = \frac{1}{\mathcal{Z}_c} \operatorname{sh}\gamma\ell$

$$\frac{\mathcal{Z}_T}{2} = \mathcal{Z}_c \frac{\operatorname{ch}\gamma\ell - 1}{\operatorname{sh}\gamma\ell} = \frac{\operatorname{ch}\gamma\ell - 1}{\mathcal{Y}_T} \quad \left(\text{jer je } 1 + \frac{\mathcal{Z}_T}{2} \mathcal{Y}_T = \operatorname{ch}\gamma\ell\right)$$

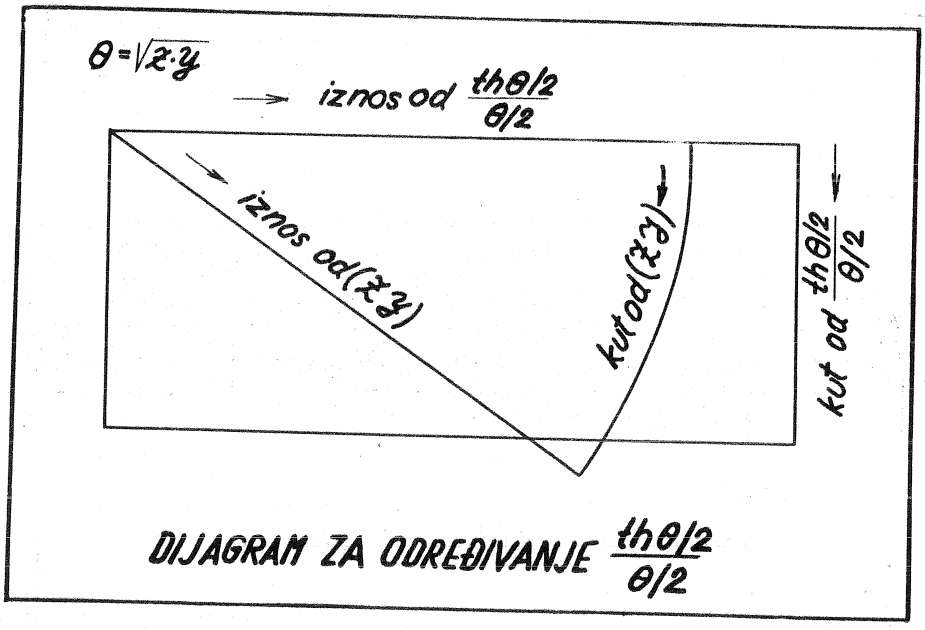
Sl. 14.3

KOREKCIONI FAKTORI ZA TAČNE EKVIVALENTNE SHEME

Dobiveni izrazi za parametre tačne Pi-sheme i tačne T-sheme mogu se preinačiti, kao što je učinjeno na slici 14.4. Tu je u prvom redu uvedena novno veličina "Θ", izraz (1), na isti način kao što smo bili učinili kod prijenosnih jednadžbi. Zatim su izvedeni potrebni izrazi za "Z_c" (2) i za "$\frac{1}{Z_c}$" (3), i konačno dan jednostavniji matematski izraz (4) za $\frac{ch\,\Theta - 1}{sh\,\Theta}$ (makar dokaz ovdje nije naveden). (sl.14.4 na str. 221).

S tim izrazima možemo drugačije pisati parametre Pi- i T-shema, kao što je pokazano u izrazima (5) do (8). Vidimo da svi izrazi sadržavaju ukupnu impedanciju odnosno ukupnu admitanciju voda množenu s nekim korekcionim faktorom. Ti korekcioni faktori teže k jedinici, ako dužina voda teži k nuli, i tako tačne ekvivalentne sheme degeneriraju u približne ekvivalentne sheme, s kojima smo se već prije upoznali.

Jedan od korekcionih faktora ($\frac{sh\,\Theta}{\Theta}$) smo već prije upoznali, i njega možemo očitati iz dijagrama po Woodruffu. No isto takav dijagram postoji i za drugi korekcioni faktor ($\frac{th\,\Theta/2}{\Theta/2}$), što znatno olakšava proračun parametara tačnih ekvivalentnih shema, slika 14.5.



Sl. 14.5

PRIMJER PRORAČUNA TAČNE Pi-SHEME

Radi ilustracije dan je na slici 14.6 primjer proračuna tačne Pi-sheme. U prvom retku zadani su podaci voda, a u drugom navedene vrijednosti potrebnih veličina, koje smo za isti vod već prije izračunali. Prema izrazima na slici 14.2 izračunati su parametri Pi-shema i upisani na skicama na dnu slike.

PRIMJER PRORAČUNA TAČNE T-SHEME

Isto tako je na slici 14.7 dan primjer proračuna tačne T-sheme. Parametri T-sheme izračunati su prema izrazima sa slike 14.3.

USPOREDBA REZULTATA

Radi ilustracije usporedit ćemo parametre tačnih i približnih ekvivalentnih shema. To je učinjeno na slici 14.8, gdje su najprije napisani ukupni iznosi za uzdužne grane, a zatim su upisani ukupni iznosi za poprečne grane, i to redom za tačnu Pi-shemu, pa za približne sheme (bilo Pi- bilo T-shema) i konačno za tačnu T-shemu.

Primjer proračuna točne Π-shemè

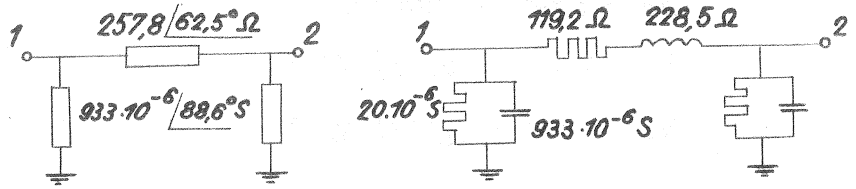
$R_1 = 0{,}231\ \Omega/km$, $X_1 = 0{,}4\ \Omega/km$, $B_1 = 3{,}0 \cdot 10^{-6}\ S/km$, $G_1 = 0$, $l = 600\ km$

$Z_c = 392 \angle -15°\ \Omega$, $sh\gamma l = 0{,}657 \angle 77{,}5°$, $ch\gamma l = 0{,}80 \angle 8{,}2° = 0{,}790 + j0{,}1158$

$Z_\Pi = 392 \angle -15° \cdot 0{,}657 \angle 77{,}5° = 257{,}8 \angle 62{,}5° = 119{,}2 + j\,228{,}5\ \Omega$

$$\frac{y_\Pi}{2} = \frac{(0{,}790 + j0{,}1158) - 1}{257{,}8 \angle 62{,}5°} = \frac{-0{,}21 + j0{,}1158}{257{,}8 \angle 62{,}5} = \frac{0{,}24 \angle 151{,}1°}{257{,}8 \angle 62{,}5°} =$$

$$= 0{,}000933 \angle 88{,}6° = 0{,}000020 + j\,0{,}000933\ S$$



Sl. 14.6

Primjer proračuna točne T-sheme

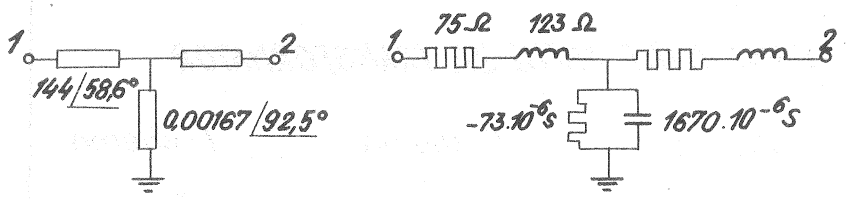
$R_1 = 0{,}231\ \Omega/km$, $X_1 = 0{,}4\ \Omega/km$, $B_1 = 3{,}0 \cdot 10^{-6}\ S/km$, $G_1 = 0$, $l = 600\ km$

$Z_c = 392 \angle -15°\ \Omega$, $sh\gamma l = 0{,}657 \angle 77{,}5°$, $ch\gamma l = 0{,}80 \angle 8{,}2° = 0{,}790 + j0{,}1158$

$$y_T = \frac{0{,}657 \angle 77{,}5°}{392 \angle -15°} = 0{,}00167 \angle 92{,}5° = -0{,}000073 + j0{,}00167\ S$$

$$\frac{z_T}{2} = \frac{(0{,}790 + j0{,}1158) - 1}{0{,}00167 \angle 92{,}5°} = \frac{-0{,}21 + j0{,}1158}{0{,}00167 \angle 92{,}5°} = \frac{0{,}24 \angle 151{,}1°}{0{,}00167 \angle 92{,}5°} =$$

$$= 144 \angle 58{,}6° = 75 + j\,123\ \Omega$$



Sl. 14.7

Kao što se vidi kod tačne Pi-sheme je impedancija uzdužne grane manja, a kod tačne T-sheme veća nego kod približnih shema. Admitancija poprečne grane je naprotiv kod tačne Pi-sheme veća a kod tačne T-sheme manja nego kod približnih shema.

Kako je odvod voda redovito vrlo malen, lako se dogodi da realni član u admitanciji poprečne grane tačne T-sheme postane negativan (kao što je i u našem primjeru slučaj, jer smo odvod uopće zanemarili). Isto se tako kod velikih dužina voda može dogoditi da realni član u impedanciji uzdužne grane postane negativan. To dakako ne smeta ništa kod računskog postupka, ali pravi poteškoće kod eksperimentalnog postupka.

Usporedba točnih i približnih ekvivalentnih shema

$\underline{z}_\pi = 119{,}2 + j228{,}5$

$\underline{z} = 138{,}6 + j240$

$\underline{z}_T = 150 + j246$

$\underline{y}_\pi = (40 + j\,1866) \cdot 10^{-6}$

$\underline{y} = (0 + j\,1800) \cdot 10^{-6}$

$\underline{y}_T = (-73 + j1670) \cdot 10^{-6}$

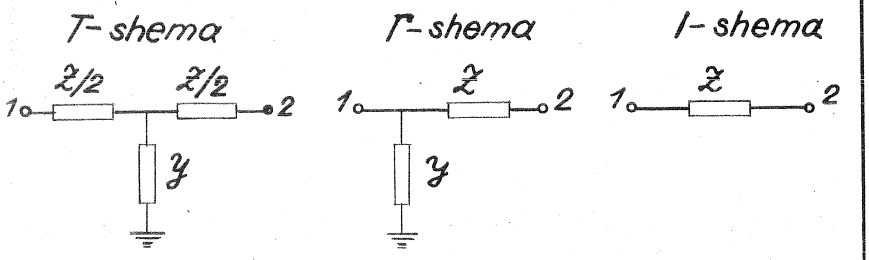
Sl. 14.8

15. TRANSFORMATOR I GENERATOR U PRIJENOSU

EKVIVALENTNE SHEME ZA TRANSFORMATOR

Transformatori takodjer sudjeluju u mreži kao njezini elementi, pa je potrebno da i njih prikažemo pomoću ekvivalentnih shema. Pri tome se sve veličine reduciraju na jedan napon, redovito na jedan od nazivnih napona transformatora. Promjena faznog kuta zbog vrste spoja transformatora redovito se u ekvivalentnim shemama ne uzima u račun. Najčešće upotrebljavane ekvivalentne sheme za transformatore prikazane su na slici 15.1.

EKVIVALENTNE SHEME ZA TRANSFORMATOR



najtočnije	dosta točno	manje točno
(točni proračuni)	(mreze v.v.n)	(mreže sred. nap)

Sl. 15.1

T-shema daje najtačnije rezultate, pa se i upotrebljava kad se zahtijeva velika tačnost. Gama-shema daje manje tačne rezultate, jer je nesimetrična. Ipak se zbog jednostavnijeg oblika često upotrebljava kod mreža vrlo visokog napona. Ako se npr. na oba kraja prijenosnog voda nalaze transformatori, mogu se Gama-sheme na oba kraja postaviti simetrično prema vodu, čime se pogreške donekle kompenziraju. I-shema obuhvaća samo uzdužnu granu i zanemaruje struju magnetiziranja i gubitke praznog hoda transformatora, te je najmanje tačna. Ipak se upotrebljava kod mreža srednjeg i manjeg napona, pa i u nekim računima za mreže najvišeg napona, gdje se ne traži naročita tačnost (npr.proračun kratkog spoja).

PARAMETRI EKVIVALENTNE SHEME ZA TRANSFORMATOR

Proračun parametara za ekvivalentnu shemu transformatora prikazan je na slici 15.2, gdje su najprije navedene veličine koje su redovito zadane. Ako je napon dan u "kV" onda snaga i gubici moraju biti dani u "MVA" odnosno "MW". Napon kratkog spoja i struja magnetiziranja su bez dimenzije (obično su zadani u postocima, ali to treba pretvoriti u čisti broj).

Za uzdužnu granu dan je izvod izraza za iznos impedancije "Z" i za njen realni dio "R". S ta dva podatka je impedancija potpuno definirana. Za poprečnu granu dan je izvod izraza za iznos admitancije "Y" i za njen realni dio "G". S ta dva podatka je admitancija potpuno definirana.

PARAMETRI EKVIVALENTNE SHEME ZA TRANSFORMATOR

Zadano: U = nazivni napon, S = nazivna snaga,
u_k = napon kratkog sp., P_k = gubici kratkog spoja,
i_o = str. magnetiziranja, P_o = gubici praznog hoda.

Za uzdužnu granu:

$$Iz:\ u_k = \frac{Z\cdot I}{U/\sqrt{3}} = Z\cdot\frac{\sqrt{3}\cdot I}{U}\cdot\frac{U}{U} = \frac{Z}{U^2}\cdot S,\ \text{slijedi}:\ Z = \frac{U^2}{S}\cdot u_k$$

$$P_k = 3I^2R = 3\left(\frac{S}{\sqrt{3}\cdot U}\right)^2\cdot R = \frac{S^2}{U^2}\cdot R,\ \text{-''-}:\ R = \frac{U^2}{S^2}\cdot P_k$$

Za poprečnu granu:

$$Iz:\ i_o = \frac{U/\sqrt{3}\cdot Y}{S/\sqrt{3}\cdot U} = \frac{U^2}{S}\cdot Y,\quad \text{slijedi}:\ Y = \frac{S}{U^2}\cdot i_o$$

$$P_o = 3\left(\frac{U}{\sqrt{3}}\right)^2\cdot G = U^2\cdot G,\quad \text{-''-}:\ G = \frac{P_o}{U^2}$$

Sl. 15.2

Kod ovih proračuna se redovito računa s nazivnim naponom, a razlika napona za koji je gradjen transformator prema nazivnom naponu mreže se obično zanemaruje. Isto tako se redovito zanemaruje i regulacija napona na transformatoru.

Parametri, koji su na gornji način izračunati, odnose se na simetrične prilike u transformatoru. Kod nesimetričnih prilika tako izračunati parametri odgovaraju direktnim komponentama u sistemu simetričnih komponenata, pa na gornji način izračunata impedancija predstavlja direktnu impedanciju "Z_d". Inverzna impedancija "Z_i" kod transformatora jednaka je direktnoj, jer nema nikakvih dijelova koji rotiraju.

PRIMJER

Na slici 15.3 dan je primjer za proračun parametara ekvivalentne sheme za transformator. U prvom redu dani su podaci transformatora 22o/11o kV snage 1oo MVA. Sve ćemo veličine računati obzirom na napon 22o kV. Proračun je proveden po prije izvedenim formulama.

PARAMETRI SHEME ZA TRANSFORMATOR- PRIMJER

Zadano: $U = 220\,kV$, $S = 100\,MVA$, $u_k = 13{,}3\%$, $P_k = 408\,kW$

$i_0 = 1{,}17\%$, $P_0 = 156\,kW$

Uzdužna grana: $Z = \frac{220^2}{100} \cdot 0{,}133 = 64{,}4\,\Omega$

$R = \frac{220^2}{100^2} \cdot 0{,}408 = 1{,}98\,\Omega$

$\cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{1{,}98}{64{,}4} = 0{,}0307,\ \varphi = 88{,}25°$

$\Rightarrow \underline{Z = 64{,}4 / 88{,}25°}$

Poprečna grana: $Y = \frac{100}{220^2} \cdot 0{,}0117 = 24{,}1 \cdot 10^{-6}\,S$

$G = \frac{0{,}156}{220^2} = 3{,}22 \cdot 10^{-6}\,S$

$\cos\eta = \frac{G}{Y} = \frac{3{,}22}{24{,}1} = 0{,}134,\ \eta = 82{,}25$

$\Rightarrow \underline{Y = 24{,}1 \cdot 10^{-6} / 82{,}25°}$

Sl. 15.3

NULTA REAKTANCIJA TRANSFORMATORA

Ako nulta struja može nesmetano teći kroz transformator, onda je nulta reaktancija transformatora jednaka direktnoj reaktanciji. Za takav slučaj mora biti ostvaren spoj sa zemljom, a vrsta spoja transformatora mora omogućiti, da u oba namota nulta struja nesmetano teče.

Na slici 15.4 su prikazana tri primjera. S lijeve strane su dane sheme spoja transformatora, a s desne strane ekvivalentne sheme za direktnu i nultu mrežu. U prvom primjeru oba namota imaju spoj zvjezdišta sa zemljom, pa nulta struja nesmetano može teći u oba namota, makar su oba spojena u zvijezdu. U drugom primjeru je jedan namot spojen u zvijezdu i zvjezdište mu je uzemljeno, a drugi namot je spojen u trokut, pa nulta struja može opet nesmetano teći, jer se u drugom namotu zatvara u trokutu. U oba ova primjera nulta reaktancija jednaka je direktnoj, samo što u drugom primjeru ne postoji veza izmedju primarnih i sekundarnih priključnica u shemi nulte mreže.

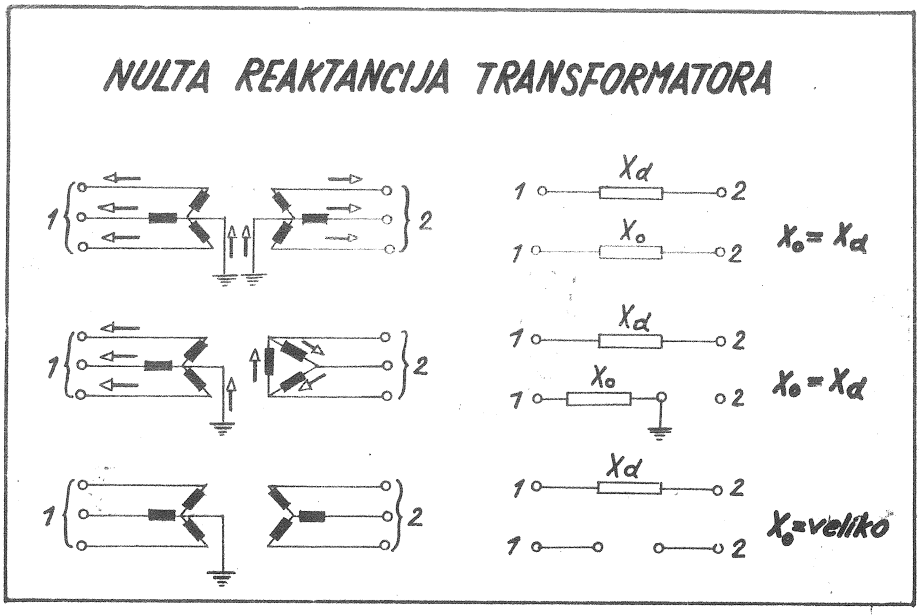
U trećem primjeru su oba namota spojena u zvijezdu, ali je samo jedno zvjezdište uzemljeno. U drugom namotu ne može nulta struja nesmetano teći. Ipak činjenica, što kotao transformatora djelujući kao tercijarni namot omogućuje nultoj struji, da u izvjesnoj mjeri teče, dovodi do toga da nulta reaktancija ima konačnu iako vrlo veliku vrijednost (reda veličine lo X_d).

IMPEDANCIJA U ZVJEZDIŠTU

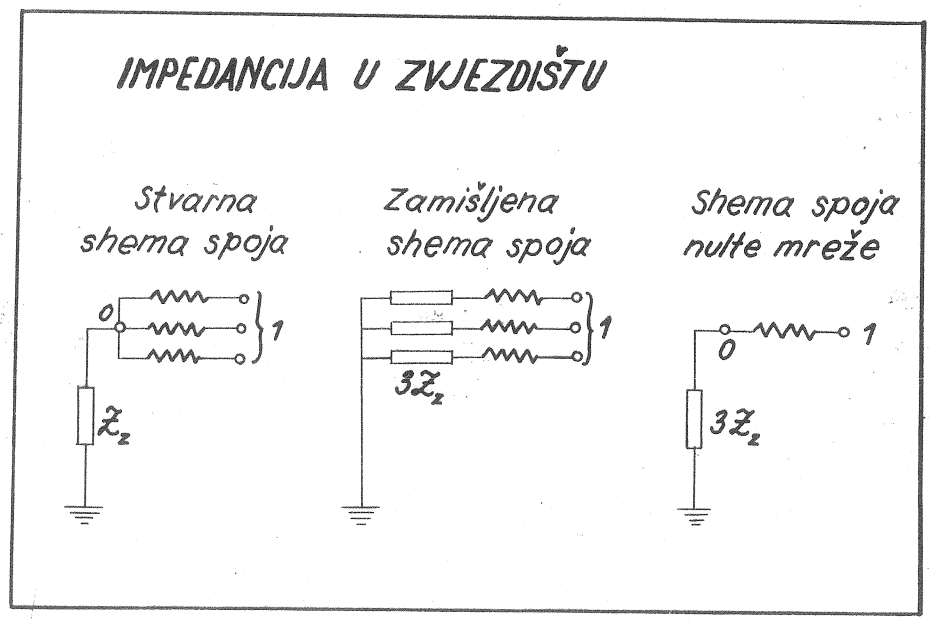
Ako se izmedju zvjezdišta i zemlje nalazi bilo kakva impedancija (npr. petersenka), možemo zamisliti, da je trostruka vrijednost impedancije ubačena u svaku fazu (slika 15.5). Prema tome u shemi nulte mreže treba uzeti u račun trostruku vrijednost od stvarne impedancije.

EKVIVALENTNA SHEMA ZA GENERATOR

Za generator upotrebljavamo samo I-shemu (vidi slika 15.6). Poprečne grane, naime u ekvivalentnoj shemi nema, jer generator dobiva uzbudu iz posebnog strujnog kruga. Djelatni otpor generatora obično zanemarujemo, jer je relativno malen, ali ga po potrebi možemo odrediti mjerenjem. Reaktanciju možemo izračunati prema navedenom izrazu. Treba naglasiti, da kod generatora dolazi u obzir nekoliko vrijednosti za direktnu reaktanciju (već prema tome, o kojem se momentu radi). Čak šta više, kod strojeva s istaknutim polovima razlikujemo uzdužnu i poprečnu reaktanciju ali kod proračuna mreža često računamo samo s uzdužnom.



Sl. 15.4



Sl. 15.5

Osim impedancije u ekvivalentnoj shemi za generator imamo i elektromotornu silu, i to spojeno u seriju s impedancijom. Kako smatramo, da su elektromotorne sile u sve tri faze simetrične, to elektromotornu silu moramo uzeti u račun samo u vezi s direktnom impedancijom, dočim je kod inverzne i nulte mreže elektromotorna sila jednaka nuli.

EKVIVALENTNA SHEMA ZA GENERATOR

$\mathcal{Z} = R + jX$ ($R \cong 0$, ili ga izmjerimo)

Zadano: X''_d = početna reaktancija,

X'_d = prolazna reaktancija,

X_d = sinhrona reaktancija,

X_i = inverzna reaktancija,

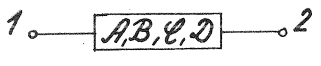
X_o = nulta reaktancija.

$/z : x = \frac{X \cdot I}{U/\sqrt{3}} = X \frac{\sqrt{3} \cdot I}{U} \cdot \frac{U}{U} = \frac{X}{U^2} \cdot S$ slijedi: $X = \frac{U^2}{S} \cdot x$

Sl. 15.6

16. OPĆI PRIJENOSNI SISTEM

OPĆE KONSTANTE PRIJENOSNOG SISTEMA



$AD - BC = 1$ ...(1)

$$\left.\begin{aligned} U_1 &= AU_2 + BY_2 \\ Y_1 &= DY_2 + CU_2 \end{aligned}\right\}(2) \qquad \left.\begin{aligned} U_2 &= DU_1 - BY_1 \\ Y_2 &= AY_1 - CU_1 \end{aligned}\right\}(3)$$

A = odnos napona praznog hoda,

B = impedantna karakteristika,

C = admitantna karakteristika,

D = odnos struja kratkog spoja

Sl. 16.1

OPĆE KONSTANTE PRIJENOSNOG SISTEMA

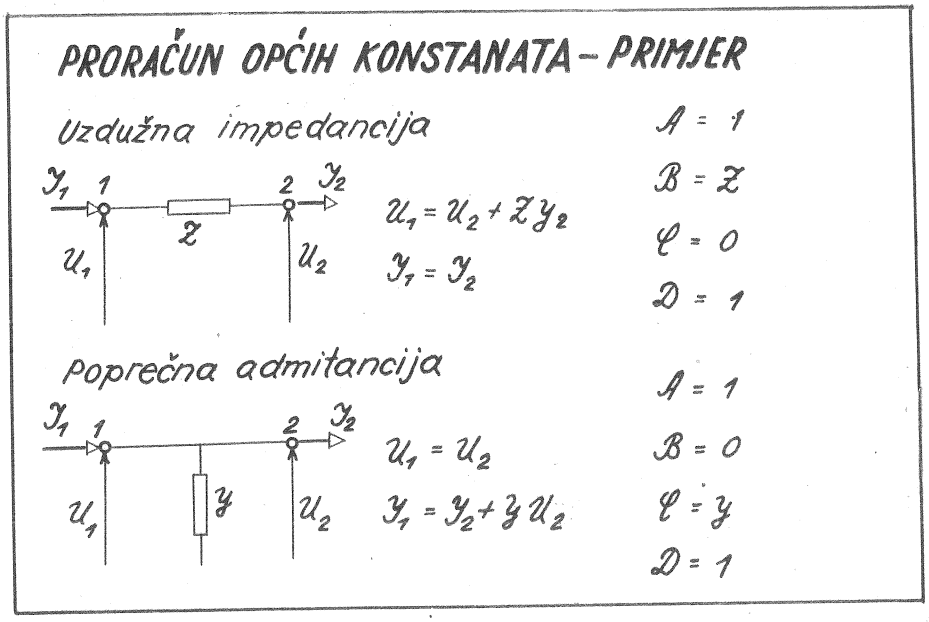
Za svaki prijenosni sistem s dva kraja, koji sadrži samo pasivne i linearne elemente u bilo kakvom rasporedu, mogu se napisati opće prijenosne jednadžbe prema izrazima (2) i (3) na slici 16.1. Koeficijente "A", "B", "C" i "D"

uz promjenljivice "U_2" i "I_2" odnosno "U_1" i "I_1" nazivamo općim konstantama. Pri tome su samo tri opće konstante medjusobno neovisne, jer su te četiri konstante uvijek povezane izrazom (1). Obzirom na njezin smisao u općim prijenosnim jednadžbama svakoj općoj konstanti možemo dati prikladni naziv. Kod simetričnih sistema je A = D.

Za svaki prijenosni sistem možemo uzeti da je zadano "U_2" i "I_2", pa od kraja "2" računati duž prijenosnog sistema električne prilike sve do početka "1", dok ne dobijemo izraze za "U_1" i "I_1". S time smo ujedno odredili opće konstante sistema, što je najopćenitiji način za njihovo odredjivanje.

PRORAČUN OPĆIH KONSTANATA - PRIMJER

Primjera radi proračunate su po općem postupku opće konstante jednostavnih prijenosnih sistema, koji se sastoje od jedne uzdužne impedancije odnosno od jedne poprečne admitancije. Za pojedini prijenosni sistem postavljene su prijenosne jednadžbe koje slijede iz njegove sheme spoja. Odatle odmah vidimo kolike su opće konstante prijenosnog sistema, slika 16.2.



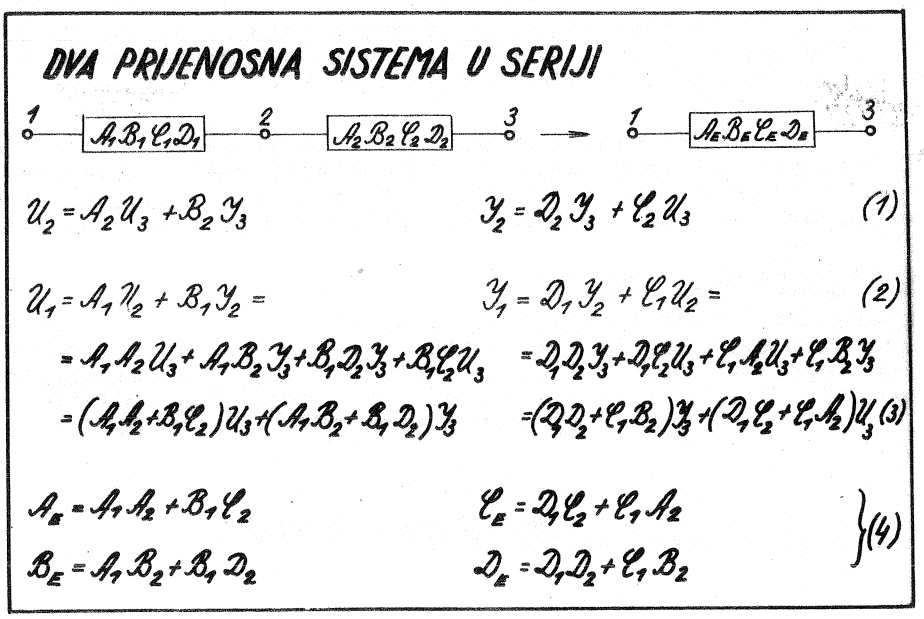
Sl. 16.2

DVA PRIJENOSNA SISTEMA U SERIJI

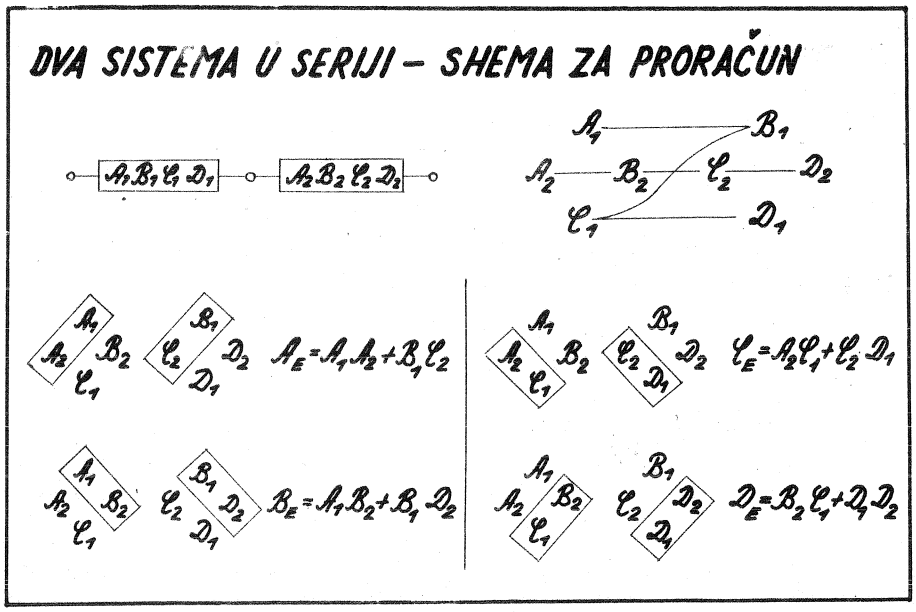
Dva prijenosna sistema, spojena u seriju, možemo pretvoriti u jedan prijenosni sistem s ekvivalentnim općim konstantama. Izvod izraza za ekvivalentne opće konstante "A_E", "B_E", "C_E", i "D_E" dan je na slici 16.3. U izrazima (1) postavljene su najprije opće prijenosne jednadžbe za drugi prijenosni sistem. U izrazima (2) postavljene su zatim opće prijenosne jednadžbe za prvi prijenosni sistem i nakon što su u njih uvršteni izrazi (1), sredjene su te prijenosne jednadžbe i dobiveni izrazi (3). Iz njih direktno slijede izrazi (4) za opće konstante ekvivalentnog prijenosnog sistema.

DVA SISTEMA U SERIJI - SHEMA ZA PRORAČUN

Za proračun općih konstanata ekvivalentnog sistema, koji nadomješta dva prijenosna sistema spojena u seriju, može se postaviti pregledna shema, koja je prikazana na slici 16.4. Opće konstante dvaju sistema ispišu se kao na slici desno gore tj. konstante drugog sistema u jednom redu, a konstante prvog sistema prve dvije gore, i to "A_1" u sredini iznad "A_2" i "B_2", a "B_1" u sredini iznad "C_2" i "D_2", a druge dvije dolje na analogni način. Tako se dobiju dva kvadrata s konstantama upisanima u vrhovima tih kvadrata. Konstanta "A_E" dobije se kao suma produkata konstanata u gornjim i lijevim uglovima kvadrata. Konstanta "B_E" dobije se kao suma produkata konstanata u gornjim i desnim uglovima kvadrata. I tako dalje, kao što je prikazano na slici.



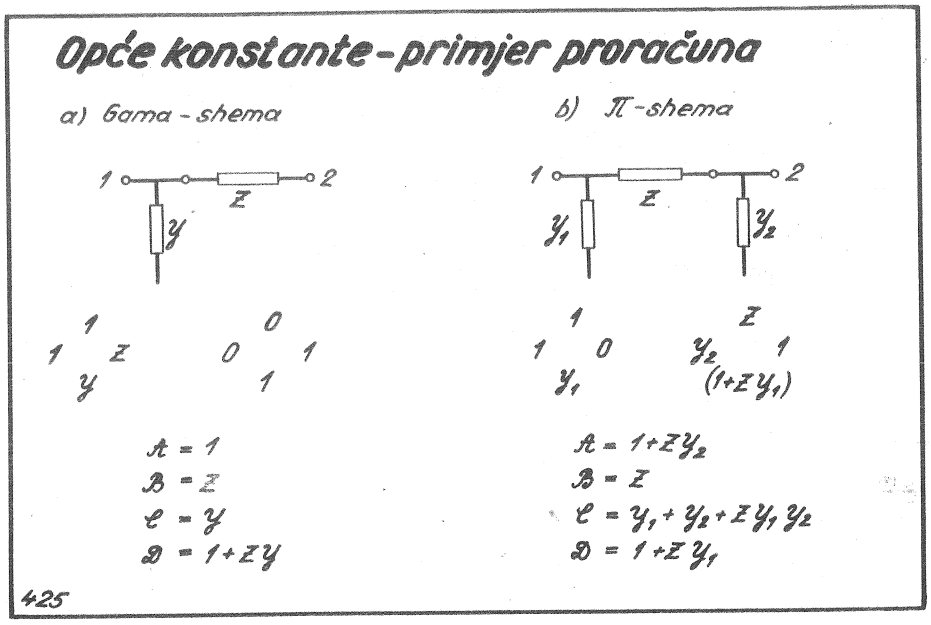
Sl. 16.3



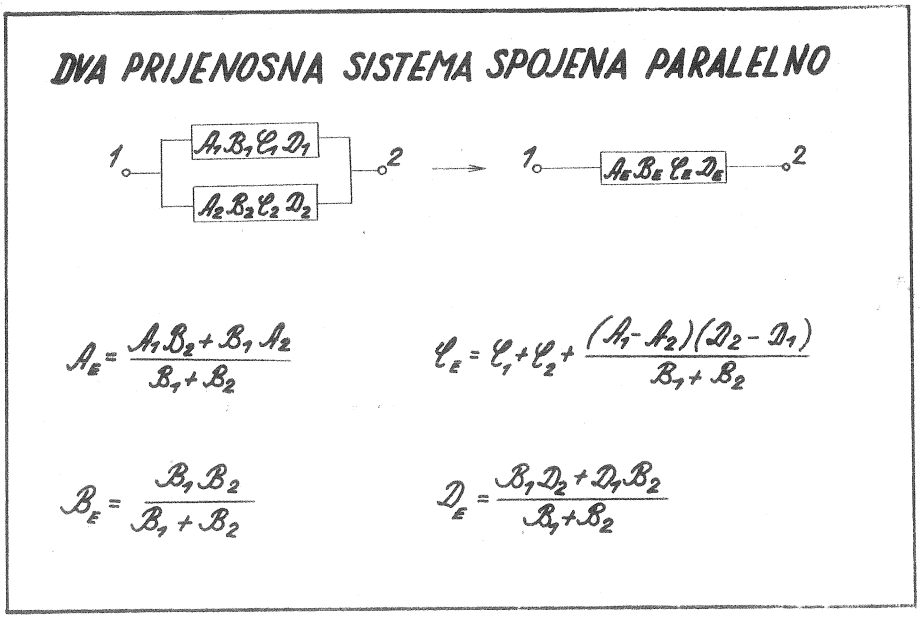
Sl. 16.4

OPĆE KONSTANE GAMA- I PI-SHEME

Kao primjer upotrebe sheme za proračun općih konstanata kod dva sistema u seriji izračunat ćemo opće konstante Gama-sheme i Pi-sheme. Proračun je prikazan na slici 16.5. Kod Gama-sheme je računato, kao da se u seriji nalazi sistem sa samom poprečnom admitancijom i sistem sa samom uzdužnom impedancijom, a tim sistemima smo već prije odredili opće konstante. Kod Pi-sheme je računato, kao da se sistem u obliku Gama sheme nalazi u seriji sa sistemom, koji ima samo poprečnu admitanciju, pri čemu je uzeto da se obje poprečne admitancije medjusobno razlikuju. Proračun je izvršen prema prije prikazanoj shemi, te posebno tumačenje nije potrebno.



Sl. 16.5



Sl. 16.6

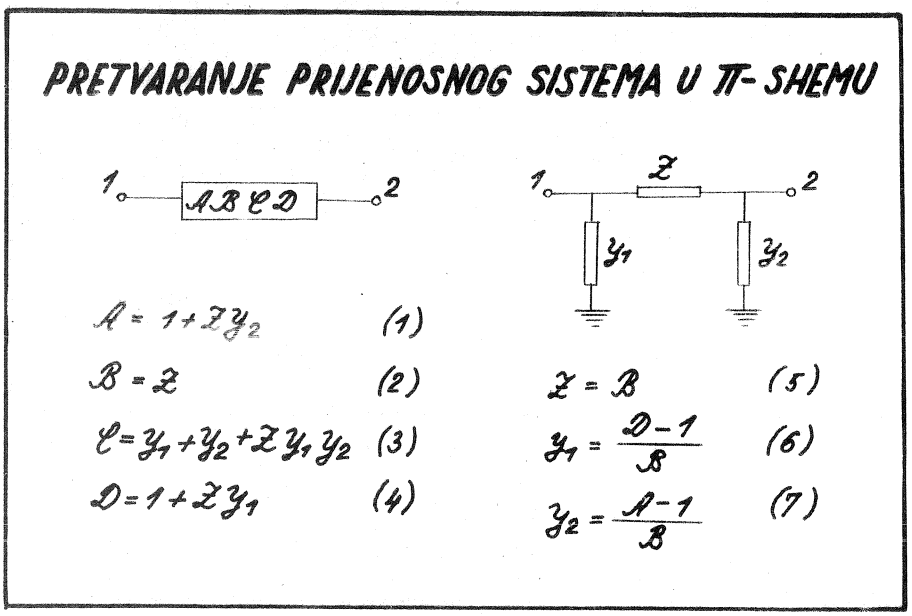
DVA PRIJENOSA SISTEMA SPOJENA PARALELNO

Dva prijenosna sistema, spojena paralelno, možemo pretvoriti u jedan ekvivalentni prijenosni sistem. Izrazi za proračun općih konstanata ekvivalentnog sistema dani su na slici 16.6, ali bez izvoda tih izraza.

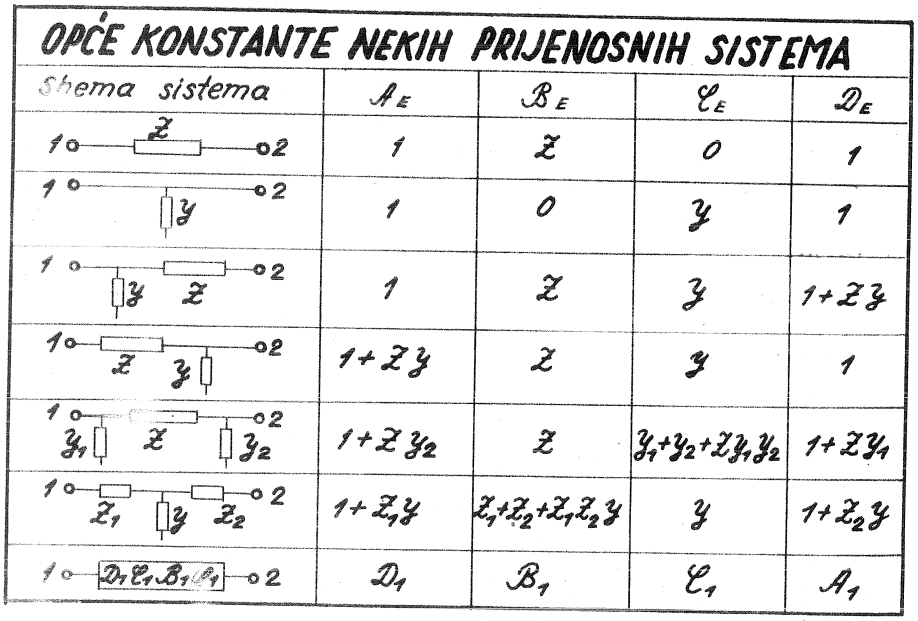
PRETVARANJE PRIJENOSNOG SISTEMA U PI-SHEMU

Bilo kakav prijenosni sistem, koji se sastoji od proizvoljnog broja uzdužnih i poprečnih grana, možemo transfiguracijom reducirati na jednu Pi-shemu.

Prema tome i svaki sistem, definiran pomoću općih konstanti, možemo pretvoriti u Pi-shemu. Izvod potrebnih formula dan je na slici 16.7. Na lijevoj strani slike navedeni su već poznati izrazi (1) do (4) za opće konstante Pi-sheme. Na desnoj strani slike dani su izrazi (5) do (7) za izračunavanje parametara Pi-sheme. Izraz (5) slijedi direktno iz izraza (2). Izraz (6) slijedi iz izraza (4) uz supstituciju izraza (5), a izraz (7) slijedi na isti način iz izraza (1) i (5).



Sl. 16.7



Sl. 16.8

OPĆE KONSTANTE NEKIH PRIJENOSNIH SISTEMA

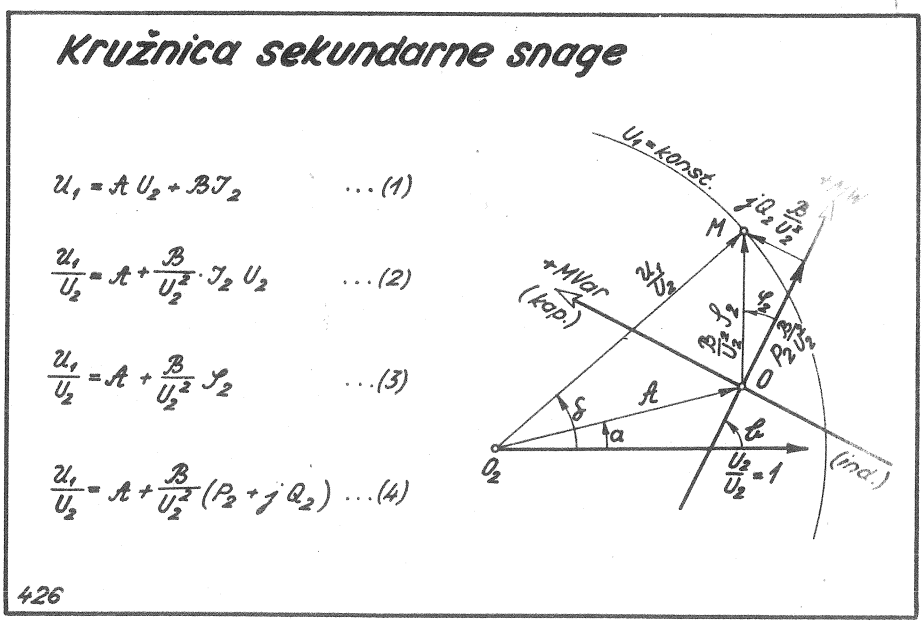
Na slici 16.8 prikazane su opće konstante nekih jednostavnih prijenosnih sistema. Za samu uzdužnu impedanciju odnosno poprečnu admitanciju mogu se

opće konstante lako izračunati po općem postupku, kako je prije objašnjeno. Za ostale navedene sisteme izračunate su opće konstante po prije objašnjenoj shemi za proračun. Često se može dobro koristiti činjenica, da se kod obrnutog prijenosnog sistema (posljednji na slici) medjusobno zamjenjuju konstante "A" i "D", dok konstante "B" i "C" ostaju nepromijenjene.

Za složenije prijenosne sisteme mogu se opće konstante proračunati po opisanim postupcima ili eventualno naći u literaturi.

17. KRUŽNI DIJAGRAMI

Za svaki konkretni slučaj prijenosnog sistema može se konstruirati kružni dijagram, koji nam na grafički način prikazuje odnose izmedju pojedinih električnih veličina u tom prijenosnom sistemu. Iz kružnog dijagrama se mogu brzo i udobno očitati tražene veličine za razna stanja pogona u prijenosnom sistemu, pri čemu je svako pogonsko stanje definirano pripadnom tačkom u dijagramu. Prednost ove metode jest u tome, što se kružni dijagram crta samo jedanput za konkretni prijenosni sistem, a konstrukcija i crtanje je olakšano time, što su linije u dijagramu samo kružnice i pravci.



Sl. 17.1

Konstrukciji kružnih dijagrama može se prići na različite načine. Mi ćemo pokazati osnove za konstrukciju dijagrama, i to za očitavanje napona i snaga. Pri tome ćemo postaviti koordinatni sistem za napone, a zatim koordinatni sistem za snage, te ćemo poći od zadanog napona na kraju prijenosnog sistema "U_2", i konstruirati kružnice sekundarne odnosno primarne snage. Osim ovih familija krivulja, mogu se u kružnom dijagramu konstruirati i mnoge druge familije krivulja, no o tome će biti govora na drugom mjestu, dok ćemo se ovdje ograničiti na najnužnije osnove, koji su nam potrebni za neka druga razmatranja u okviru ovog predmeta.

KRUŽNICA SEKUNDARNE SNAGE

Osnov konstrukcije kružnog dijagrama i konstrukcija kružnice sekundarne snage prikazani su na slici 17.1. Polazimo od jednadžbe za primarni napon općeg prijenosnog sistema, koja je ovdje ponovno napisana, izraz (1). Ako ovaj izraz dijelimo sa "U_2", a drugi član s desne strane jednadžbe još množimo u brojniku i nazivniku sa "U_2", dobijemo izraz (2). Pri tome polazimo od toga da je napon na kraju prijenosnog sistema "U_2" zadan, pa ćemo njegov vektor položiti u realnu os, i zbog toga u navedenim izrazima računamo samo s njegovim iznosom.

Umnožak struje i napona u drugom članu izraza (2) daje nam snagu na kraju prijenosnog sistema (jer je "U_2" položen u realnu os) ili tzv. sekundarnu snagu, pa odatle slijedi izraz (3). Sekundarna snaga u izrazu (3) je prividna snaga, pa je možemo prikazati realnim i imaginarnim članom, kao što je učinjeno u izrazu (4). Tu nam dakle "P_2" prikazuje djelatnu snagu na kraju prijenosnog sistema, a "Q_2" jalovu snagu na kraju, pri čemu "$+Q_2$" znači kapacitivnu, a "$-Q_2$" induktivnu snagu.

Izrazi (3) i (4) izvedeni su na temelju faznih napona i snaga za jednu fazu. Lako je uvidjeti, da isti izrazi vrijede, ako računamo s linijskim naponima i trofaznim snagama. Isto tako umjesto s voltima i voltamperima možemo računati s kilovoltima i megavoltamperima. Tako se redovito i radi, jer je to za praksu najzgodnije. Izrazi (3) i (4) predstavljaju nam osnov za potrebnu konstrukciju kružnog dijagrama.

Postavit ćemo najprije osnovni koordinatni sistem, i to tako da iz točke "O_2" crtamo jedinični vektor udesno. Time je definirana realna os i mjerilo koordinatnog sistema, a dakako da sad možemo crtati i imaginarnu os okomito na realnu (na slici radi veće preglednosti imaginarna os nije nacrtana). Taj ćemo koordinatni sistem koristiti za prikazivanje napona, koji su prema izrazu (3) prikazani kao relativne veličine u odnosu na zadani sekundarni napon "U_2". Prema tome nam nacrtani jedinični vektor već prikazuje sekundarni napon, odnosno, bolje rekuć, njegovu relativnu vrijednost.

Polazeći od ishodišta "O_2" konstruirat ćemo desnu stranu izraza (3) odnosno izraza (4). Najprije crtamo vektor "A", čiji vrh pada u tačku "O", a taj vektor čini s jediničnim vektorom kut "a", što je fazni kut tog vektora. Dalje crtamo vektor, koji pripada drugom članu na desnoj strani u izrazu (3) i dolazimo do tačke "M". Spojnica ishodišta "O_2" i tačke "M" nam prema izrazu (3) daje primarni napon "U_1", odnosno tačnije rečeno, njegovu relativnu vrijednost. Ako postavimo kao uslov, da je iznos primarnog napona konstantan, kretat će se tačka "M" po kružnici, kojoj središte pada u tačku "O_2".

Radi lakšeg rada s kružnim dijagramom, konstruirat ćemo koordinatni sistem snaga. Ako na crtežu prikažemo vektor sa sekundarnom snagom prema izrazu (4), onda smo u stvari vektor "OM" prikazali s dvije komponente. Prva komponenta je za dani prijenosni sistem i zadani napon na kraju direktno proporcionalna djelatnoj snazi, a druga je proporcionalna jalovoj snazi. Smjerovi tih komponenata nam dakle daju smjerove koordinatnih osi za snagu, polazeći od tačke "O" kao ishodišta, a faktor proporcionalnosti nam daje mjerilo tog koordinatnog sistema. Tako smo dobili koordinatni sistem snaga, u kojem nam tačka "M" definira snagu na kraju voda. Kružnicu "U_1 = konst." u tom koordinatnom sistemu zovemo kružnicom sekundarne snage.

Za različite vrijednosti iznosa primarnog napona "U_1" dobit ćemo, dakako, čitavu familiju kružnica, a sve će imati središte u ishodištu koordinatnog sistema napona, tj. u tački "O_2".

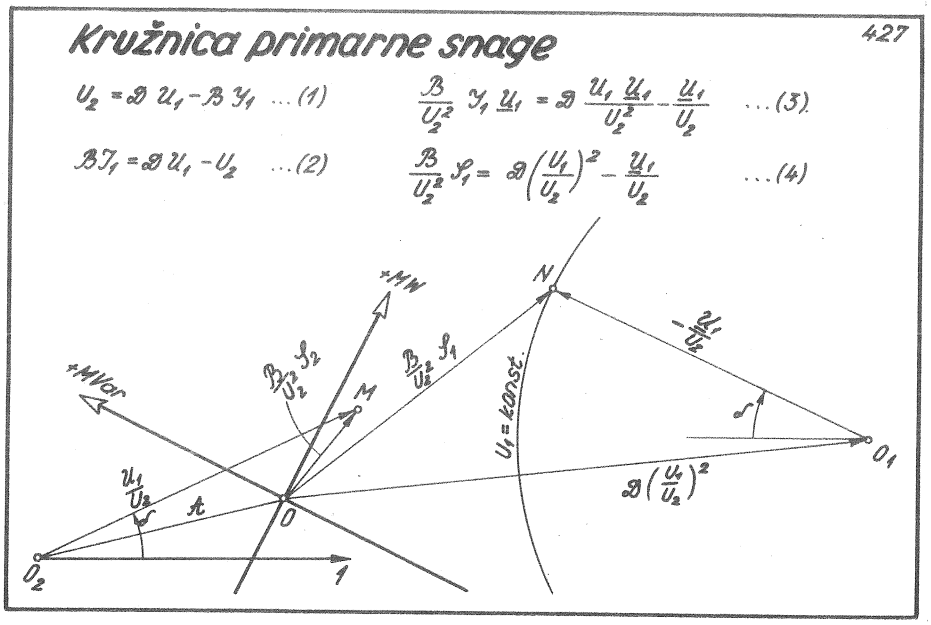
Iz ovako konstruiranog kružnog dijagrama za određeni prijenosni sistem i za zadani sekundarni napon, možemo vrlo lako očitati za bilo koju sekundarnu snagu koliki primarni napon joj pripada.

KRUŽNICA PRIMARNE SNAGE

Prije prikazana konstrukcija nam omogućuje, da za zadanu sekundarnu snagu odredimo primarni napon. No nas će interesirati da odredimo i primarnu snagu. To možemo učiniti koristeći kružnicu primarne snage u dijagramu, pa ćemo njezinu konstrukciju sada prikazati. Potrebni matematski izrazi i crtež prikazani su na slici 17.2.

Polazimo od izraza za sekundarni napon općeg prijenosnog sistema, koji je ovdje ponovno napisan, izraz (1). Ako ga malo preuredimo, dobijemo izraz (2). Sad ćemo izraz (2) podijeliti s kvadratom sekundarnog napona i ujedno pomnožiti s konjugirano kompleksnom vrijednošću primarnog napona, pa tako dobijemo izraz (3), gdje je konjugirano kompleksna vrijednost označena s crticom odozdo. Umnožak struje i konjugirano kompleksne vrijednosti primarnog napona u izrazu (3) daje nam primarnu snagu, pa to možemo pisati kao što je učinjeno u izrazu (4). To će nam biti podloga za konstrukciju kružnice primarne snage.

Polazimo od ishodišta koordinatnog sistema snaga "O" i crtamo najprije prvi član desne strane u izrazu (4). Vrh tog vektora daje nam tačku "O1". Sad iz te tačke crtamo drugi član desne strane izraza (4), pa nam vrh tog vektora daje tačku "N". Vektor "O_1N" ima istu dužinu kao vektor "O_2M", i ta dužina odgovara iznosu primarnog napona. Kut tog vektora prema horizontali je isti kao i za vektor"O_2M", samo mjeren u drugom smislu. Ako postavimo uslov da je "U_1 = konst.", onda će se tačka "N" kretati po kružnici sa središtem "O_1". To je u



Sl. 17.2

stvari kružnica primarne snage.

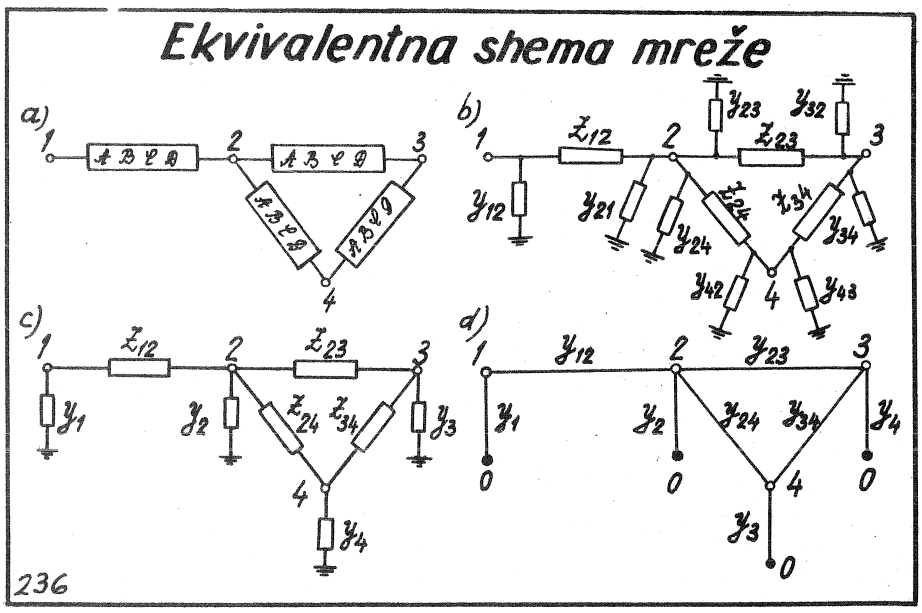
Spojnica "ON" nam prema izrazu (4) daje lijevu stranu izraza (4), dakle primarnu snagu pomnoženu s istim faktorom, kao što smo prije imali kod izraza za sekundarnu snagu. Tačka "N" nam dakle definira primarnu snagu u istom koordinatnom sistemu, koji smo imali i za sekundarnu snagu. Prednost prikazivanja primarne i sekundarne snage u istom koordinatnom sistemu je očita, ali neka bude spomenuto barem to, da nam spojnica "MN" daje gubitke snage u prijenosnom sistemu, jer je to razlika primarne i sekundarne snage.

Ako crtamo kružnice primarne snage za različite vrijednosti primarnog napona, dobit ćemo opet familiju kružnica, samo što im središta neće pasti u istu tačku, nego će svaka kružnica imati drugo središte, koje treba posebno konstruirati. Pomoću te familije kružnica i pomoću kuta " δ " možemo za svaku tačku "M" lako naći pripadnu tačku i tako očitati primarnu snagu.

G l a v a IV

R A Z N I P R O B L E M I M R E Ž A

18. PRORAČUN ELEKTRIČNIH MREŽA



Sl. 18.1

EKVIVALENTNA SHEMA MREŽE

Svaka se mreža sastoji od izvjesnog broja čvorišta, a izmedju nekih parova čvorišta nalaze se - općenito govoreći - prijenosni sistemi, kao što je to prikazano kao primjer na skici a slike 18.1. Svaki prijenosni sistem, kako god on bio zadan, možemo u zadnjoj liniji pretvoriti u Pi-shemu, kao što je već prije bilo prikazano, pa tako dobijemo situaciju prikazanu na skici b.

Sve poprečne grane uz jedno čvorište možemo skupiti u jednu granu, pa dobijemo ekvivalentnu shemu kao na skici c, koja se sastoji od po jedne uzdužne grane izmedju dva čvorišta i po jedne poprečne grane u svakom čvorištu. (U tome je prednost Pi-sheme pred T-shemom u ovom slučaju). U zadnjoj liniji, i "zemlju" možemo smatrati jednim čvorištem, pa u dobivenoj shemi mreže ne moramo više razlikovati uzdužne i poprečne grane. To je prikazano na skici d, gdje su čvorišta "zemlja" označena sa "O" (a to je u stvari sve jedno čvorište). Grane možemo sve označiti na isti način (npr. kao admitancije), a obično se niti ne crta simbol za impedanciju nego samo potez izmedju dva čvorišta.

Redovito u mreži imamo i potrošače. Njih možemo prikazati kao admitanciju "Y" izmedju čvorišta i "zemlje", gdje je $Y = S/U^2$. Tu je S = snaga potrošača, a U = nazivni napon. Ovaj način uzimanja potrošača u račun nije tačan, ako se napon na tom mjestu razlikuje od nazivnoga (što je redoviti slučaj). Zato često vršimo naknadnu korekciju pa admitanciju, koja prikazuje potrošača, korigiramo prema naponu, koji izračunamo da vlada u tom čvorištu.

Ukoliko u mreži (ili promatranom dijelu mreže) nema nikakvih elektromotornih sila, onda je nazivamo "pasivnom mrežom". Ukoliko pak imamo u mreži elektromotorne sile, onda je to "aktivna mreža", te u ekvivalentnu shemu mreže moramo ucrtati i elektromotorne sile u seriju s admitancijom pripadne grane.

PASIVNA MREŽA PROMATRANA IZ NEKOLIKO ČVORIŠTA

Svaku pasivnu mrežu (bez obzira koliko čvorišta i grana imala) možemo promatrati iz proizvoljno malog broja čvorišta, ali s granama izmedju svih parova čvorišta. Kolike su te grane, možemo odrediti eksperimentalnim putem, kao što je prikazano na slici 18.2.

a) Ako nepoznatu mrežu promatramo kroz dva čvorišta, onda nam se ona predstavlja kao jedna grana, koju možemo izračunati iz odnosa narinutog napona i struje, koja u mrežu ulazi odnosno izlazi kroz ta dva čvorišta.

b) Ako nepoznatu mrežu promatramo kroz tri čvorišta, dobijemo tri grane u trokutu. Mjerenjem prikazanim na slici, dobijemo veličinu dviju grana "Z_{13}" i "Z_{23}", a u grani 1-2 u tom slučaju ne teče struja, jer su čvorišta 1 i 2, na istom potencijalu. Permutirajući tačke 1, 2, 3, prema mjernim instrumentima, dobijemo daljnje podatke za izračunavanje treće grane. U stvari svaku granu dobijemo izračunatu dva puta, što ujedno služi kao kontrola.

c) Ako nepoznatu mrežu promatramo kroz četiri čvorišta, dobijemo šest grana općeg četverokuta. Mjerenjem prikazanim na slici dobijemo veličinu triju grana, a permutirajući čvorišta dobijemo veličinu i ostalih grana, i opet svaku granu dva puta.

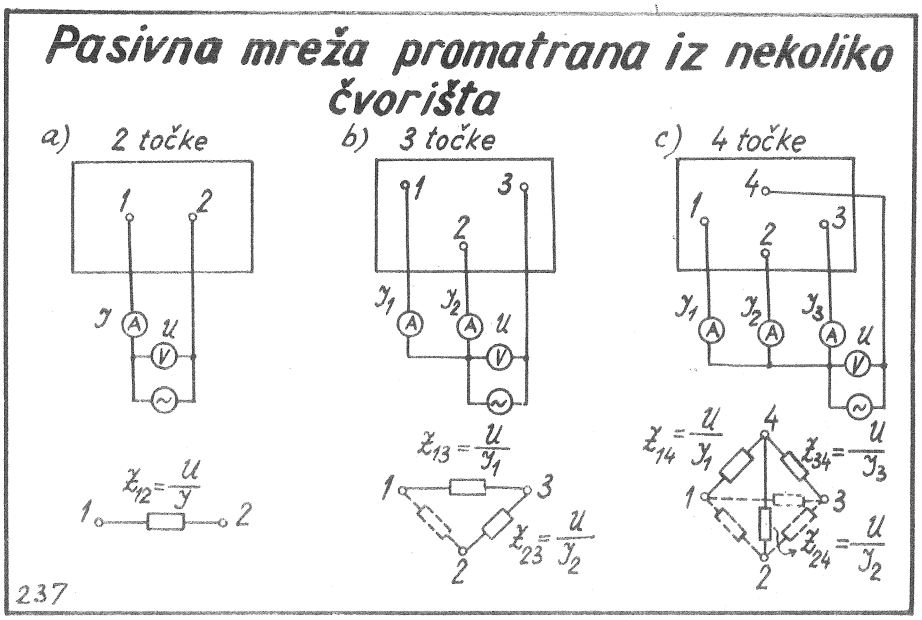
Drugim riječima to nam znači, da svaku pasivnu mrežu možemo reducirati na "n" čvorišta, s granama izmedju svakog para čvorišta, tj. sa $\frac{n(n-1)}{2}$ grana.

REDUKCIJA PASIVNE MREŽE

Svaku pasivnu mrežu možemo promatrati kroz proizvoljno mali broj čvorišta, kao što je to već bilo pokazano, drugim riječima svaku pasivnu mrežu možemo reducirati na proizvoljni broj čvorišta. Osim eksperimentalnog postupka, koji je prije bio objašnjen, možemo redukciju izvršiti i računskim putem pomoću transfiguracije mreže.

Opći postupak transfiguracije (koji uvijek možemo upotrijebiti kod svake mreže bez obzira na njezinu konfiguraciju) jest pretvaranje zvijezde u poligon. Taj se postupak može primijeniti kod svake zvijezde (bez obzira na njezin broj krakova), a transfiguracijom dobijemo opći poligon s čvorištima, koja su prije bila vrhovi zvijezde, i s granama izmedju svakog para čvorišta. Na taj način svakom takvom transfiguracijom dobijemo u mreži jedno čvorište manje.

Nakon jedne transfiguracije redovito izmedju nekih parova čvorišta dobijemo po dvije paralelne grane, koje treba - dakako - spojiti u jednu. Svakom daljnjom transfiguracijom ukidamo po jedno daljnje čvorište, dok ne ostanu samo ona čvorišta mreže, koja želimo.



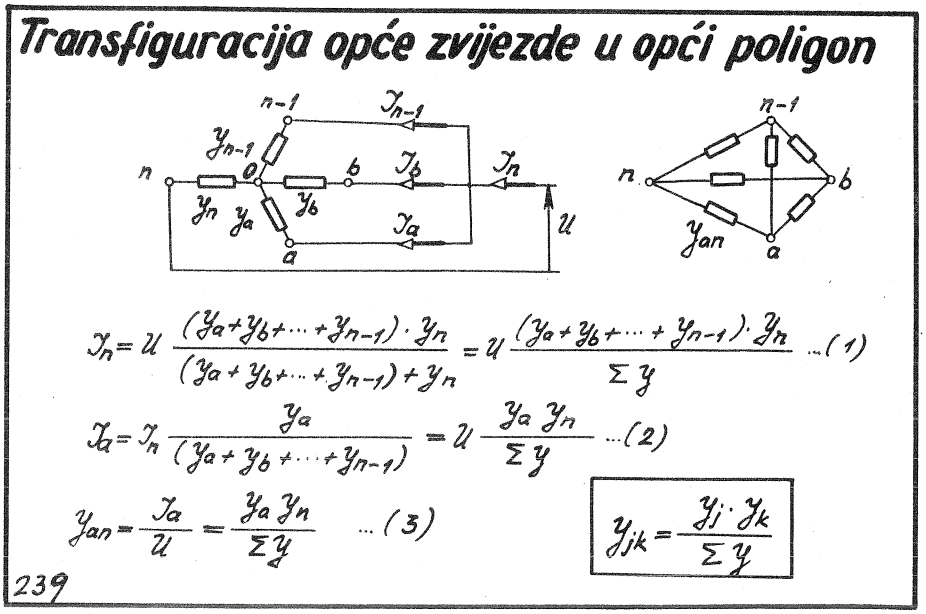
Sl. 18.2

Pretvaranje zvijezde u opći poligon je uvijek moguće, dok je obrnuto, pretvaranje poligona u zvijezdu, moguće samo kao pretvaranje trokuta u trokraku zvijezdu. Zbog toga kao opću metodu upotrebljavamo pretvaranje zvijezde u poligon. Formule, koje u tu svrhu upotrebljavamo, sadržavaju admitancije pojedinih grana, pa u tu svrhu moramo kod postavljanja mreže upisati njihove admitancije.

TRANSFIGURACIJA OPĆE ZVIJEZDE U OPĆI POLIGON

Već je prije bilo pokazano, da bilo kakvu mrežu možemo prikazati s proizvoljno malim brojem čvorišta, ali s granama izmedju svakog para čvorišta. Prema tome i zvijezdu s proizvoljnim brojem krakova možemo prikazati pomoću svih njezinih čvorišta osim zvijezdišta, i granama izmedju svakog para čvorišta. To znači da opću zvijezdu (bez obzira na broj krakova) možemo transfigurirati u opći poligon s vrhovima, koji su bili prije vrhovi zvijezde i s granama izmedju svakog para tih vrhova.

Izvod formule za takvu transfiguraciju dan je na slici 18.3, gdje je kao mreža prikazana n-kraka zvijezda. Na vrhove te zvijezde (jer želimo promatrati mrežu samo kroz ta čvorišta) primijenimo mjerenje, kao što je bilo pokazano na slici 18.2. Ukupna struja "I_n", koja ulazi u mrežu i izlazi kroz čvorište "n", dana je umnoškom napona i admitancije tako spojene mreže. Ta se admitancija sastoji od paralelno spojenih admitancija "Y_a", "Y_b" do "Y_{n-1}", koje su dalje spojene u seriju s admitancijom "Y_n". Na taj način za struju "I_n" dobijemo izraz (1).



$$I_n = U \frac{(y_a + y_b + \dots + y_{n-1}) \cdot y_n}{(y_a + y_b + \dots + y_{n-1}) + y_n} = U \frac{(y_a + y_b + \dots + y_{n-1}) \cdot y_n}{\Sigma y} \quad \dots (1)$$

$$I_a = I_n \frac{y_a}{(y_a + y_b + \dots + y_{n-1})} = U \frac{y_a y_n}{\Sigma y} \quad \dots (2)$$

Sl. 18.3

Struja "I_a" kroz granu "Y_a" zvijezde odnosi se prema ukupnoj struji "I_n" kao admitancija "Y_a" prema sumi paralelnih admitancija "Y_a" do "Y_{n-1}". Tako za struju "I_a" dobijemo izraz (2).

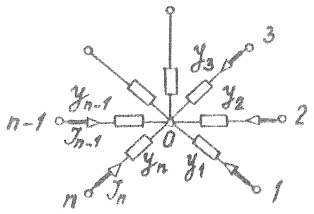
Admitancija "Y_{an}" grane poligona dobiva se iz izmjerene struje "I_a" i napona "U", kao što je već bilo pokazano. Ako taj izraz koristimo ovdje, to uz pomoć izraza (2) dobijemo konačno za admitanciju "Y_{an}", izraz (3).

Iz razloga simetrije i izrazi za admitancije ostalih grana općeg poligona su analogni, pa opći izraz za admitanciju grane općeg poligona možemo pisati, kako je napisano i uokvireno na slici.

ODREDJIVANJE NAPONA U ZVJEZDIŠTU

Izvod formule za napon u zvjezdištu rekonstruirane zvijezde dan je na slici 18.4. Admitancije grana u zvijezdi su poznate od prije. Naponi u vrhovima zvijezde su poznati iz proračuna prilika u reduciranoj mreži. Napon zvjezdišta slijedi iz ovog razmatranja.

Određivanje napona u zvjezdištu



$$\Sigma J = J_1 + J_2 + J_3 + \cdots + J_n = 0 \qquad \ldots(1)$$

$$(U_1 - U_o)Y_1 + (U_2 - U_o)Y_2 + (U_3 - U_o)Y_3 + \cdots + (U_n - U_o)Y_n = 0 \qquad \ldots(2)$$

$$U_1 Y_1 + U_2 Y_2 + U_3 Y_3 + \cdots + U_n Y_n = U_o (Y_1 + Y_2 + Y_3 + \cdots + Y_n) \ldots(3)$$

$$U_o = \frac{\Sigma U Y}{\Sigma Y} \qquad \ldots(4)$$

240

Sl. 18.4

Suma struja u pojedinim krakovima zvijezde mora biti jednaka nuli, izraz (1). Struju pojedine grane možemo dobiti kao razliku napona na krajevima te grane pomnoženu s admitancijom grane, pa tako za sve grane dobijemo izraz (2). Ako taj izraz sredimo tako da članovi s naponom U_o dođju svi na jednu stranu, dobijemo izraz (3) i konačno izraz (4) za napon zvjezdišta.

TRANSFIGURACIJA MREŽE - PRIMJER

Jedan primjer za transfiguraciju mreže dan je na slici 18.5. Radi jednostavnosti admitancije nisu uzete kao kompleksne veličine (to je slučaj kod istosmjerne struje ili kod izmjenične ako se zanemare djelatni otpori). Na skici I prikazana je zadana mreža s upisanim admitancijama. Zaokružena čvorišta su ona koja želimo zadržati. Grane zvijezde, koju želimo transfigurirati u opći poligon prekrižene su kratkim crticama. Uz skicu I navedeni su potrebni računi za transfiguraciju, pa se dobije rezultat kao na skici II, gdje su grane novog općeg poligona prikazane crtkano. Admitancije paralelnih grana treba zbrojiti, pa su potrebni računi tu navedeni. Tako se dobije mreža prema skici III. Postupljeno je opet na isti način, pa je jedna zvijezda transfigurirana u trokut i dobivena mreža po skici IV, a nakon spajanja paralelnih grana dobivena je mreža po skici V. Tu je opet provedena transfiguracija i na istoj skici nacrtane su novo nastale grane, te su upisane njihove admitancije (računi nisu navedeni). Konačno dobivamo transfiguriranu mrežu prema skici VI.

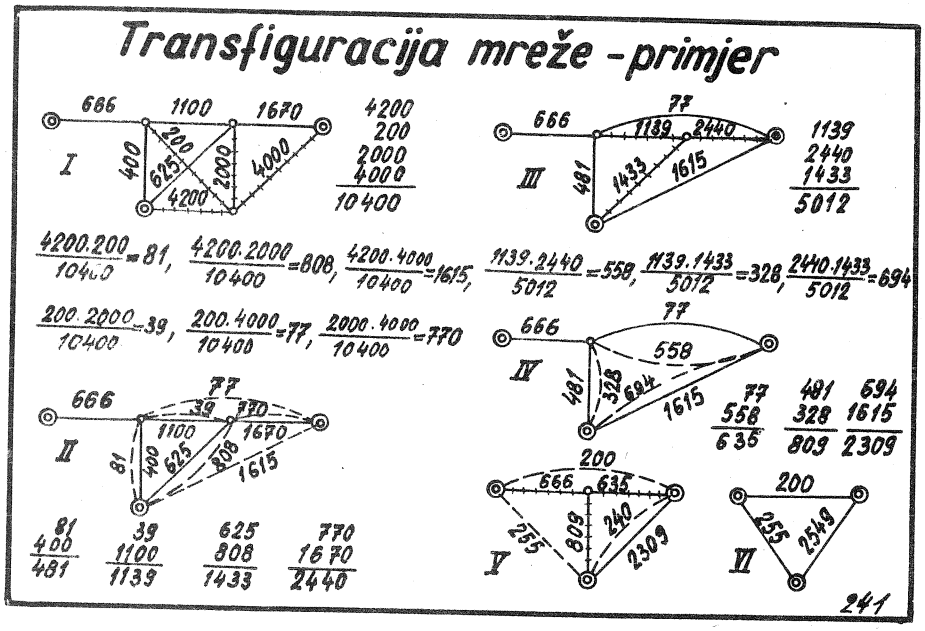
PRORAČUN MREŽE POMOĆU TRANSFIGURACIJE

Na slici 18.6 dana je shema proračuna mreže pomoću transfiguracije. Ponovno treba naglasiti, da se transfiguracija opće zvijezde u opći poligon može uvijek provesti, i zato možemo ukidati pojedina čvorišta potpuno proizvoljnim redom. Redukciju treba izvršiti dotle, dok ne ostanu samo ona čvorišta mreže koja omogućuju proračun.

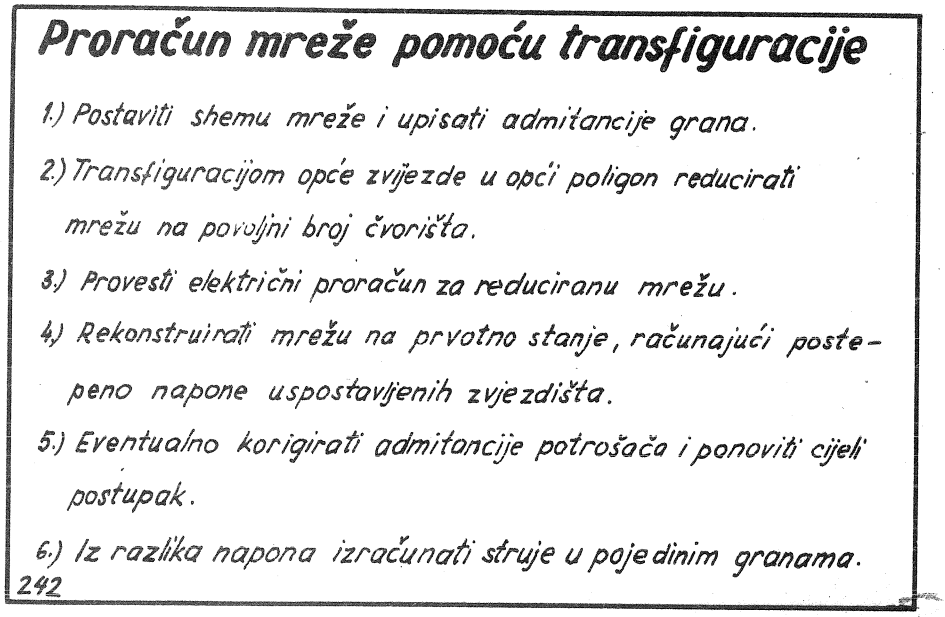
AKTIVNA MREŽA PROMATRANA IZ DVA ČVORIŠTA

Aktivna mreža, promatrana iz dva čvorišta 1 i 2, može se nadoknaditi elektromotornom silom "E_{12}" u seriji s impedancijom "Z_{12}". Elektromotorna sila "E_{12}" jednaka je naponu izmedju ta dva čvorišta, ako se mreža na tom mjestu otvori. Impedancija "Z_{12}" je jednaka impedanciji izmedju dva čvorišta, ako se sve elektromotorne sile u mreži ponište. To je poznati Thévenin-ov teorem.

Elektromotorna sila "E_{12}" se može odrediti kao što je na slici 18.7 prikazano u pokusu I, a impedancija kao što je prikazano u pokusu II.



Sl. 18.5



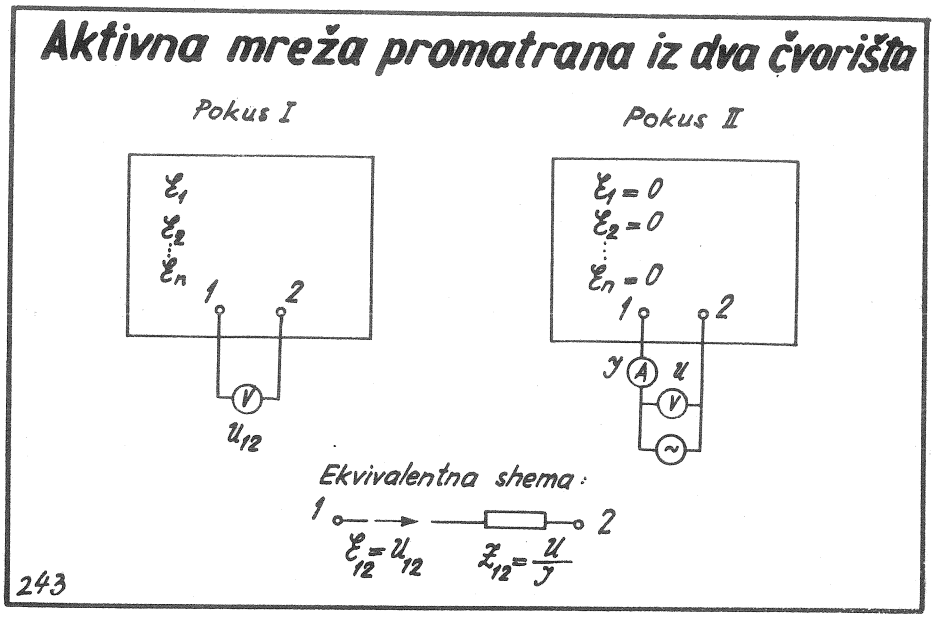
Sl. 18.6

Thévenin-ov teorem se često primjenjuje u mrežama kod proračuna kratkog spoja.

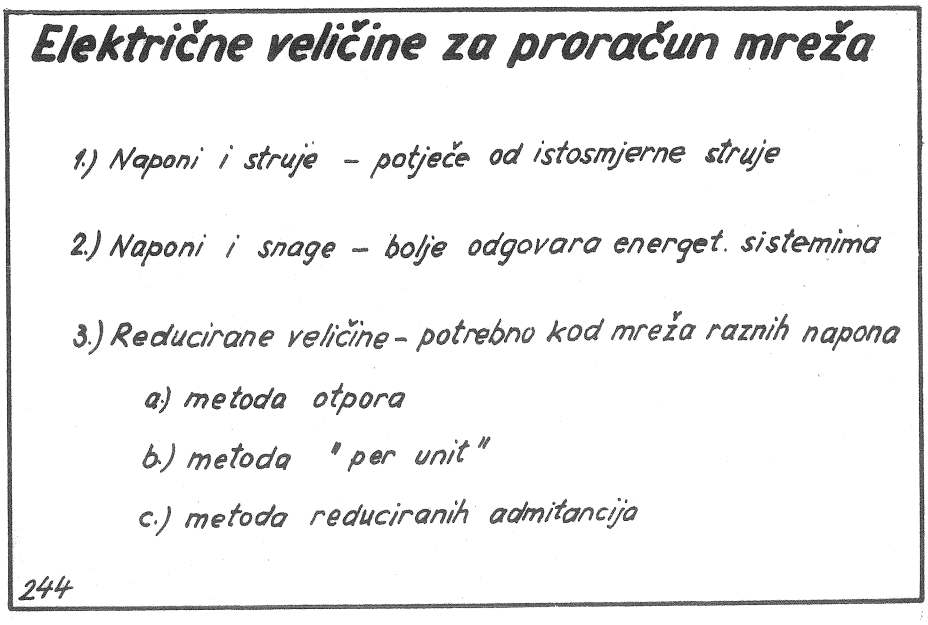
ELEKTRIČNE VELIČINE ZA PRORAČUN MREŽA

Postupci u pogledu toga, s kojim električnim veličinama ćemo provesti proračun mreža, prikazani su na slici 18.8.

1) U prvom redu dolazi u obzir da računamo napone i struje u mreži, koji postupak potječe još od proračuna mreža istosmjerne struje. Izvedene formule mogu se u tom slučaju upotrijebiti bez ikakvih promjena.


Aktivna mreža promatrana iz dva čvorišta
Pokus I
Pokus II
$\mathcal{E}_1$
$\mathcal{E}_2$
$\mathcal{E}_n$
1
2
V
U_{12}
$\mathcal{E}_1 = 0$
$\mathcal{E}_2 = 0$
$\mathcal{E}_n = 0$
J
A
U
V
Ekvivalentna shema:
1
2
$\mathcal{E}_{12} = U_{12}$
$Z_{12} = \frac{U}{J}$
243

Sl. 18.7


Električne veličine za proračun mreža
1.) Naponi i struje – potječe od istosmjerne struje
2.) Naponi i snage – bolje odgovara energet. sistemima
3.) Reducirane veličine – potrebno kod mreža raznih napona
a.) metoda otpora
b.) metoda "per unit"
c.) metoda reduciranih admitancija
244

Sl. 18.8

2) Za mreže energetskih sistema, medjutim, bolje odgovara proračun s naponima i snagama, jer nas u stvari snage više interesiraju nego struje. U tom slučaju treba formule nešto preinačiti, da bi se umjesto sa strujama moglo računati sa snagama.

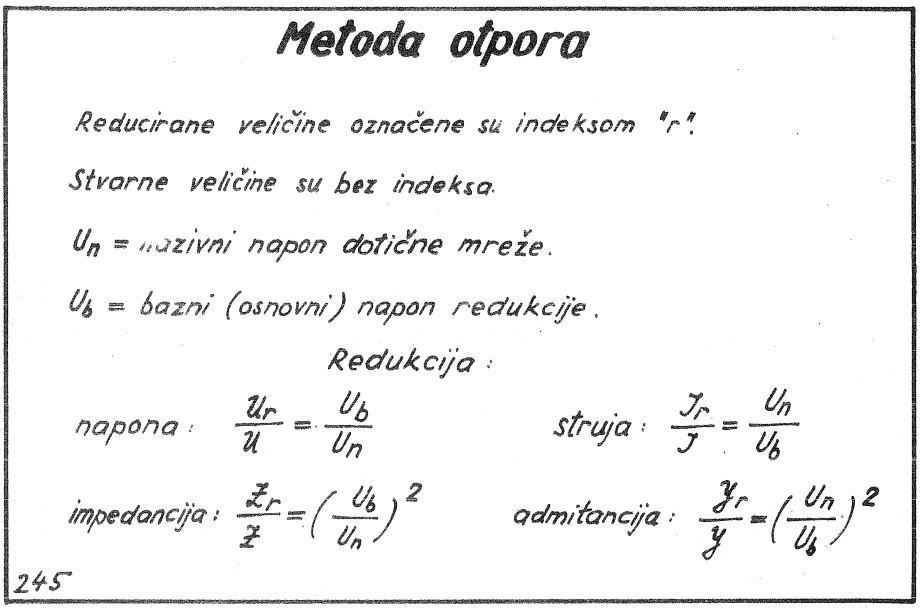
3) Kod mreža s različitim naponima treba u svakom slučaju vršiti redukciju raznih električnih veličina. Tu postoje razne mogućnosti, koje će biti posebno razmotrene.

METODA OTPORA

Metoda otpora se sastoji u tome, da se pojedine grane mreže prikažu pomoću otpora (odnosno impedancija ili admitancija), koji su svi reducirani na jedan (proizvoljno odabrani) osnovni ili bazni napon, slika 18.9. Poznato je, da se u tom slučaju moraju svi naponi reducirati u odnosu baznog napona i nazivnog napona dotične mreže, struje se moraju reducirati u obrnutom odnosu, impedancije s kvadratom tog odnosa, a admitancije u obrnutom odnosu na kvadrat.

Ako se umjesto sa strujama radi sa snagama, očito da snage ne treba reducirati.

Cijeli se račun provodi s reduciranim veličinama, a zatim se po potrebi izračunate reducirane veličine vrate natrag na stvarne, jasno s obrnutim odnosom redukcije.



Sl. 18.9

METODA "PER-UNIT"

Metoda "per-unit" sastoji se u tome, da se sve veličine prikažu relativnim brojevima bez dimenzije, kao dio odabrane osnovne ili bazne veličine. Kao bazna snaga se odabere jedna te ista veličina za čitavu mrežu, npr. S_b = = 2oo MVA, i sad se sve snage u reduciranim veličinama izražavaju prema toj snazi, tako da S_r = 1 znači snagu S = 2oo MVA, S_r = o,5 znači snagu S = 1oo MVA, itd. Naponi se pak reduciraju prema nazivnom naponu dotične mreže (U_b = U_n), tako da U_r = 1 znači upravo nazivni napon. Ostale bazne veličine (za struju, impedanciju i sl.) slijede onda same po sebi, vidi sliku 18.1o.

Relativne veličine, koje su obično zadane kod transformatora i generatora (napon kratkog spoja odnosno relativne reaktancije), dane su prema nazivnoj snazi dotičnog transformatora ili generatora, pa ih kod ove metode treba reducirati na odabranu baznu snagu, tj. treba ih množiti s omjerom $(\frac{S_b}{S})$. Analogno treba reducirati i veličine, koje su dane kao impedancije, prikazujući ih kao dio bazne impedancije, itd. Na taj način sve veličine u mreži, pa makar ta mreža imala i nekoliko različitih napona, svedemo na istu bazu.

METODA "PER UNIT"

I) Bazne (osnovne) veličine:

Za sve mreže: snaga = S_b (izabrana proizvoljno)

Za mreže nazivnog napona U_n:

napon = $U_b = U_n$

struja = $I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3}\cdot U_n}$ (iz uslova: $S_b = \sqrt{3}\cdot U_b I_b$)

impedancija = $Z_b = \frac{U_b/\sqrt{3}}{I_b} = \frac{U_n^2}{S_b}$

II) Reducirane veličine:

$$S_r = \frac{S}{S_b}, \quad U_r = \frac{U}{U_n}, \quad I_r = \frac{I}{I_b}, \quad Z_r = \frac{Z}{Z_b}; \quad Z_r = u_k \frac{S_b}{S}$$

Sl. 18.1o.

METODA REDUCIRANIH ADMITANCIJA

Metoda reduciranih admitancija sjedinjuje u sebi obje prije opisane metode s reduciranim veličinama (metoda otpora i metoda "per-unit"), a osim toga barata samo admitancijama, što donosi daljnje prednosti u postupku. Ako kod metode otpora kao bazni napon ne uzmemo ni jedan napon iz mreže nego postavimo U_b = 1 kV, ili ako u metodi "per-unit" kao baznu snagu ne uzmemo nijednu od postojećih snaga u mreži nego postavimo S_b = 1 MVA, i pri tome računamo samo s admitancijama, dobit ćemo upravo ono, što nazivamo metodom reduciranih admitancija. Time što smo uzeli U_b = 1 kV (a ne neki proizvoljni napon) ili što smo uzeli S_b = 1 MVA (a ne neku proizvoljnu snagu) odbacili smo iz metode svaku proizvoljnost, pa je donekle i za očekivati, da ćemo od toga imati koristi.

Nadalje kod ove metode želimo radi kratkoće postupka računati s trofaznim veličinama (a ne jednofaznim), pa ćemo kao bazni napon U_b uzeti linijski napon, a ne fazni. Koristeći sad izraze za metodu otpora i metodu "per-unit" dobijemo izraze kao na slici 18.11. Izraz (1) vrijedi za reducirani napon, koji je brojčano jednak relativnom naponu (u odnosu na nazivni). Izraz (2) vrijedi za reduciranu struju (budući da radimo trofazno, moramo u metodi otpora još množiti s $\sqrt{3}$) koja je brojčano jednaka snazi te struje uz nazivni napon. Izrazi (3) i (4) daju reduciranu admitanciju, ako je zadana bilo stvarna impedancija bilo stvarna admitancija, a brojčana vrijednost tih izraza jednaka je snazi kratkog spoja tog elementa mreže, ako mu na jednom kraju narinemo nazivni napon, a na drugom ga kratko spojimo.

Ako računamo reduciranu admitanciju iz zadane vrijednosti relativnog napona kratkog spoja (što se odnosi na transformator, dok bi kod generatora imali zadanu relativnu reaktanciju), dobijemo izraz (5), koji je opet brojčano jednak snazi kratkog spoja. Vidimo da reducirane admitancije računate na jedan ili drugi način imaju uvijek istu vrijednost.

Kao što vidimo, reducirani napon jednak je relativnom naponu, a to je veličina, koja je za praksu jako prikladna. Reducirana struja brojčano je jednaka trofaznoj snazi te struje uz nazivni napon, a to znatno skraćuje račun i čini postupak preglednijim, jer možemo računati s jednostavnim formulama (izvedenima za struje i napone), a računamo s brojčanim vrijednostima snage, što je u energetskim sistemima prikladnije.

Reducirana admitancija pojedinog elementa mreže ima brojčanu vrijednost snage kratkog spoja tog elementa. To opet čini račun znatno preglednijim i kraćim, jer je npr. reducirana admitancija potrošača brojčano jednaka snazi

tog potrošača, ili npr. ako mrežu transfiguracijom svedemo na jednu granu, onda je reducirana admitancija te grane jednaka snazi kratkog spoja mreže na tom mjestu, itd.

METODA REDUCIRANIH ADMITANCIJA

$U_b = 1$ u metodi otpora	$S_b = 1$ u metodi "per unit"	
$\mathcal{U}_r = \mathcal{U}\frac{U_b}{U_n} = \frac{\mathcal{U}}{U_n}$,	$\mathcal{U}_r = \frac{\mathcal{U}}{U_n}$.	(1)
$\mathcal{I}_r = \mathcal{I}\frac{U_n}{U_b}\sqrt{3} = \sqrt{3}\cdot U_n\mathcal{I}$,	$\mathcal{I}_r = \frac{\mathcal{I}}{\frac{S_b}{\sqrt{3}\cdot U_n}} = \sqrt{3}\cdot U_n\mathcal{I}$	(2)
$y_r = \frac{1}{\mathcal{Z}\left(\frac{U_b}{U_n}\right)^2} = \frac{U_n^2}{\mathcal{Z}}$,	$y_r = \frac{1}{\mathcal{Z}_r} = \frac{\mathcal{Z}_b}{\mathcal{Z}} = \frac{U_n^2}{S_b\mathcal{Z}} = \frac{U_n^2}{\mathcal{Z}}$	(3)
$y_r = y\left(\frac{U_n}{U_b}\right)^2 = U_n^2 y$,	$y_r = \frac{U_n^2}{\mathcal{Z}} = U_n^2 y$	(4)
$y_r = \frac{U_n^2}{\mathcal{Z}} = \frac{U_n^2}{\frac{u_k\cdot U_n}{\sqrt{3}\,I}} = \frac{\sqrt{3}\,U_n I}{u_k} = \frac{S}{u_k}$,	$y_r = \frac{1}{\mathcal{Z}_r} = \frac{S}{u_k S_b} = \frac{S}{u_k}$,	(5)

Sl. 18.11

METODA REDUCIRANIH ADMITANCIJA - PREGLED FORMULA

Dio mreže:	Zadano:	Reducirana admitancija
Vod	$\mathcal{Z}$ = impedancija y = admitancija U_n = nazivni napon	$y = \frac{U_n^2}{\mathcal{Z}} = U_n^2 y$
Transformator	S = nazivna snaga u_k = rel. nap. kr. spoja p_k = rel. gub. kr. spoja i_o = rel. struja pr. hoda p_o = rel. gub. pr. hoda	Uzdužna gr.: $Y_r = \frac{S}{u_k}$, $\cos\eta = \frac{p_k}{u_k}$ Poprečna grana: $Y_r = S\cdot i_o$, $\cos\eta = \frac{p_o}{i_o}$
Generator	S = nazivna snaga x = relativna reakt. R = djelatni otpor U_n = nazivni napon	$Y_r = \frac{S}{x}$, $\cos\eta = \frac{R}{U_n^2}\cdot Y_r$

Sl. 18.12

METODA REDUCIRANIH ADMITANCIJA - PREGLED FORMULA

Pregled formula za proračun reduciranih admitancija za pojedine elemente mreže dan je na slici 18.12. Kod voda su obično poznate impedancije odnosno admitancije pojedinih grana i nazivni napon, pa dolaze u obzir formule, koje su već prije izvedene. Kod transformatora treba, osim snage, ostale podatke dati kao relativne veličine, pa je onda lako izračunati iznos "Yr" i kut "η" reducirane admitancije za uzdužnu i poprečnu granu. Slično je kod generatora, gdje medjutim, redovito zanemarujemo djelatni otpor.

REDUCIRANE ADMITANCIJE DUGOG VODA - PRIMJER

Na slici 18.13 je primjera radi pokazano, kako se odredjuju reducirane admitancije dugog voda prikazanog pomoću tačne ekvivalentne Pi-sheme. U prvom redu su dani podaci voda. Zatim su izračunate reducirane admitancije, koje odgovaraju ukupnoj uzdužnoj impedanciji i ukupnoj poprečnoj admitanciji voda. Nadalje su pomoću dijagrama po Woodruffu odredjeni faktori korekcije i konačno izračunate reducirane admitancije za pojedine grane Pi-sheme.

REDUCIRANE ADMITANCIJE TRANSFORMATORA - PRIMJER

Primjer za proračun reduciranih admitancija transformatora dan je na slici 18.14. Za transformator su dani isti podaci kao na slici 15.4, ali su ujedno izračunate relativne veličine zadanih podataka. Podaci o naponu nisu dani, jer

REDUCIRANE ADMITANCIJE DUGOG VODA – PRIMJER

Zadano: $U_n = 220\,kV$, $Z_1 = 0{,}428\angle 78{,}8^\circ\,\Omega/km$, $y_1 = 2{,}70\cdot 10^{-6}\angle 87{,}9^\circ\,S/km$, $l = 320\,km$

Uzdužna grana voda: $Y_{ru} = \frac{U_n^2}{l \cdot Z_1} = \frac{220^2}{320 \cdot 0{,}428\angle 78{,}8^\circ} = 353\angle -78{,}8^\circ$

Poprečna grana voda: $Y_{rp} = U_n^2 \cdot l \cdot y_1 = 220^2 \cdot 320 \cdot 2{,}7\cdot 10^{-6}\angle 87{,}9^\circ = 41{,}8\angle 87{,}9^\circ$

Faktor korekcije za točnu Π- shemu:

$\theta^2 = \frac{Y_{rp}}{Y_{ru}} = \frac{41{,}8\angle 87{,}9^\circ}{353\angle -78{,}8^\circ} = 0{,}1185\angle 166{,}7^\circ$

$\frac{\sinh\theta}{\theta} = 0{,}981\angle 0{,}26^\circ$ $\qquad$ $\frac{\tanh\theta/2}{\theta/2} = 1{,}0097\angle -0{,}14^\circ$

Uzdužna gr. Π-sheme: $Y'_{ru} = \frac{Y_{ru}}{\frac{\sinh\theta}{\theta}} = \frac{353\angle -78{,}8^\circ}{0{,}981\angle 0{,}26^\circ} = 360\angle -79{,}1^\circ$

Poprečna gr. Π-sheme: $Y'_{rp} = \frac{Y_{rp}}{2}\,\frac{\tanh\theta/2}{\theta/2} = \frac{41{,}8\angle 87{,}9^\circ}{2}\,1{,}0097\angle -0{,}14^\circ = 21{,}1\angle 87{,}8^\circ$

Sl. 18.13

REDUCIRANE ADMITANCIJE TRANSFORMATORA-PRIMJER

Zadano: $S = 100\,MVA$, $u_k = 13{,}3\%\,(=0{,}133)$, $P_k = 408\,kW\,\left(p_k = \frac{0{,}408}{100} = 0{,}00408\right)$,

$i_0 = 1{,}17\%\,(=0{,}0117)$, $P_0 = 156\,kW\,\left(p_0 = \frac{0{,}156}{100} = 0{,}00156\right)$.

Uzdužna grana: $Y_r = \frac{100}{0{,}133} = 758$

$\cos\eta = \frac{0{,}00408}{0{,}133} = 0{,}0307$, $\eta = 88{,}25^\circ$

$Y_r = 752\angle -88{,}25^\circ$

Poprečna grana: $Y_r = 100 \cdot 0{,}0117 = 1{,}17$

$\cos\eta = \frac{0{,}00156}{0{,}0117} = 0{,}134$, $\eta = 82{,}25^\circ$

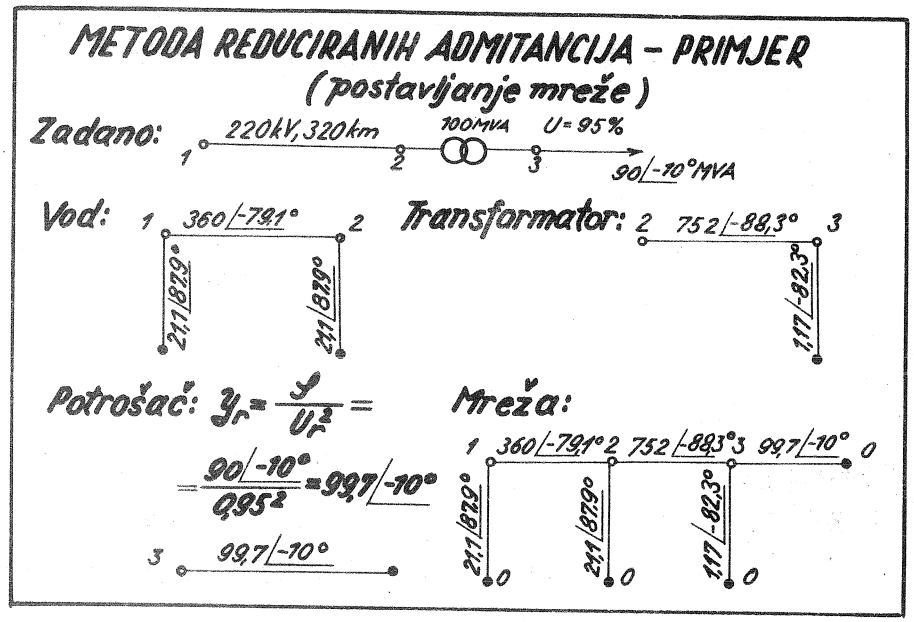
$Y_r = 1{,}17\angle -82{,}25^\circ$

Sl. 18.14

to za proračun reduciranih admitancija nije potrebno. Proračun je izvršen po prije izvedenim formulama.

METODA REDUCIRANIH ADMITANCIJA - PRIMJER

Na slici 18.15 dan je primjer za postavljanje sheme mreže s reduciranim admitancijama. Najprije je prikazana shema zadane mreže, koja se sastoji od voda i transformatora. Podaci voda i transformatora su isti kao u prijašnjim primjerima, gdje smo već izračunali potrebne reducirane admitancije, tako da sheme spoja za te elemente možemo odmah postaviti. Pri tome je za transformator upotrijebljena Gama-shema. Za potrošača treba izračunati reduciranu admitanciju koja slijedi iz snage i reduciranog napona u toj tački. Tako se može postaviti shema čitave mreže s upisanim admitancijama.



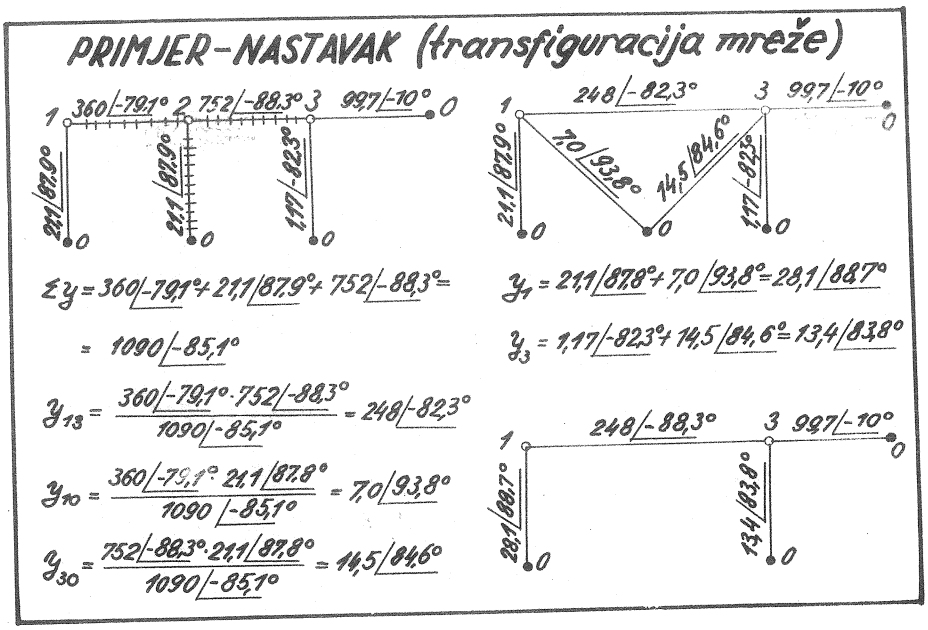
Sl. 18.15

Na slici 18.16 je provedena transfiguracija te mreže s time da se eliminira tačka 2. Grane mreže koje čine zvijezdu oko tačke 2, a koju ćemo zvijezdu transfigurirati u trokut poprečno su precrtkane. Izračunata je suma reduciranih admitancija tih grana, a zatim red. admitancije grana trokuta. Tako nastala shema mreže prikazana je desno gore. Zatim su paralelne grane spojene zajedno (tačke označene sa "0" su u stvari jedna jedina tačka!) tako da su im red.admitancije zbrojene. Konačna shema transfigurirane mreže dana je desno dolje.

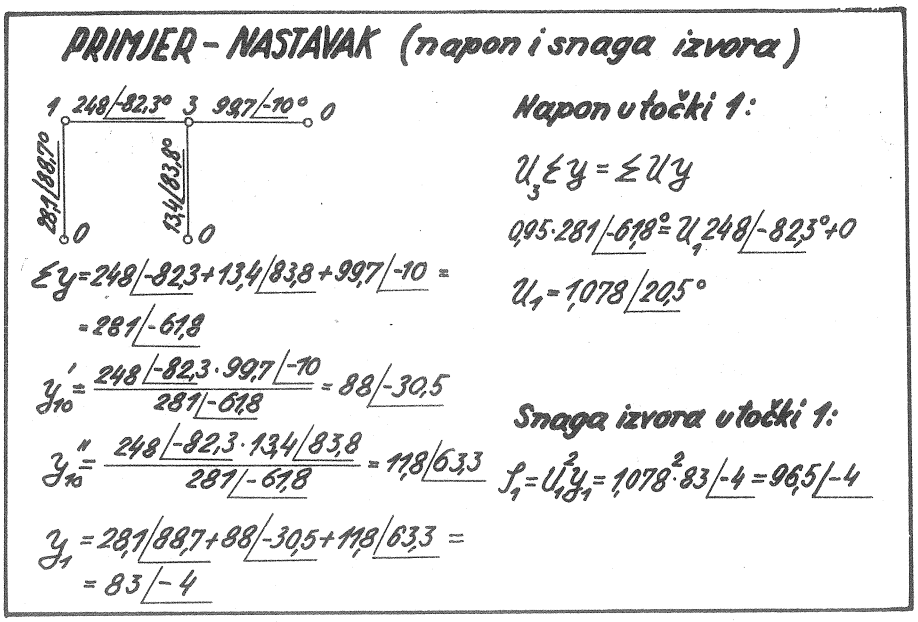
Pri tome treba napomenuti da medjuračuni za zbrajanje kompleksnih veličina ovdje nisu navedeni. O računanju s kompleksnim veličinama vidi članak: Stefanini, Računanje s kompleksnim brojevima, Elektrotehničar 1956, br.1-2.

Na slici 18.17 je isti primjer nastavljen. U prvom redu je provedena transfiguracija mreže do jedne jedine red. admitancije izmedju dvije tačke 1 i 0. Zatim je odredjen napon u tački 1 po formuli koja se inače upotrebljava za odredjivanje napona uspostavljenog zvijezdišta. Konačno je pomoću tog napona i red. admitancije, na koju je svedena cijela mreža, izračunata snaga izvora, koji napaja tu mrežu u tački 1.

Na slici 18.18 je za istu mrežu izračunata struja i snaga kratkog spoja. Pretpostavljeno je, da kratki spoj nastane u tački 3 kod prije utvrdjenog pogonskog stanja, a da je izvor u tački 1 beskonačno velik (tj. napon u toj tački je krut odnosno admitancija izvora je beskonačno velika). Primjer je riješen na dva načina. U slučaju a) računamo s elektromotornom silom u tački 1, koja je jednaka prije izračunatom naponu. U slučaju b), ako napon u tački 1 nije poznat, koristimo Thévenin-ov teorem, pa stvarnu EMS na mjestu kratkog spoja, i to jednaku naponu, koji je tu vladao prije kratkog spoja. Struju sad računamo obzirom na rezultantu admitanciju mreže izmedju narinutog napona i tačke



Sl. 18.16

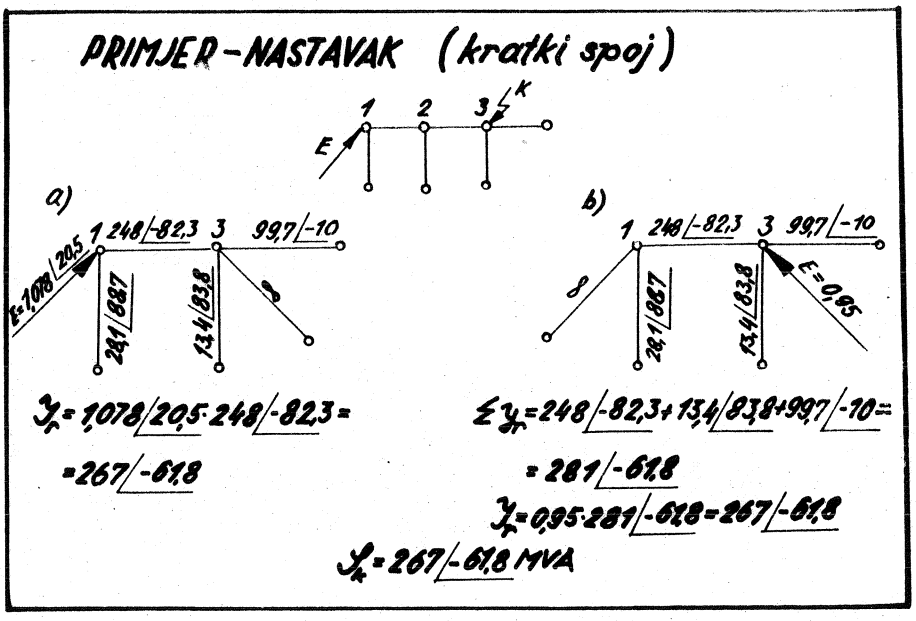


Sl. 18.17

O. Konačno je napisana i vrijednost snage kratkog spoja, koja je definirana kao snaga, koju struja kratkog spoja daje s nazivnim naponom. Dakle snaga kratkog spoja je brojčano jednaka reduciranoj struji kratkog spoja.

KARAKTERISTIKE METODE REDUCIRANIH ADMITANCIJA

Metoda reduciranih admitancija uvodi pojednostavnjenja kod računanja, čime se mnogi medjuračuni izostavljaju, računanje pojednostavnjuje i posao skraćuje, a preglednost rada se povećava i mogućnost slučajne pogreške smanjuje. Pri



Sl. 18.18

tome nisu potrebna nikakva zanemarenja, pa su rezultati potpuno tačni. Ako se, medjutim, u prvom približenju zanemare odstupanja napona od nazivne vrijednosti, pojednostavnjuje se i ubrzava rad u velikoj mjeri. Kao karakteristike ove metode dolazi do izražaja slijedeće:

1) Napon se eliminira iz računa, što je naročito prikladno kod mreža s više različitih napona.

2) Kod trofaznog sistema računa se s linijskim naponom i s formulama kao za jednofazni sistem.

3) Ekvivalentne sheme transformatora i strojeva lako se i brzo izračunaju.

4) Napon je dan u relativnim jedinicama, što je za praksu mnogo zgodnije.

5) Struja je dana kao reducirana veličina i ima približno vrijednost pripadne snage, što povećava preglednost, i lakše se izračunava.

6) Admitancije su dane kao reducirane veličine sa smislom snage kratkog spoja tog elementa mreže, što povećava preglednost, a brojčane vrijednosti prikladne su za pisanje.

7) Sve su veličine reducirane na napon, a dimenzije kod računanja su samo MVA.

8) Svi zakoni, koji vrijede za apsolutne veličine, vrijede u potpunosti i za reducirane veličine ove metode.

9) Kao prvo približenje mogu se izjednačiti snage, red.struje i red. admitancije što ubrzava proračun i povećava preglednost.

1o) Regulacija napona može se lako uzeti u račun.

11) Rezultati se dobiju u obliku, koji je za praksu prikladniji.

MREŽNI ANALIZATORI

Jedan od načina za odredjivanje električnih prilika u mreži jest mjerenje na modelu mreže. U tu se svrhu upotrebljavaju tzv. mrežni analizatori, koji imaju pripremljene elemente za modeliranje pojedinih elemenata mreže, spojne žice za spajanje elemenata u potrebnu konfiguraciju mreže i mjerne instrumente (vidi slika 18.19 na str. 222).

Prednost ovog načina jest, da se razmjerno brzo može dobiti veliki broj podataka za istraživanu mrežu, pa makar mreža bila i vrlo složena, te bi inače

to zahtijevalo dugotrajno računanje. Isto tako povećava se na ovaj način preglednost kod rada i smanjuje mogućnost grubih grešaka. Rezultati, dobiveni mjerenjem, mogu se postići da budu za potrebe prakse dovoljno tačni.

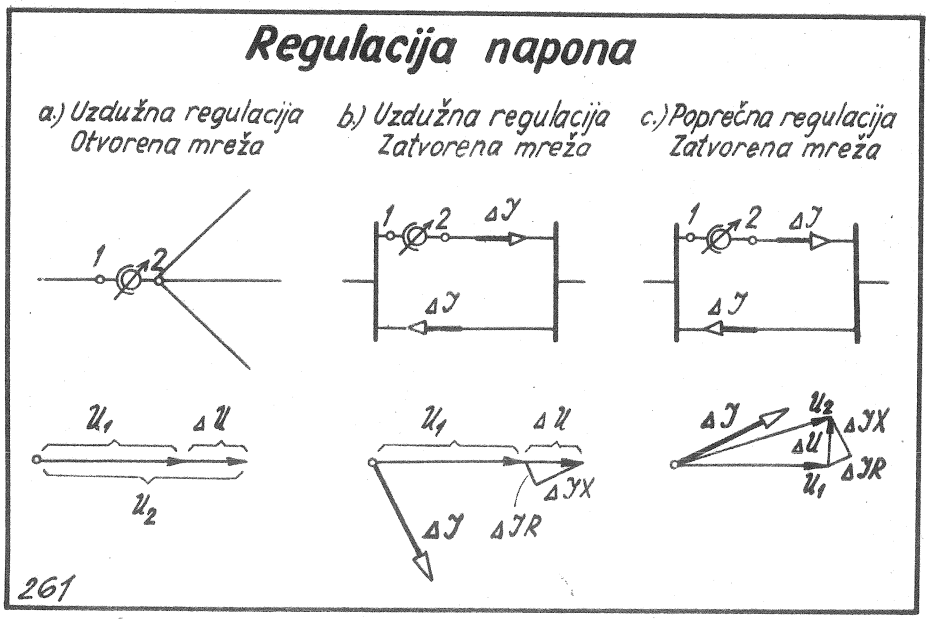
Već prema svrsi, za koju je gradjen mrežni analizator, mogu postojati različite izvedbe. Analizator za istosmjernu struju ima kao elemente regulacione otpornike, a služi za rješavanje pojednostavnjenih zadataka i kod trofazne mreže (ako se npr. zanemare djelatni otpori).

Analizator za izmjeničnu struju modelira djelatne otpore, induktivitete i kapacitete, a izvori su predstavljeni elektromotornim silama, koje se mogu regulirati i po iznosu i po kutu. Osim direktnog modeliranja induktiviteta induktivitetom i kapaciteta kapacitetom, može se provesti i obrnuto modeliranje, tako da je induktivitet prikazan kapacitetom, a kapacitet induktivitetom, što može eventualno pojeftiniti izvedbu.

Izmjenični analizatori se obično grade jednofazni, ali za posebna ispitivanja mogu biti gradjeni i kao trofazni. Osim toga postoje i razne specijalne izvedbe mrežnih analizatora, npr. za ispitivanje prelaznih pojava.

Konačno se osim električnih elemenata mogu u mrežni analizator uvesti i mehanički elementi, tako da izvori energije budu prikazani malim generatorima, kojima se mogu regulirati i električne i mehaničke karakteristike. Ti se analizatori nazivaju mikromreža, a služe prvenstveno za ispitivanje problema dinamičke stabilnosti.

19. REGULACIJA NAPONA



Sl. 19.1

OPĆENITO O REGULACIJI NAPONA

Napon se može regulirati u dva smisla (slika 19.1):

1) promjena iznosa (tzv. uzdužna regulacija),
2) promjena kuta (tzv. poprečna regulacija).

U otvorenim (zrakastim) mrežama vrši se samo uzdužna regulacija sa svrhom, da se pogonski napon drži u odredjenim granicama (skica a). U mrežama se nastoji, da odstupanje napona od nazivne vrijednosti ne bude veće od ± 10%, a kod potrošača se teži i k ± 5%, a kod nekih specijalnih potrošača još i manje.

U zatvorenim (zamkastim) mrežama vrši se i uzdužna i poprečna regulacija. Ako se u cijeloj mreži podjednako vrši uzdužna regulacija, onda se u mreži

mijenja napon po iznosu. Ali ako se uzdužna regulacija vrši samo na jednom mjestu, onda se iznos napona malo mijenja, nego dolazi do promjene toka snaga (i to pretežno jalovih snaga) u mreži. Tako uzdužnom regulacijom napona upravljamo tokovima jalovih snaga u mreži (skica b).

Poprečna regulacija napona u zatvorenoj mreži vrši se samo na pojedinim mjestima sa svrhom, da se promijene tokovi snaga (i to pretežno djelatnih snaga) u mreži. Tako se poprečnom regulacijom napona djeluje na tokove djelatnih snaga mreže (skica c). Poznato je, da se na tokove djelatnih snaga može utjecati i promjenom punjenja turbina ("regulacija frekvencije"), no s time se ovdje nećemo baviti.

Loši režim napona - posljedice

Napon	Mreža		Potrošači	
	Vodovi	Transformat.	Motori	Žarulje
previsok	veće naprezanje izolacije veća korona	veće naprezanje izolacije veći gubici u željezu	veći gubici u željezu	Kraća životna dob
prenizak	veći gubici u vodičima	veći gubici u bakru	veći gubici u bakru	manji svjetlosni tok

Općenito : nepovoljnije prilike rada
manja snaga
lošiji stepen korisnosti

262

Sl. 19.2

POSLJEDICE LOŠEG NAPONA

Ako je režim napona loš, tj. ako iznos napona znatno odstupa od nazivne vrijednosti, pojavljuju se u mreži razne štetne posljedice, jer su svi dijelovi mreže i potrošači gradjeni za odredjeni nazivni napon. Pregled nekih od štetnih posljedica dane su na slici 19.2. Općenito se kod lošeg režima napona dobiju nepovoljnije prilike rada, manja snaga i lošiji stepen korisnosti pojedinog dijela mreže odnosno potrošača.

ODRŽAVANJE REŽIMA NAPONA

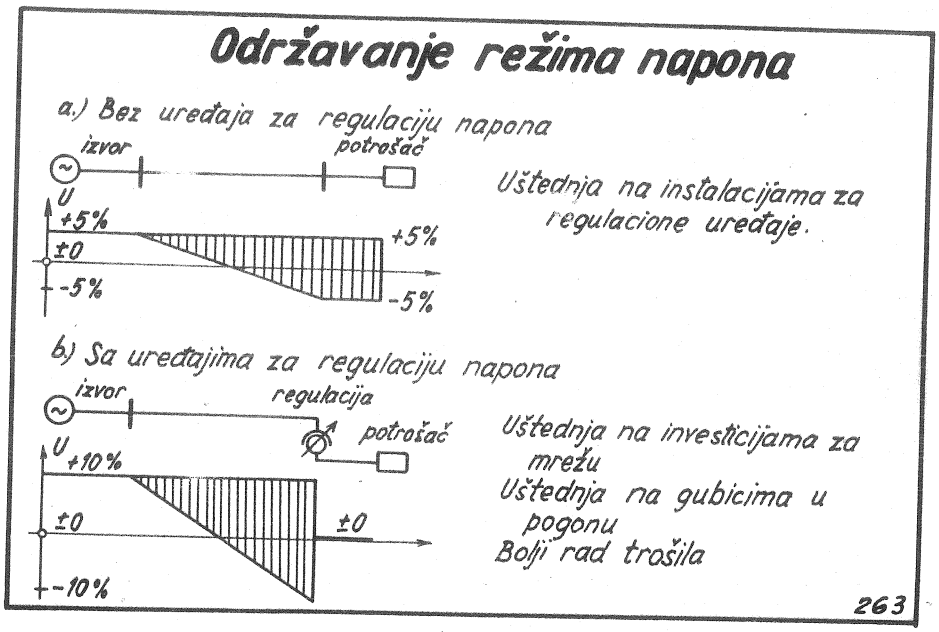
Odstupanja napona imaju uzrok u padu napona u pojedinim dijelovima mreže, koji se pad napona mijenja zbog promjenljivosti opterećenja. (Kad bi opterećenje bilo konstantno, mogla bi se mreža tako projektirati, da potrošač dobije stalno nazivni napon, ali to u praksi ne dolazi u obzir).

Režim napona možemo održati u dozvoljenim granicama i bez posebnih uredjaja za regulaciju, ako je mreža dovoljno dimenzionirana (slika 19.3, skica a). Ipak pri tome dolazi do varijacija napona kod potrošača. Ovo se primjenjuje kod manjih mreža.

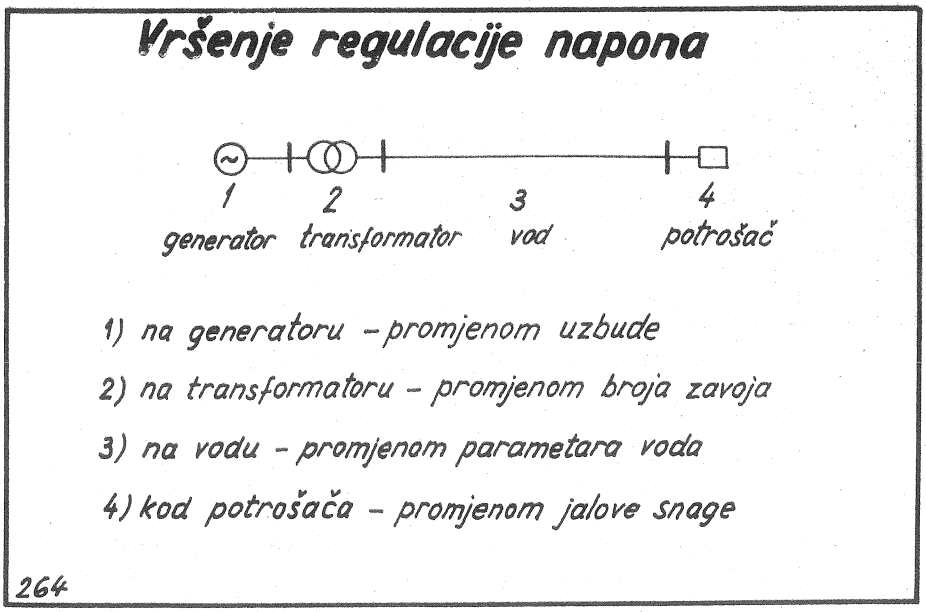
S uredjajima za regulaciju možemo varijacije napona smanjiti na minimum, a isto tako uštedjeti na investicijama za mrežu te na gubicima u pogonu. Ovo se primjenjuje kod većih mreža.

VRŠENJE REGULACIJE NAPONA

Regulaciju napona možemo vršiti na raznim mjestima u mreži, kako je prikazano pregledno na slici 19.4.



Sl. 19.3

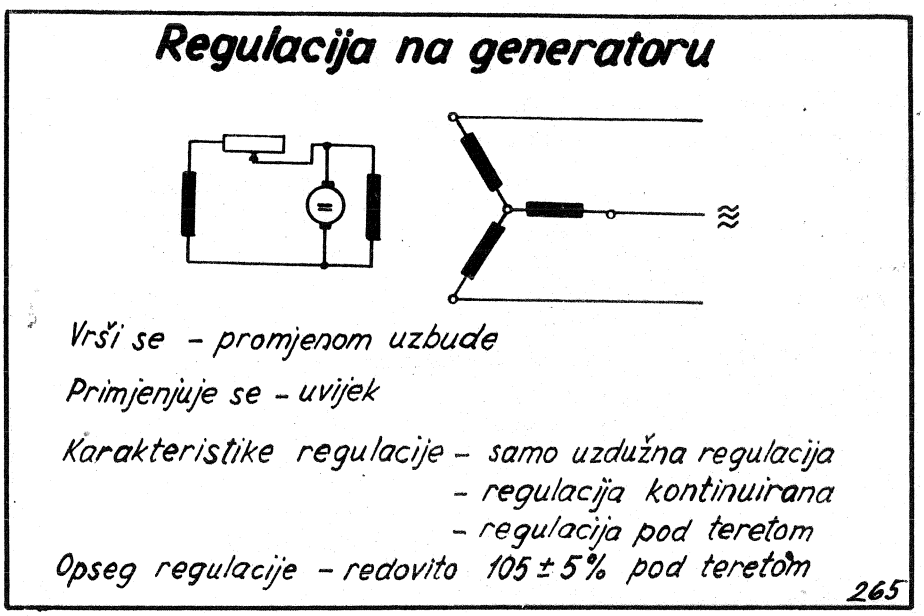


Sl. 19.4

REGULACIJA NA GENERATORU

Regulacija na generatoru vrši se promjenom uzbude. Ta vrsta regulacije stoji uvijek na raspolaganju pa se uvijek i koristi. Dakako da je na ovaj način regulacija samo uzdužna, ali su promjene napona kontinuirane i regulacija se može vršiti pod teretom.

Nazivni napon generatora je redovito za 5% iznad nazivnog napona mreže (npr. 1o,5 kV), a opseg regulacije je redovito ± 5% (gdjekada i više) i to kod potpuno opterećenog generatora (slika 19.5).



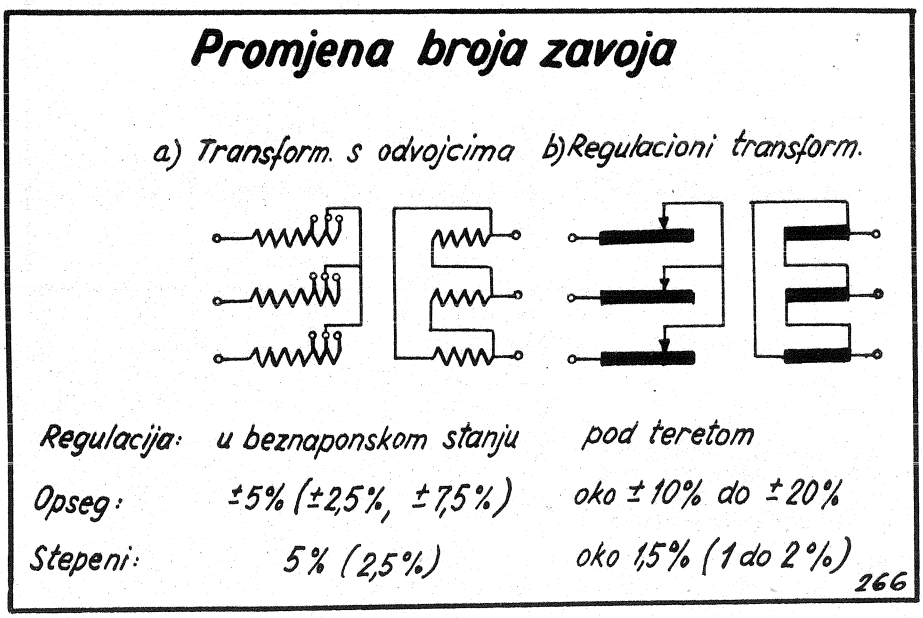
Sl. 19.5

PROMJENA BROJA ZAVOJA

Promjena broja zavoja se može provesti na dva načina (slika 19.6)

a) u beznaponskom stanju,
b) pod teretom.

a) Promjena broja zavoja u beznaponskom stanju u stvari ne omogućuje ono, što podrazumijevamo pod nazivom "regulacija napona", ali se upotrebljava tamo, gdje transformator ne omogućuje regulaciju pod teretom, da se transformator prikladno udesi prilikom stavljanja u pogon. Iznimno se može i ova mogućnost koristiti za promjenu prijenosnog odnosa u pogonu, ali se to čini razmjerno rijetko, jer svaki put treba prekidati pogon.



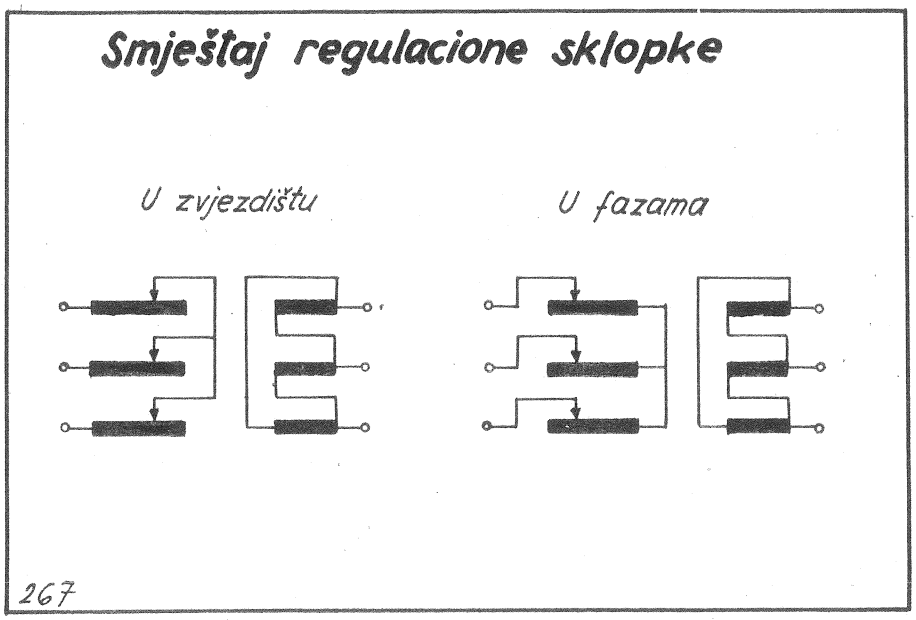
Sl. 19.6

b) Regulacionim transformatorom nazivamo onaj, koji omogućuje promjenu broja zavoja, dakle i regulaciju napona, pod teretom. S takvim transformatorima ćemo se u daljnjemu pozabaviti. Opseg regulacije obično nije manji od ± 10% (kad se već ugradjuje regulacioni uredjaj, onda ga treba u dovoljnoj mjeri i iskoristiti), ali redovito nije veći od ± 20% (veći opseg regulacije poskupljuje transformator a redovito nije ni potreban), tako da se prosječno može ± 15% smatrati prikladnim opsegom regulacije. Pojedini stepeni ne smiju biti premali (obično ne manji od 1%, jer to zahtijeva veliki broj stepena, što poskupljuje regulacioni uredjaj), ali niti preveliki (obično ne veći od 2%, jer je inače regulacija pregruba, pa se npr. kod rasvjete dobiju izraziti skokovi u svijetlu), tako da se stepen od 1,5% može smatrati prikladnim.

SMJEŠTAJ REGULACIONE SKLOPKE

Promjena broja zavoja pod teretom se vrši pomoću posebne regulacione sklopke. Regulaciona sklopka može biti smještena u zvjezdištu namota ili na kraju faza (slika 19.7). Smještaj u zvjezdištu ima prednost, što je čitava sklopka manje-više na istom potencijalu, pa se može izvesti mehanički kompaktna. Takva je sklopka dakako jeftinija, pa se primjenjuje kad god je to moguće.

U protivnom slučaju, npr. kod regulacije štednog transformatora, upotrebljava se regulaciona sklopka na krajevima faza.



Sl. 19.7

SMJEŠTAJ REGULACIJE

Regulacioni uredjaj može biti izveden:

1) zajedno s namotima za transformaciju
2) odvojeno od namota za transformaciju.

Oboje dolazi u obzir i kod uzdužne i kod poprečne regulacije (slika 19.8). Kod odvojene regulacije transformatore nazivamo glavni i dodatni. Kod uzdužne regulacije dodatni transformator se redovito izvodi u štednom spoju.

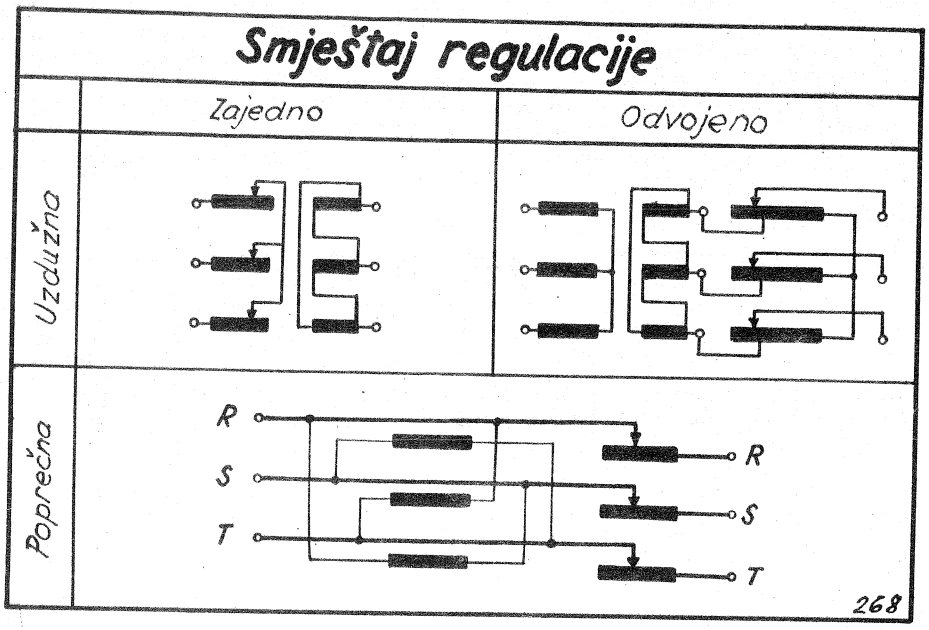
PROBLEMATIKA REGULACIONE SKLOPKE

Promjenu broja zavoja na transformatoru vršimo tako, da prelazimo od jednog odvojka na drugi. Ali pri tome ne smijemo (kao što je prikazano na slici 19.9):

1) niti prekidati spoj (jer bi došlo do električnog luka), koji bi uništio kontakte),

2) niti premostiti odvojke (jer bi došlo do kratkog spoja svitka, pa bi uslijed velike struje taj svitak izgorio).

U principu se taj problem rješava pomoću dvostrukog kontaktnog prsta s umetnutim otporom ili prigušnicom. Oba su rješenja prikazana na slici u pet položaja, koji pokazuju prelaz od jednog stepena na drugi.



Sl. 19.8

a) Kod rješenja s otporom oba kontaktna prsta stoje stalno na istom odvojku, pa struja teče kroz onu granu u kojoj nije otpor. Kod prelaza na drugi odvojak, prvo se otvori jedan kontaktni prst, pa struja teče kroz onu granu, koja ostaje spojena (bio u toj grani otpor ili ne). Zatim taj isti kontaktni prst prelazi na drugi odvojak, pa struja teče kroz granu bez otpora. Kroz to vrijeme je svitak transformatora doduše kratko spojen, ali je u petlju kratkog spoja umetnut otpor, tako da je struja dovoljno smanjena. Zatim se otvara drugi kontaktni prst, te i on prelazi na drugi kontakt. S time je prelaz od jednog kontakta na drugi izvršen bez prekida i bez direktnog kratkog spajanja svitka.

b) Kod rješenja s prigušnicom je postupak sličan samo što struju kratkog spoja ograničava prigušnica mjesto otpora. U srednjem položaju, kad je svaki kontaktni prst na drugom kontaktu, zbog djelovanja prigušnice dobiva se napon, koji odgovara sredini izmedju jednog i drugog odvojka. Time se dobivaju manji skokovi napona. U prelaznom položaju, kad je samo jedan kontaktni prst priključen, u vanjskom strujnom krugu se pojavljuje i pad napona u polovici prigušnice.

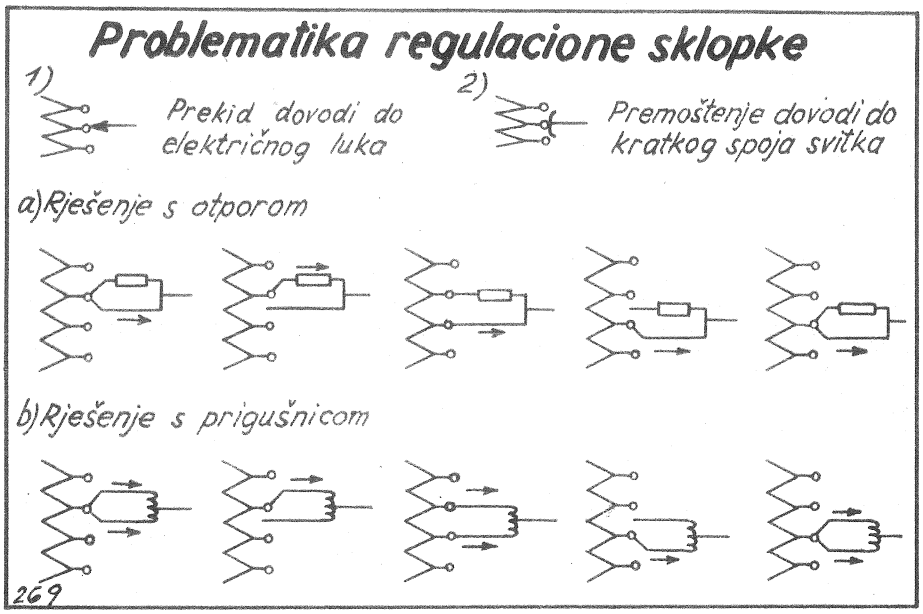
Otpornik i prigušnica su dimenzionirani za kratkotrajni pogon, pa se treba pobrinuti, da regulacioni uredjaj ne stane u sredini ne završivši potpuno regulacioni ciklus. To se obično postiže pogonom na spiralno pero, koje se navije ručno ili motorom, a to pero onda pokreće regulacioni uredjaj.

PROMJENA PARAMETARA VODA

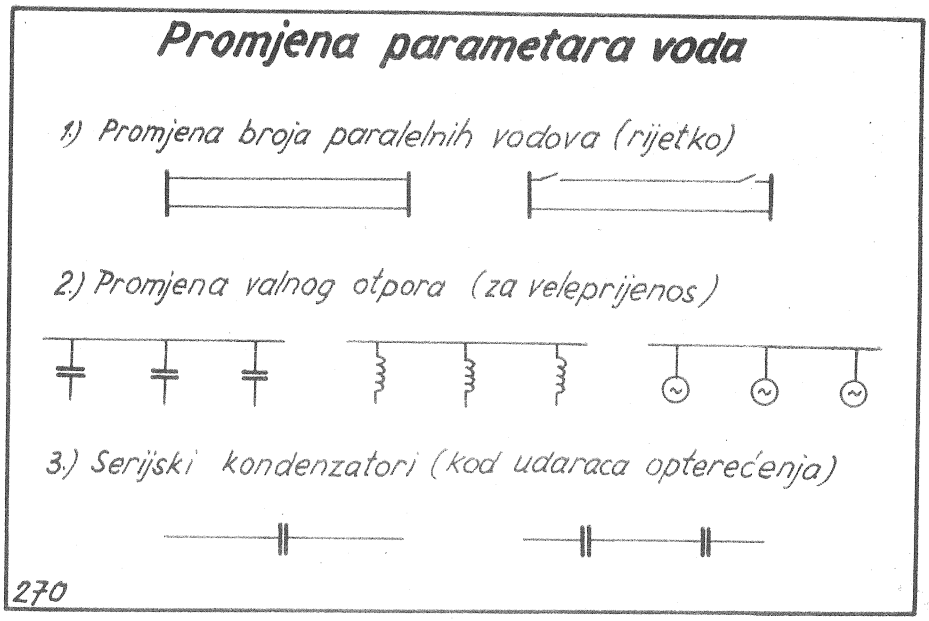
Za promjenu parametara voda dolaze u obzir sredstva prikazana na slici 19.1o. Promjena broja paralelnih vodova rijetko će doći u obzir za regulaciju napona, jer zbog sigurnosti pogona radije držimo veći broj vodova u pogonu,a i promjena parametara na taj način je previše gruba. Promjena valnog otpora voda jest u stvari prilagodjenje prirodne snage voda snazi prijenosa, o čemu je već prije bilo govora. Upotreba serijskih kondenzatora se upotrebljava za kompenzaciju induktiviteta voda, pa ćemo to ovdje malo detaljnije razmotriti.

SERIJSKI KONDENZATORI ZA REGULACIJU NAPONA

Pad napona u vodovima nastaje prvenstveno zbog induktiviteta voda, pogotovu ako je struja jako induktivna. Induktivitet se može (obično samo djelomično) kompenzirati serijskim kapacitetom, pa je onda i režim napona povolj-



Sl. 19.9



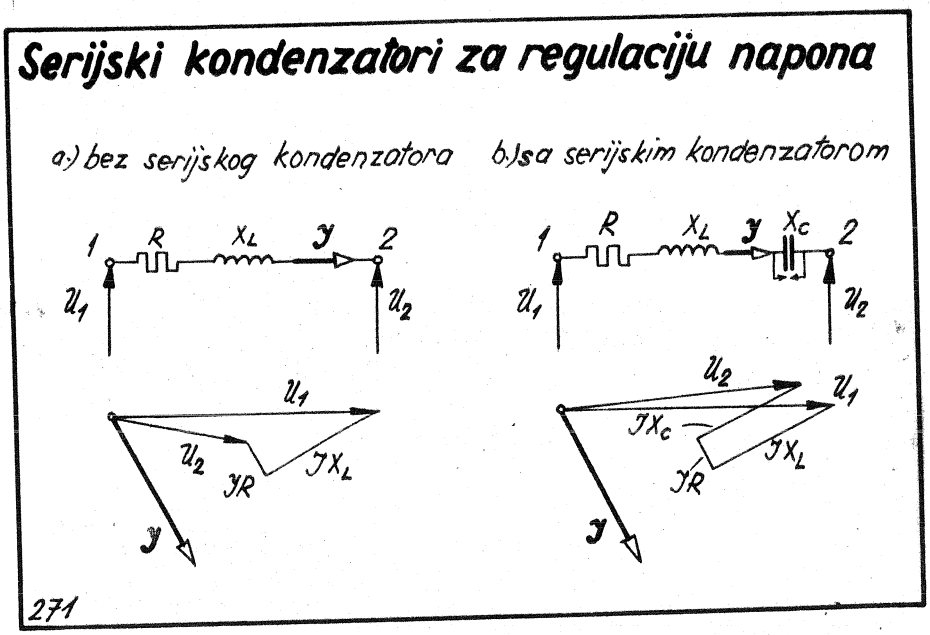
Sl. 19.1o

niji (slika 19.11). Za razliku od regulacionih transformatora, koji reguliraju napon tek nakon što se pojave odstupanja napona, serijski kondenzatori sprečavaju da do odstupanja napona uopće dodje, pa su zato naročito prikladni kod naglih promjena opterećenja.

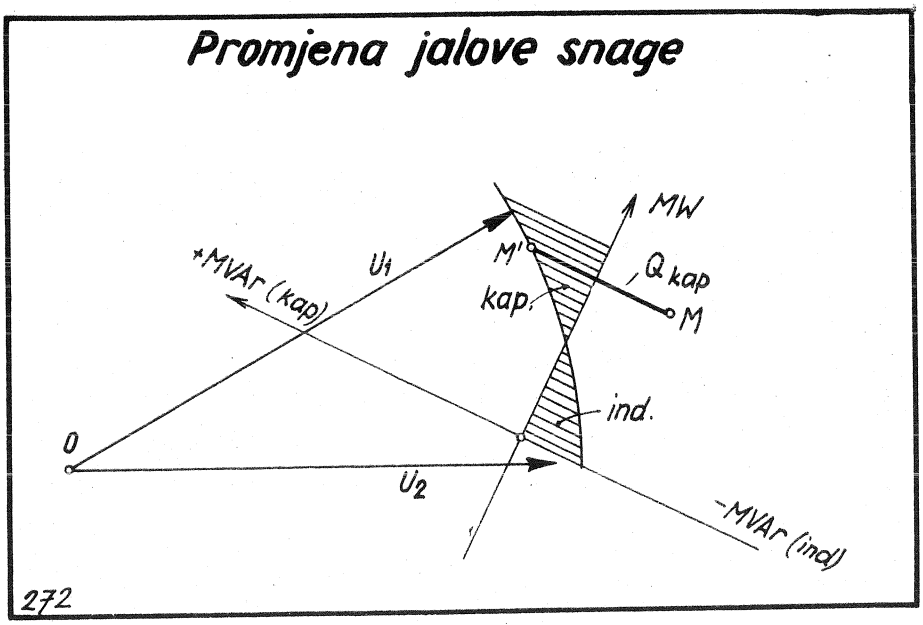
Kondenzator mora biti izoliran prema zemlji za puni napon voda, i mora izdržati punu struju voda. Da ne bi morao biti dimenzioniran i za struje kratkog spoja, obično se premošćuje iskrištem koje samo proradi kad struja prekorači odredjenu granicu.

PROMJENA JALOVE SNAGE

Utjecaj promjene jalove snage na režim napona prikazan je na slici 19.12. U kružnom dijagramu su dani iznosi primarnog i sekundarnog napona, za koje želimo da budu konstantni. Prema tome pogonska tačka mora ležati na ucrtanoj kružnici. Isprugane površine prikazuju koliku jalovu snagu (kapacitivnu odnosno induktivnu) moramo prenositi ako prenosimo odredjenu djelatnu snagu. Ako je teret na kraju voda definiran tačkom M, moramo dodati kapacitivnu jalovu snagu u iznosu jednakom MM', da uz konstantni napon na početku održimo željeni napon na kraju. Ako reguliramo napon na početku ili dozvolimo kolebanje napona na kraju, onda je dakako za regulaciju napona potrebna manja jalova snaga.



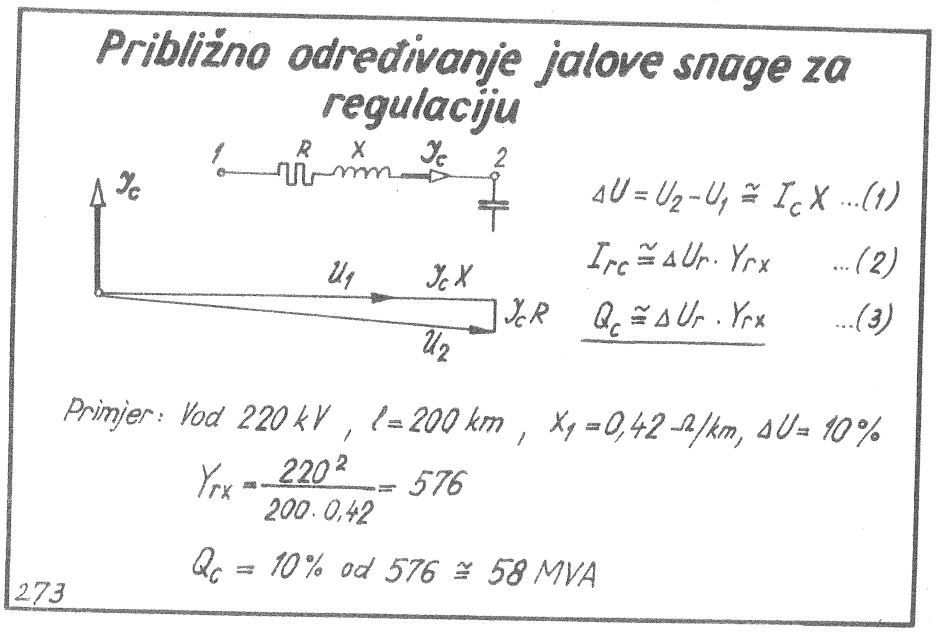
Sl. 19.11



Sl. 19.12

PRIBLIŽNO ODREDJIVANJE JALOVE SNAGE ZA REGULACIJU

Kako možemo brzo odrediti približni iznos jalove snage potreban za regulaciju, prikazano je na slici 19.13. Kod voda je uzeta u račun samo uzdužna grana. Iz vektorskog dijagrama naponskih prilika u vodu s kapacitivnom strujom "I_C" vidimo, da je razlika napona dana izrazom (1). Ako to prikažemo pomoću reduciranih veličina dobijemo izraz (2). Budući da je reducirana struja brojčano jednaka snazi te struje uz nazivni napon (a napon na kraju će biti približno jednak nazivnome), to slijedi izraz (3), koji kaže da je jalova snaga za regulaciju jednaka onolikom dijelu reducirane admitancije voda, koliki dio napona želimo regulirati. Na slici je dan i brojčani primjer.



Sl. 19.13

USPOREDBA STATIČKIH KONDENZATORA I SINHRONIH KOMPENZATORA

Usporedba statičkih kondenzatora i sinhronih kompenzatora za regulaciju napona dana je na slici 19.14. Statički kondenzatori se ukapčaju po grupama, pa se regulacija može vršiti samo u skokovima, a i to samo s kapacitivnom snagom, dok se kod sinhronih kompenzatora kontinuiranom promjenom uzbude može postići kontinuirana regulacija, i to kako s kapacitivnom tako i s induktivnom snagom.

Reagiranje statičkih kondenzatora na promjenu napona je nepovoljno, jer kod smanjenja napona kondenzator uzme manju snagu (koja je proporcionalna s "U2"), pa se zbog toga smanji i povišenje napona uslijed kapacitivne struje u vodu, a to povišenje napona je baš tada potrebno. Kod sinhronih kompenzatora, naprotiv, smanjenje napona poveća induktivnu snagu koju on daje u mrežu (odnosno poveća kapacitivnu snagu koju uzimlje iz mreže), pa to povisi napon u vodu, što je u tom momentu baš potrebno. Kod povišenja napona, opet, statički kondenzator uzme veću kapacitivnu snagu pa još više povisi napon, dok sinhroni kompenzator uzme manju kapacitivnu snagu pa se time napon snizi.

Dosada spomenute osebine bile su u prilog sinhronih kompenzatora. Mogućnost priključka direktno na visoki napon bez posredstva transformatora (što je potrebno kod sinhronih kompenzatora) kao i deset puta manji gubici u pogonu govore medjutim u prilog statičkim kondenzatorima.

Što se tiče cijene, usporedbu treba provesti prema konkretnim cijenama, koje vrijede u promatranom slučaju. Svakako treba imati na umu, da je cijena po MVA za sinhroni kompenzator to manja, što je snaga kompenzatora veća, dočim je kod statičkih kondenzatora ta cijena konstantna, budući da se statički kondenzatori sastavljaju u baterije od pojedinih elemenata.

Usporedba statičkih kondenzatora i sinhronih kompenzatora

	Statički kondenzator	Sinhroni kompenzator
Mogućnost regulacije	Samo kapacitivno	Kapacitivno i induktivno
Način regulacije	Na skokove (grupe)	Kontinuirano
Reagiranje na promjenu napona	Nepovoljno	Povoljno
Priključak	Direktno na v.n.	Indirektno preko transf.
Gubici	0,2 - 0,6 %	2 - 6 %
Cijena po MVA	Konstantna	Pada s veličinom

274

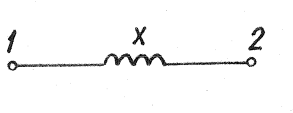
Sl. 19.14

2o. STABILNOST

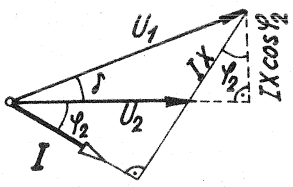
GRANICA PRIJENOSNE SNAGE

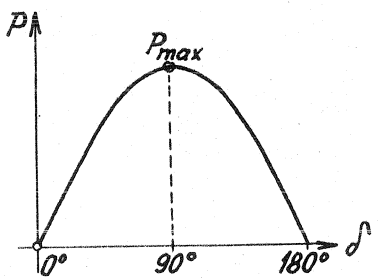
Kod svakog prijenosnog sistema za odredjene pogonske uslove postoji granica prijenosne snage. Najjednostavniji takav slučaj prikazan je na slici 2o.1, gdje je uzet prijenosni sistem sa samom uzdužnom reaktancijom. (Kod proučavanja problema stabilnosti često se radi jednostavnosti zanemaruje sve osim uzdužnih reaktancija, kako bi se brže dobilo približno rješenje).

Granica prijenosne snage



$X = konst$
$U_1 = konst$
$U_2 = konst$
$\rightarrow P :: \sin\delta$





$$\sin\delta = \frac{IX\cos\varphi_2}{U_1} \rightarrow I\cos\varphi_2 = \frac{U_1}{X}\sin\delta \ldots (1)$$

$$P_2 = U_2 I\cos\varphi_2 = U_2 \frac{U_1}{X}\sin\delta \ldots (2)$$

$$\boxed{P = \frac{U_1 U_2}{X}\sin\delta} \ldots (3)$$

$$P_{max} = \frac{U_1 U_2}{X} \quad za\ \delta = 90° \ldots (4)$$

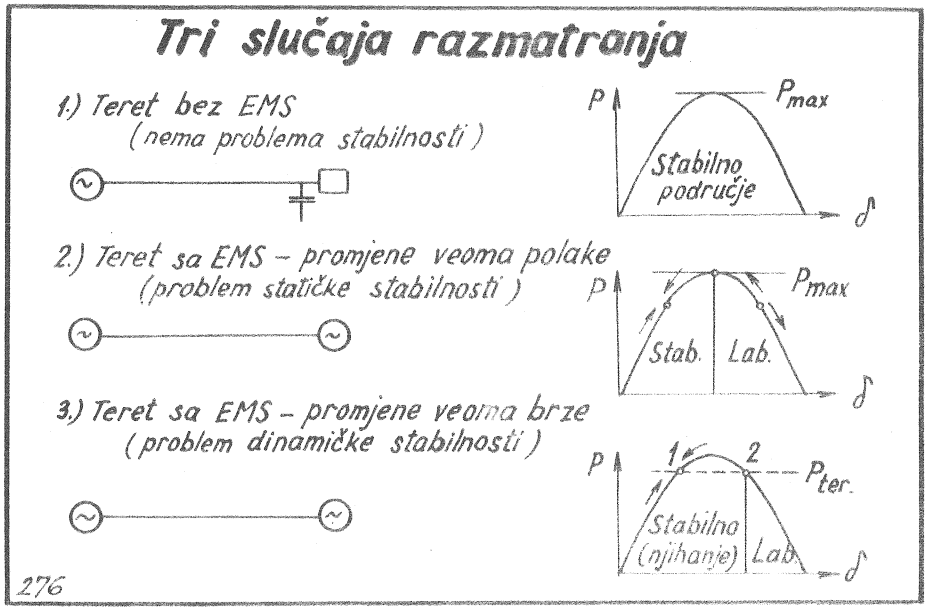
275

Sl. 2o.1

Ispod sheme prijenosnog sistema nacrtan je vektorski dijagram, iz kojeg sasvim geometrijski slijedi izraz (1). Koristeći to možemo postaviti izraz za snagu prijenosa, izraz (2). S time je izračunata djelatna snaga na kraju, ali kako promatrani prijenosni sistem nema gubitaka, izraz (2) vrijedi općenito za snagu prijenosa. Konačni izraz (3) je uokviren i on predstavlja fundamentalni izraz u našim razmatranjima.

Kod odredjenog prijenosnog sistema reaktancija se ne mijenja, a ako i napone na krajevima držimo konstantnima, onda je prenošena snaga direktno proporcionalna sinusu kuta izmedju vektora napona, što je i grafički prikazano na desnoj strani slike. Maksimalnu snagu prijenosa dobijemo, ako bude $\delta = 90^o$, jer onda "sin δ" postiže svoj maksimum. Iz toga uslova slijedi i veličina maksimalne snage prijenosa, izraz (4), koja je snaga proporcionalna naponima na oba kraja i obrnuto proporcionalna reaktanciji.

Krivulja "P" u ovisnosti o "δ" jest od fundamentalnog značenja za proučavanje stabilnosti, pa ćemo se s njom često poslužiti. Treba napomenuti da izrazi (3) i (4) daju snagu jedne faze, ako se za napone uvrste vrijednosti faznog napona. Ali ako se umjesto toga uvrste vrijednosti linijskog napona, onda izrazi daju trofaznu snagu. Tako se u praksi redovito radi,



Sl. 2o.2

TRI SLUČAJA RAZMATRANJA

U pogledu granice prijenosne snage možemo razmatrati tri glavna slučaja, koji su prikazani na slici 2o.2.

1) Prvi slučaj jest teret bez elektromotorne sile (pasivni teret). Za održavanje konstantnog napona neka služe statički kondenzatori. (Ali ako i nema regulacije napona na kraju, prilike su u biti slične). Čitavo područje krivulje "P(δ)" omogućuje stabilni pogon, jer ne može doći do gubitka sinhronizma budući da EMS postoje samo kod izvora. Ipak će se pogon redovno vršiti na lijevoj strani krivulje, dakle kod $\delta < 90^o$, jer pogon uz $\delta > 90^o$ zahtijeva velike kapacitivne struje u prijenosnom sistemu. Ovaj slučaj, dakle ne donosi sa sobom nikakvih problema stabilnosti, pa se njime ubuduće nećemo niti baviti.

2) U drugom promatranom slučaju teret ima elektromotornu silu (najjednostavnije je zamisliti kao teret jedan sinhroni motor), ali su promjene stanja pogona veoma polagane (kod razmatranja pretpostavljamo, da je brzina promjene jednaka nuli - makar se te polagane promjene ipak zbivaju). Prema tome tačka, koja na krivulju "P(δ)" karakterizira pogonsko stanje, ne mijenja svoj položaj za vrijeme promatranja. Maksimalna snaga prijenosa dana je najvišom tačkom krivulje.

Lijevi dio krivulje čini područje stabilnog pogona: ako naime iz bilo kojeg razloga dodje do kratkotrajnog malog povećanja mehaničkog tereta, zaostat

će rotor motora i povećat će se kut "δ", ali jer krivulja $P(\delta)$ u tom području raste, to će se povećati i električna snaga, koja će povući rotor prema naprijed u prvotni položaj; ako pak se mehanički teret kratkotrajno smanji, krenut će rotor naprijed i kut "δ" će se smanjiti, pa će se zato smanjiti i električna snaga, te će mehanički teret prevladati i povući rotor u prvotni položaj. Do istog zaključka došli bismo promatrajući kratkotrajnu promjenu mehaničke snage turbine uz generator.

Desni dio krivulje čini labilno područje: ako naime dodje do kratkotrajnog povećanja tereta, zaostat će rotor motora i povećat će se kut "δ", ali jer krivulja "$P(\delta)$" u tom području pada, to će se sad smanjiti električna snaga, pa će rotor još više zaostajati i tako će ispasti iz sinhronizma; ako se pak mehanički teret kratkotrajno smanji, krenut će rotor naprijed i kut "δ" će se smanjiti, pa će se električna snaga sada povećati i povući rotor još više naprijed, dok ga ne prebaci u stabilno područje.

3) U trećem promatranom slučaju teret opet ima svoju elektromotornu silu, ali su promjene stanja pogona veoma brze (kod razmatranja pretpostavljamo, da je trajanje promjene od jednog stanja na drugo jednako nuli). Ovdje dakle, promatramo u stvari prelazne pojave izmedju dva stanja pogona. Pri tome dolazi do njihanja u strojevima, a tačka koja karakterizira stanje na krivulji "$P(\delta)$" njiše na toj krivulji (ali i ostaje na toj krivulji).

Ako je za konačno pogonsko stanje definirana krivulja "$P(\delta)$" i teret "P_{ter}" kao na trećoj skici, onda karakteristična tačka može stabilno njihati sve do tačke 2. Ako se naime karakteristična tačka nadje izmedju tačaka 1 i 2 onda će električna snaga biti veća od mehaničke, pa će to smanjivati kut "δ". Tek ako karakteristična tačka dodje desno od tačke 2 onda će stabilnost biti izgubljena.

Probleme dinamičke stabilnosti, koji nastaju kod brzih promjena stanja ćemo detaljnije razmotriti kasnije.

Ovdje ćemo još samo napomenuti da ovakvi problemi stabilnosti kakve ovdje razmatramo dolaze samo kod prijenosa izmjeničnom strujom. Ovi se ne pojavljuju kod prijenosa istosmjernom strujom, jer tamo nije potreban sinhronizam medju strojevima.

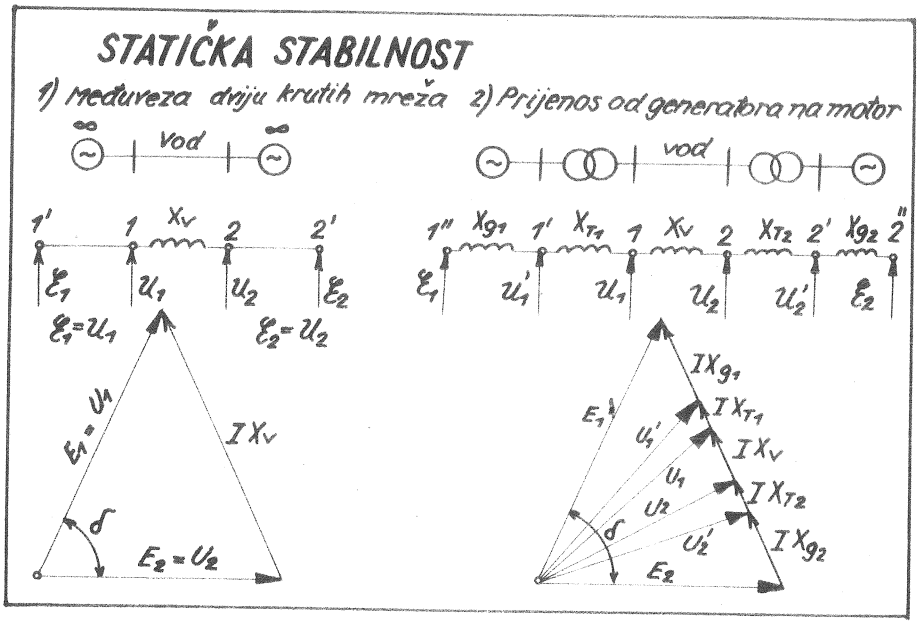
STATIČKA STABILNOST

Kriterij za odredjivanje granica statičke stabilnosti jest kut "δ", koji kod granice statičke stabilnosti postiže vrijednost $\delta = 90^{\circ}$ (ako uzmemo samo uzdužne reaktancije u račun). Prije smo vektore, izmedju kojih mjerimo kut "δ", jednostavno nazvali elektromotornim silama generatora odnosno motora. Kod promatranja statičke stabilnosti moramo za tu elektromotornu silu uzeti tzv. unutarnji napon stroja (napon polnog kotača, napon iza sinhrone impedancije), a smjer vektora toga nutarnjeg napona se poklapa sa položajem rotora.

Na slici 2 o.3 su prikazana dva karakteristična slučaja za promatranje statičke stabilnosti. Prvi slučaj imamo kad razmjerno slabi prijenosni sistem povezuje dva razmjerno jaka prijenosna sistema. U tom slučaju smatramo, da su sistemi s jedne i druge strane beskonačno veliki, tj. da im je reaktancija jednaka nuli i da je napon krut. U tom slučaju napon na kraju prijenosnog sistema npr. "U_1" je identičan s unutarnjim naponom sistema "E_1", jer izmedju tačaka 1 i 1' nema nikakve reaktancije. Kut "δ" izmedju unutarnjih napona "E_1" i "E_2" je ujedno kut izmedju napona "U_1" i "U_2" na krajevima prijenosnog sistema.

Kod drugog slučaja imamo generator i motor vezane prijenosnim sistemom, koji ima prijenosnu moć istog reda veličine kao što su i snage generatora odnosno motora. Reaktancije pojedinih dijelova prijenosnog sistema lako je odrediti, a u račun treba sada uzeti i reaktancije strojeva i to (jer se radi o statičkoj stabilnosti) njihove sinhrone reaktancije. Kut "δ" treba opet mjeriti izmedju unutarnjih napona strojeva. Za dano pogonsko stanje mogu se odrediti i naponi u pojedinim tačkama prijenosnog sistema, (tačke 1', 1, 2 i 2').

Treba naglasiti da se stabilnost gubi kad vrijednost 90° prekorači kut "δ" izmedju unutarnjih napona strojeva, a ne kut izmedju nekih drugih napona, pa ma kako zadatak bio definiran. U primjeru 2) mogu npr. biti zadani naponi $U_1' = \text{konst.}$ i $U_2' = \text{konst.}$, pa se traži granica stabilnosti. I opet će ta granica biti dosegnuta, kad kut izmedju unutarnjih napona strojeva bude jednak 90°, bez obzira, koliki je pri tome kut izmedju napona U_1' i U_2'.



Sl. 2o.3

RAZNI UTJECAJI

U dosadašnjim razmatranjima smo mnoge faktore zanemarili, ali ih kod tačnijih računa moramo uzeti u obzir. U prvom redu se radi o parametrima prijenosnog sistema, gdje ne samo da uzdužna grana ima i djelatni otpor, nego i poprečne grane prijenosnog sistema mogu biti od znatnog utjecaja. Nadalje ni strojevi nisu tako jednostavni, kako smo ih dosada uzimali u račun, jer kod njih dolazi do izražaja zasićenje, zatim možemo imati i istaknute polove, te konačno i regulacija napona igra svoju ulogu (dosada smo pretpostavljali da se uzbuda mijenja vrlo polagano, ili da se uopće ne mijenja).

Osim toga dosada smo promatrali sasvim jednostavni slučaj prijenosa snage od jednog mjesta na drugo, to jest problem smo sveli na dva stroja. Čak i ako imamo tako jednostavni slučaj prijenosa iz jednog mjesta na drugo, teret redovito nije sastavljen od sinhronih motora. Ali u praksi se obično radi o složenoj mreži s većim brojem izvora i konzumnih težišta, pa tu ovako jednostavni postupci kao što smo ih do sada prikazali ne zadovoljavaju.

Jedan od načina, da se utvrdi je li neko pogonsko stanje u mreži stabilno, jest taj da se za svaki stroj utvrdi raste li njegova snaga s povećanjem kuta "δ". Ako svi strojevi imaju ispunjen uslov $\frac{dP}{d\delta} > 0$, onda se pogonsko stanje smatra stabilnim.

MEHANIČKI ANALOGON

Električne prilike kod problema stabilnosti možemo vrlo pregledno prikazati pomoću mehaničkog analogona, i to kako za statičku tako i za dinamičku stabilnost. Čak šta više pomoću mehaničkog analogona možemo rješavati i konkretne zadatke. Na slici 2o.4 prikazan je s lijeve strane mehanički analogon, a s desne strane vektorski dijagram električnih veličina, koje on prikazuje.

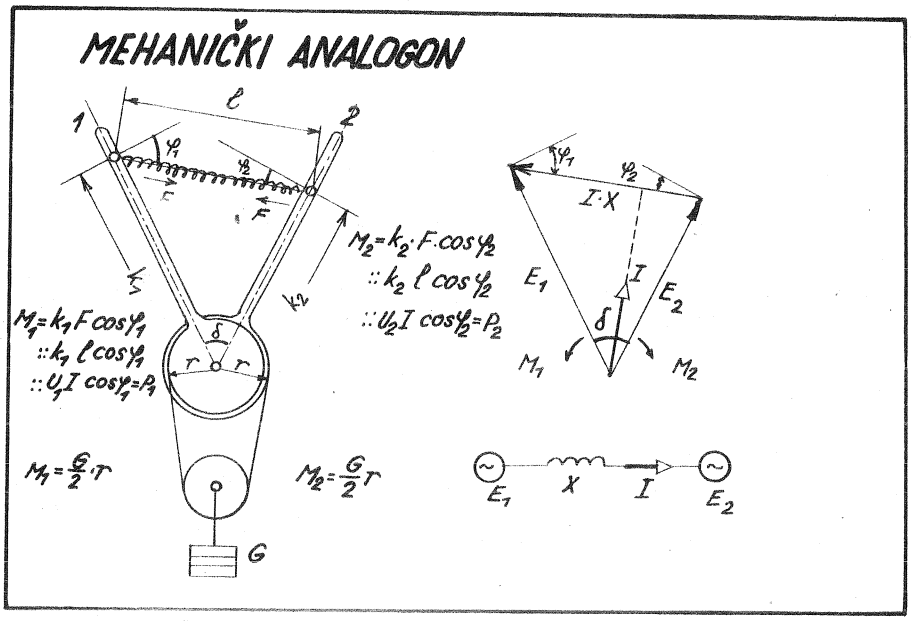
Mehanički analogon se sastoji od dviju užnica jednakog promjera, koje se mogu slobodno okretati oko iste osovine, a na svakoj se nalazi pričvršćen krak. Jedna užnica prikazuje generator, a druga užnica prikazuje motor u prijenosnom sistemu. Na obje užnice je pričvršćeno uže, a na tom užetu visi teret "G", čija se težina podjednako dijeli na obje užnice. Moment vrtnje uslijed tereta prikazuje mehanički moment vrtnje i to uslijed turbine, koja tjera generator i uslijed tereta, kojim je opterećen motor (ova dva momenta vrtnje su jednaka, jer su gubici prijenosa zanemareni). Ti momenti vrtnje su zbog konstantnog (sinhronog) broja okretaja proporcionalni snazi, pa teret "G" ujedno prikazuje snagu prijenosa.

Uslijed tereta "G" užnice bi se tako okrenule, da se njihovi krakovi rastave, da ih u tom ne sprečava spiralna opruga, koja vuče krakove skupa. Opruga je pričvršćena na krakove na udaljenostima "k_1" odnosno "k_2", a sila u opruzi je proporcionalna njezinoj dužini "ℓ". Ovaj dio mehaničkog analogona imitira električne veličine, i dužine krakova odgovaraju iznosu elektromotornih sila, a dužina spirale odgovara padu napona "IX" (a u nekom drugom mjerilu proporcionalna je struji "I"). Moment vrtnje, koji proizvodi spirala na jednu užnicu, jednak je umnošku dužine kraka, sile i kosinusa kuta, pod kojim spirala djeluje. Iz onog, što je prije rečeno, vidi se, da je moment vrtnje spirale proporcionalan električnoj snazi.

Analogon se postavi u takav položaj, da moment vrtnje uslijed spirale bude jednak momentu vrtnje uslijed tereta, čemu odgovara, da električna snaga bude jednaka mehaničkoj. Kut medju krakovima na analogonu jednak je tada kutu izmedju elektromotornih sila "E_1" i "E_2".

Ako povećamo teret (a to znači veći teret motora i veću mehaničku snagu turbine), onda će se krakovi proširiti na veći kut, što odgovara većoj električnoj snazi. Na taj način možemo pomoću analogona prikazati svako pogonsko stanje.

Kako medjutim, analogon ima ne samo svoje mase nego i elastičnu silu pera (koje odgovara sinhronizacionoj sili), to se pomoću njega mogu prikazati i njihanja, koja nastaju kod problema dinamičke stabilnosti. Tako pomoću mehaničkog analogona možemo i prikazivati i riješavati probleme ne samo statičke nego i dinamičke stabilnosti.



Sl. 2o.4

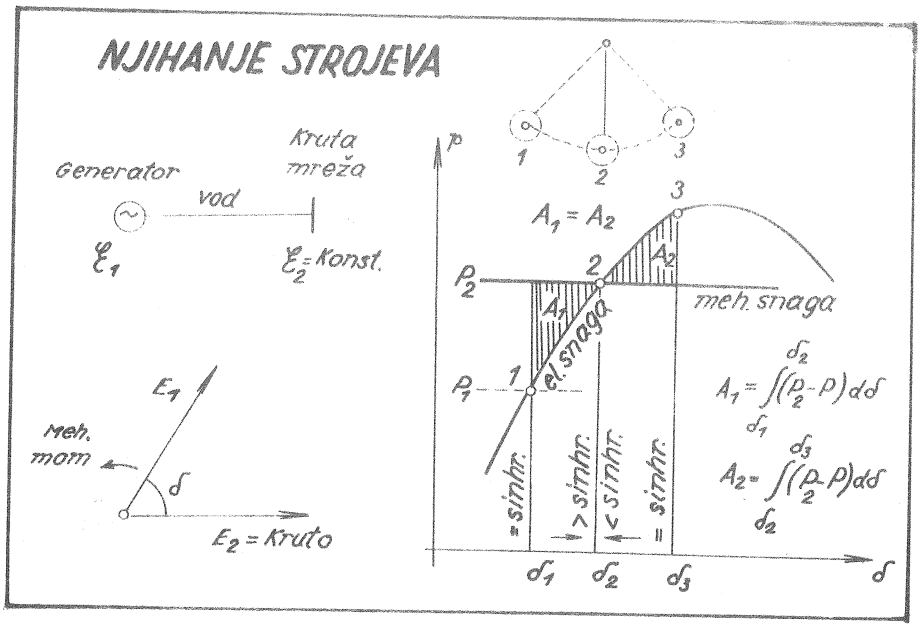
NJIHANJE STROJEVA

Na slici 2o.5 prikazan je jednostavni slučaj, kad je jedan generator preko voda priključen na krutu mrežu. Tom slučaju neka odgovara krivulja "$P(\delta)$", kako je prikazana na desnoj skici. Mehanička snaga turbine neka je jednaka "P_1", pa je to ujedno električna snaga koju generator daje u mrežu. Pogonsko stanje karakterizirano je dakle tačkom 1 (odredjenoj snagom "P_1") kojoj pripada kut "δ_1".

Uzmimo da sada nastane nagla promjena stanja na taj način što se snaga turbine naglo poveća na vrijednost "P_2". U tom momentu položaj rotora je još nepromijenjen, tako da je i kut još isti, tj. $\delta = \delta_1$. Električna snaga, koju generator daje u mrežu odgovara još uvijek tački 1, makar je mehanička snaga skočila na vrijednost "P_2". Postoji dakle razlika snage $\Delta P = P_2 - P_1$, tako da je mehanička snaga turbine veća, pa će se rotor ubrzati i ujedno će rasti kut "δ". Svakom kutu "δ" odgovara električna snaga prema ordinati krivulje "$P(\delta)$", dočim mehanička snaga ostaje konstantna. Sve dok kut "δ" ne dosegne vrijednost "δ_2", mehanička snaga prevladava nad električnom i kroz cijelo to

vrijeme rotor se ubrzava, tako da dosegne kut "δ_2" imajući brzinu veću od sinhrone.

U tački 2 su doduše mehanička i električna snaga jednake, ali rotor ima brzinu veću od sinhrone. Tokom ubrzavanja rotora turbina izvrši rad, koji je jednak razlici mehaničkog i električnog momenta vrtnje integriranog po kutu, a to je u nekom mjerilu jednako površini A_1. Rotor će zbog veće brzine od sinhrone nastaviti, da se kreće u istom smislu, tako da će se kut "δ" povećavati i iznad vrijednosti "δ_2". No u tom području je električna snaga veća od mehaničke, pa će se rotor usporavati tako dugo, dok mu brzina opet ne padne na vrijednost sinhrone brzine.



Sl. 2o.5

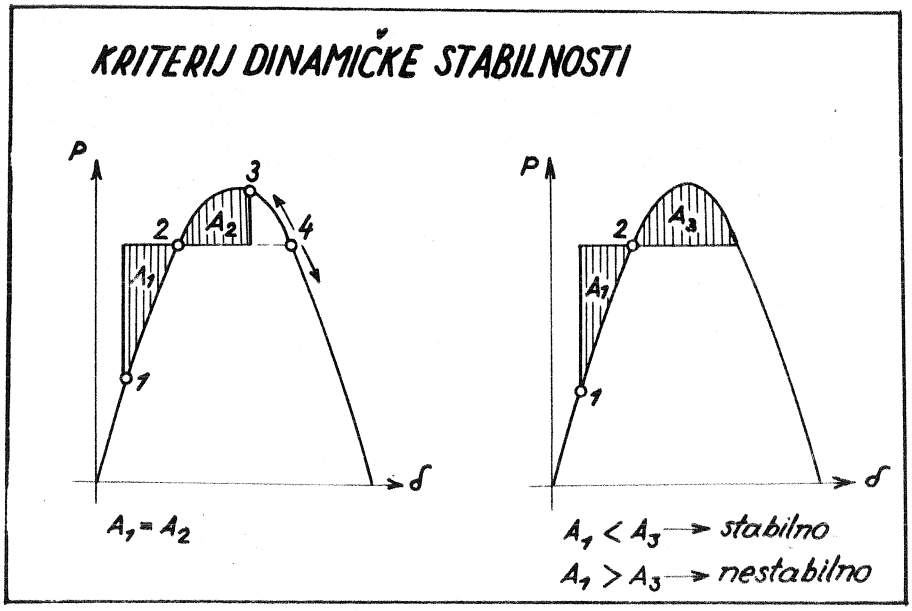
To će se dogoditi kad dosegnemo kut "δ_3", koji možemo odrediti iz uslova $A_1 = A_2$. Naime energija, koja se nakupila u rotoru izmedju položaja 1 i 2, sad se troši na svladavanje viška električne snage, dok se sasvim ne utroši, a to se zbiva izmedju položaja 2 i 3. Zbog toga izvršeni rad izmedju 2 i 3 mora biti jednak radu, koji je izvršen izmedju 1 i 2, odnosno odgovarajuće površine A_1 i A_2 moraju biti jednake.To je tzv. "kriterij jednakih površina".

Rotor se neće zaustaviti niti u tački 3, makar tu ima brzinu jednaku sinhronoj. Višak električne snage, koju generator daje u mrežu zakočit će rotor tako da će se on usporavati i dalje, pa će se kut "δ" smanjivati. Kad postignemo položaj 2 brzina rotora će biti manja od sinhrone pa će rotor nastaviti da zaostaje sve do kuta "δ_1". I tako će rotor njihati izmedju tačaka 1 i 3, isto kao što njihalo njiše izmedju dva skrajna položaja. Zbog gubitaka energije, medjutim, će amplitude njihanja biti sve manje, dok se rotor ne smiri u položaju 2.

Isto takva njihanja rotora oko sinhrone brzine nastaju i kod sinhronog motora, ako npr. nastane nagla promjena tereta. Uzroci njihanja, medjutim, nastaju i uslijed drugih udaraca u mreži, npr. uslijed kratkog spoja, iskapčanja pojedinih elemenata mreže i slično.

KRITERIJ DINAMIČKE STABILNOSTI

Na slici 2o.6 je s lijeve strane ponovno prikazano područje njihanja stroja na temelju kriterija jednakih površina, i to ako se stanje promijeni od prvotnog stanja 1 na konačno stanje 2. Sve dok god krajnji položaj 3 ostane iznad horizontale kroz tačku 2 stabilnost neće biti porušena, jer će uvijek desno od položaja 2 prevladavati električna snaga i vraćati karakterističnu tačku ulijevo. Pri tome nije uopće važno, da li krajnja tačka 3 prijedje najvišu tačku krivulje ili ne.



Sl. 2o.6

Tek ako krajnja tačka 3 predje desno od tačke 4 na slici, onda je stabilnost izgubljena, jer je u području desno od tačke 4 električna snaga manja od mehaničke, pa se kut "δ" uslijed toga sve više povećava. Da li će krajnja tačka 3 dosegnuti položaj 4 ili ne ovisi od veličine površina "A_1" i "A_3" na desnoj skici. Ako je $A_1 < A_3$, onda će tačka 3 ostati lijevo od položaja 4 i stabilnost će biti sačuvana. Ako je $A_1 > A_3$ onda će rotor prekoračiti položaj 4 i stabilnost će biti izgubljena.

Da stabilnost bude sačuvana možemo dakle postaviti jednostavni uslov, a taj je da mora biti $A_1 < A_3$.

ISKLAPANJE JEDNOG VODA

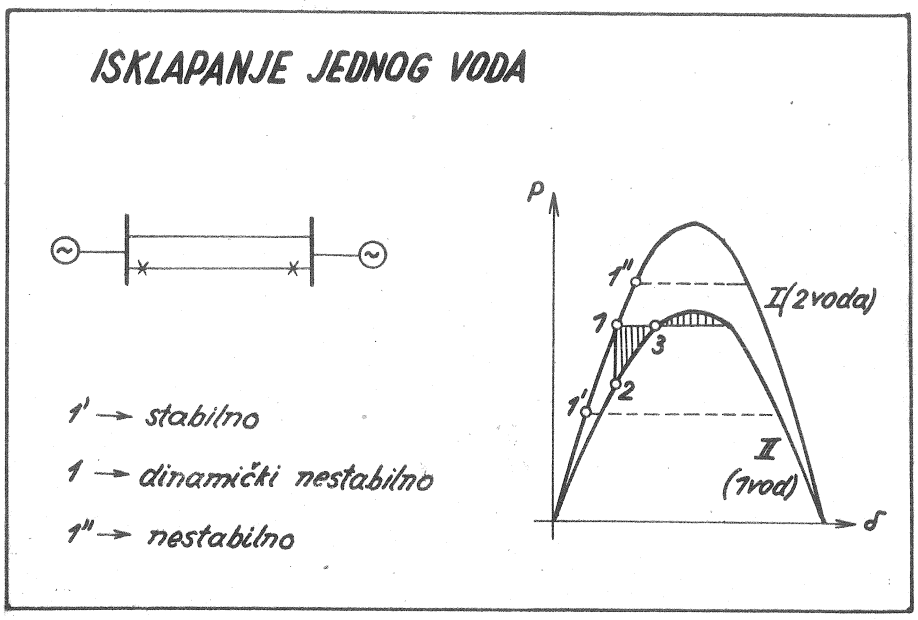
Na slici 2o.7 dan je primjer upotrebe prije utvrdjenog kriterija za dinamičku stabilnost. Neka je izmedju dva stroja dan prijenosni sistem od dva paralelna voda, i neka u jednom momentu bude jedan vod iskopčan. Na desnoj skici su dane dvije "P(δ)" - krivulje, i to krivulja I, koja vrijedi, ako su oba voda u pogonu i krivulja II, koja vrijedi, ako je jedan vod iskopčan (slično bi bilo, kad bi se općenito na bilo koji način smanjila prijenosna moć izmedju dva stroja).

Uzmimo najprije, da je pogonsko stanje prije iskapčanja voda bilo definirano tačkom 1 na krivulji I. Nakon iskapčanja voda ne vrijedi više krivulja I nego krivulja II, ali kut "δ" se u momentu nije mogao promijeniti, tako da je sad električno stanje definirano tačkom 2. Mehanička snaga ostala je nepromijenjena i odgovara horizontali kroz tačku 1. Treba dakle konstruirati odgovarajuće površine uz krivulju II (to su šrafirane površine na skici). Budući da je lijeva površina veća od desne, to znači da stabilnost neće biti održana, makar bi na krivulji II bio moguć stabilni pogon s istim teretom, da nije bilo udaraca (tačka 3 leži na lijevoj strani krivulje).

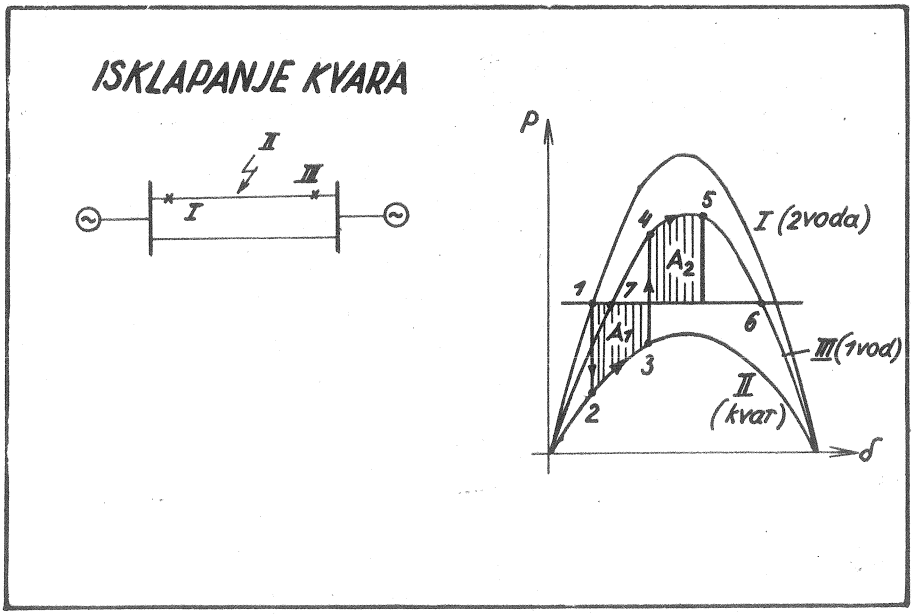
Da je pogonsko stanje prije isklapanja bilo definirano tačkom 1', stabilnost bi bila uščuvana, a da je bilo definirano tačkom 1" bila bi prekoračena čak i granica statičke stabilnosti.

ISKLAPANJE KVAROVA

Na slici 2o.8 je prikazan slučaj kod iskapčanja kvara uslijed kratkog spoja na jednom od paralelnih vodova. Kod odredjenog pogonskog stanja s oba voda u pogonu (za to stanje vrijedi krivulja I) nastane kratki spoj na jednom vodu (za to stanje dok traje kratki spoj vrijedi krivulja II), a nakon nekog vremena iskopčamo bolesni vod (za stanje sa samim jednim vodom vrijedi krivulja III).



Sl. 2o.7



Sl. 2o.8

Pogonsko stanje prije kvara neka je definirano tačkom 1 na krivulji I. Kad nastane kvar ne vrijedi više krivulja I nego krivulja II, pa karakteristična tačka skoči u položaj 2 na krivulji II, pri čemu je kut "δ" ostao nepromijenjen. Sad ta tačka putuje po krivulji 2, sve dok se bolesni vod ne iskopča, a uzmimo da se to dogodi kad dosegnemo tačku 3. Zbog iskapčanja bolesnog voda nastaje skok u tačku 4 na krivulji II uz nepromijenjeni kut "δ". Do tog momenta smo imali ubrzavanje rotora generatora (zbog veće električne snage), sve dok ne dosegnemo tačku 5 (dobivenu iz kriterija $A_1 = A_2$). Budući da nismo dosegli kritični položaj 6, stabilnost će biti uščuvana, i karakteristična tačka će sve vratiti ulijevo, njihati na krivulji III i konačno se smiriti u tački 7.

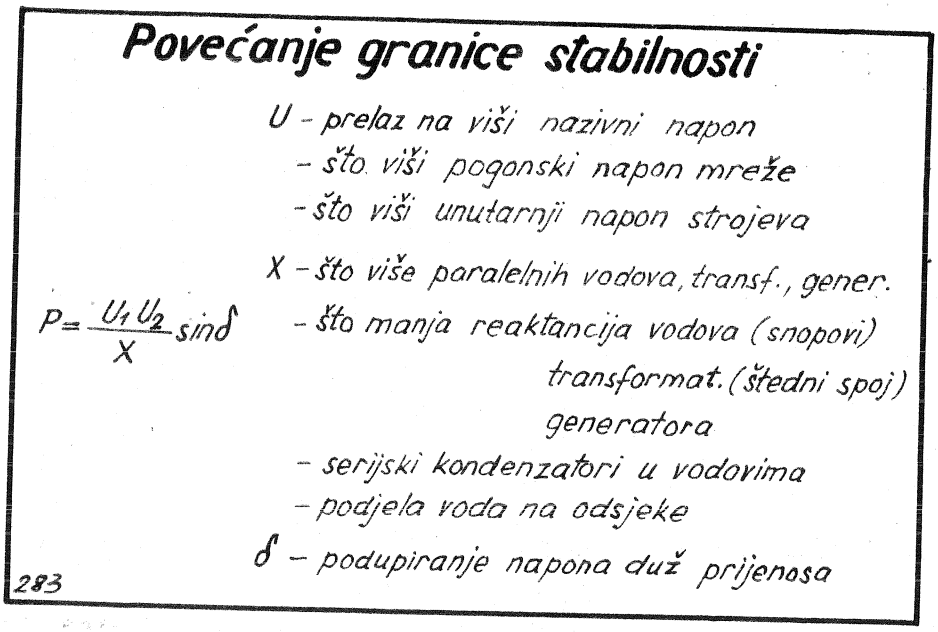
Medjutim, rješavanje je li stabilnost uščuvana ili ne za ovakav slučaj u praksi na ovaj način nije moguće. Morao bi nam naime biti poznat položaj tačke 3 u kojoj nastaje iskapčanje bolesnog voda, a tu tačku unaprijed ne poznamo. Obično je zadano vrijeme od nastajanja kvara do momenta iskapčanja voda, pa je potrebno crtati tzv. krivulju njihanja, tj. krivulju kuta "δ" u ovisnosti o vremenu. U tu svrhu potrebno je poznavati i mehaničke karakteristike strojа.

POVEĆANJE GRANICE STABILNOSTI

Sredstva za povećanje granice stabilnosti vide se u principu iz fundamentalne formule za snagu, koja formula je ponovljena na slici 2o.9, a tu su ujedno navedena spomenuta sredstva.

Da bi snaga bila što veća treba u prvom redu povećati napon, što se može načiniti na različite načine. Najefikasnije je prijeći na viši nazivni napon (svi vodovi npr. imaju podjednaki induktivitet po kilometru dužine, pa prelaz na dvostruki napon - recimo od 11o na 22o kV - početverostručuje prijenosnu snagu). Ali i uz odredjeni nazivni napon može se pogonski napon mreže držati što višim. Isto tako može se i unutarnji napon strojeva držati što višim, uz razmjerno visoku uzbudu, što je dakako u vezi s jalovom snagom, koju daju strojevi u mrežu.

Nadalje se povećanje snage može postići smanjenjem uzdužnih reaktancija. Općenito se to može postići što većim brojem paralelnih vodova, transformatora i generatora, koje dakako treba u prvom redu imati u mreži, a osim toga ih držati i u pogonu. Osim toga se mogu poduzeti mjere, da se kod pojedinih elemenata mreže smanji reaktancija: Kod vodova primjenom vodiča u snopu, kod transformatora primjenom štednog spoja, a kod generatora izvedbom s malom reaktancijom (i veća nazivna snaga transformatora i generatora smanjuje dakako njihovu reaktanciju). Mogu se nadalje upotrijebiti serijski kondenzatori u vodovima koji kompenziraju njihov induktivitet. Kod veoma dugih višestrukih vodova može se provesti podjela na odsjeke tako, da se zbog kvara ne mora iskapčati jedan vod u čitavoj dužini nego samo unutar jednog odsjeka.



Sl. 2o.9

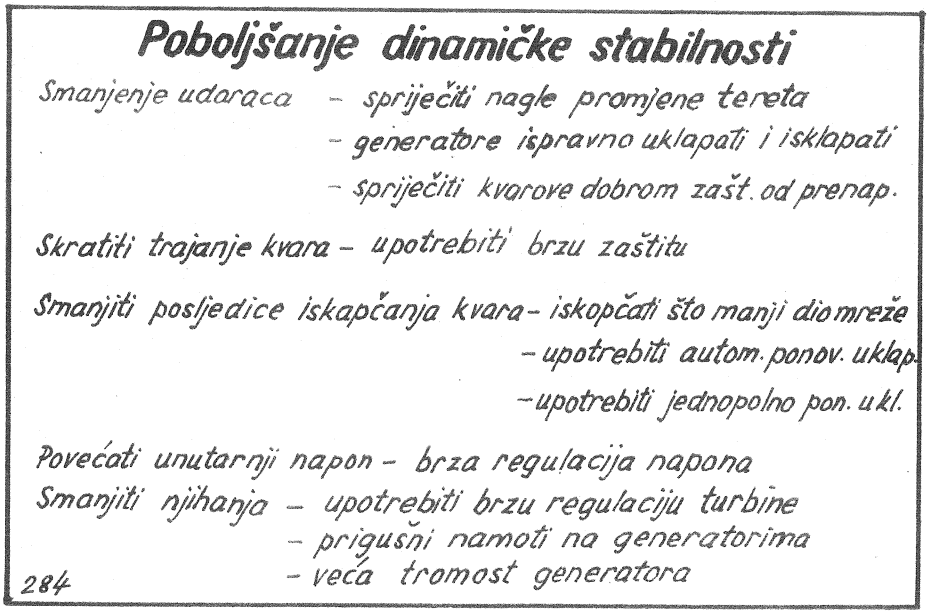
Konačno može se povećanje granice stabilnosti postići i povećanjem kuta "δ" iznad vrijednosti od 9o°, ako se napon duž prijenosnog sistema podupre pomoću elektrana ili sinhronih kompenzatora (a ima i drugih načina), pa se na taj način ukupna dužina prijenosa podijeli na sektore (s naponom održavanim na oba kraja sektora) i kut "δ" smije doseći vrijednost od 9o° za svaki pojedini sektor.

POBOLJŠANJE DINAMIČKE STABILNOSTI

Sredstva za daljnje poboljšanje dinamičke stabilnosti prikazana su na slici 2o.1o.

Budući da pri promatranju dinamičke stabilnosti poteškoće nastaju uslijed udaraca u mreži, u prvom redu treba nastojati, da se broj takvih udaraca u mreži smanji na minimum. U tom pogledu treba spriječiti nagle promjene tereta, generatore treba ispravno uklapati i isklapati, a naročito treba što više spriječiti nastajanje kvarova u mreži putem dobre zaštite od prenapona.

Medjutim kvarove ipak ne možemo potpuno izbjeći. Vrijeme, dok kvar traje, je ono pogonsko stanje, koje je najneugodnije u pogledu stabilnosti. Zbog toga treba trajanje kvara što više skratiti, pa je za iskapčanje kvarova potrebno primijeniti brzu zaštitu.



Sl. 2o.1o

Nakon iskapčanja kvara se mogućmost prijenosa smanji u usporedbi sa zdravim stanjem prije kvara, pa tu štetnu posljedicu treba takodjer smanjiti na minimum. To se može postići, ako se iskopča što manji dio mreže. Isto tako se to nepovoljno pogonsko stanje može skratiti na manje od jedne sekunde, ako se uvede automatsko ponovno uklapanje, pa se opet uspostavi prvotno pogonsko stanje, ukoliko uzrok kvara nije bio trajan. Treće sredstvo u ovom pogledu jest upotreba jednopolnog isklapanja, tj. da se iskopča samo bolesna faza, i to opet u vezi s automatskim ponovnim uklapanjem.

Daljnji način za poboljšanje se sastoji u upotrebi brze regulacije napona, koja djeluje još za vrijeme njihanja strojeva, jer se s pojačanjem uzbude i povišenjem unutarnjeg napona poveća prijenosna snaga.

Konačno se prilike dinamičke stabilnosti mogu poboljšati tako, da se uvedu sredstva, koja smanjuju mehaničko njihanje strojeva. U tom pogledu koristi primjena brze regulacije turbine, primjena prigušnih namota kod generatora, te u zadnjoj liniji i upotreba većih zamašnih masa u strojevima.

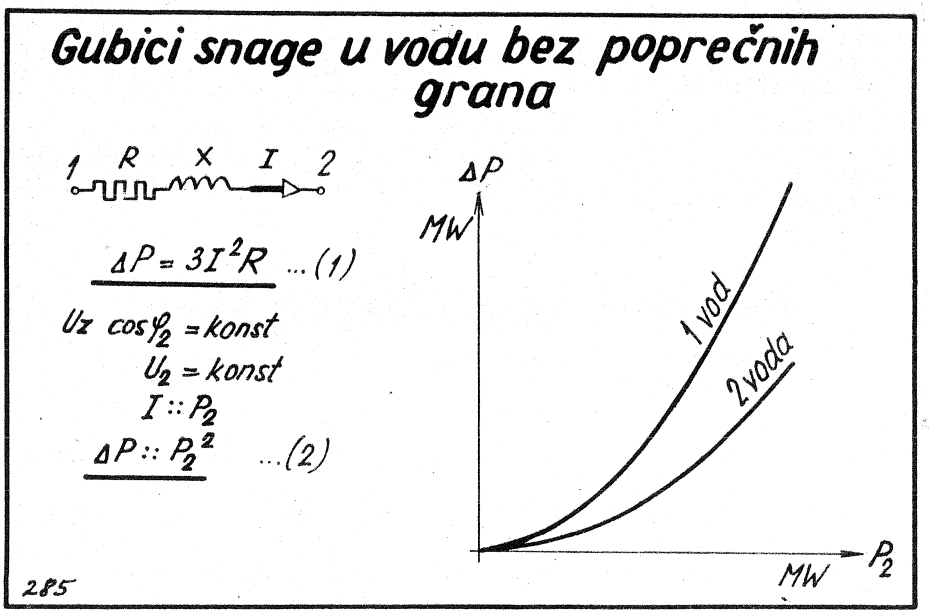
21. GUBICI SNAGE I ENERGIJE

Kod svakog pogonskog stanja nastaju gubici snage, koje možemo odrediti iz razlike djelatne snage na početku i na kraju prijenosnog sistema, ili na koji drugi način. Ako takvo pogonsko stanje potraje neko vrijeme, imat ćemo odgovarajuće gubitke energije.

U daljnjemu ćemo se pozabaviti promatranjem:

a) gubitaka snage za odredjeno pogonsko stanje,

b) gubitaka energije za odredjeni vremenski period, obično za jednu godinu dana.



Sl. 21.1

GUBICI SNAGE U VODU BEZ POPREČNIH GRANA

Prvo ćemo razmotriti prilike u vodu (ili prijenosnom sistemu), kojemu možemo zanemariti poprečne grane. U shemi voda ostaje samo djelatni i induktivni otpor uzdužne grane, vidi sliku 21.1, a struja ima istu vrijednost duž čitavog voda. Gubitke snage najjednostavnije je ovdje odrediti kao Džaulove gubitke, koji su u izrazu (1) dani za sve tri faze. Ako pretpostavimo, da su napon i faktor snage na kraju voda konstantni (a to se obično kao približno može uzeti), onda će gubici biti proporcionalni kvadratu prenesene djelatne snage, izraz (2). Ujedno možemo reći, da će uz istu prenesenu djelatnu snagu gubici biti to manji, što je struja manja (što veći napon, što manja jalova snaga u vodu), i što je djelatni otvor voda manji.

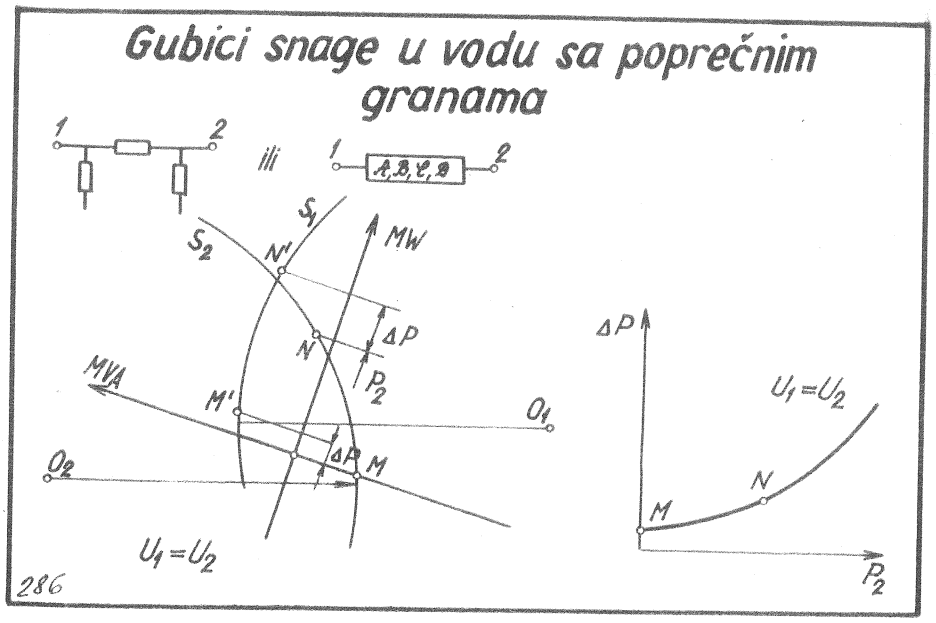
Gubitke u ovisnosti o prenesenoj snazi možemo prikazati pomoću parabole, kao što je učinjeno u dijagramu na desnoj strani slike. Prikazani su gubici za jedan vod i za dva paralelna voda (potonji gubici su dva puta manji). Iz dijagrama se vidi da gubici padnu na nulu kad prijenosna snaga padne na nulu, a osim toga da su gubici kod dva paralelna voda uvijek manji od gubitaka kod samo jednog voda. Iz tog možemo izvući zaključak, da je (obzirom na što manje gubitke) uvijek povoljnije raditi sa što većim brojem paralelnih vodova u pogonu.

Treba napomenuti, da se djelatni otpor voda mijenja s temperaturom. Obično, medjutim računamo s otporom, koji odgovara nekoj srednjoj temperaturi, npr. 20°C. Ako pak želimo tačnije rezultate, moramo uzeti u račun i utjecaj temperature na veličinu otpora.

GUBICI SNAGE U VODU S POPREČNIM GRANAMA

Na slici 21.2 prikazan je slučaj voda s poprečnim granama ili općenitog prijenosnog sistema. Gubitke snage ne možemo tako jednostavno izračunati, jer postoji promjena struje duž voda, a (općenito govoreći), i gubici u poprečnim granama. Gubitke možemo dakako odrediti odredivši električne prilike po bilo kojem postupku iz teorije prijenosa, ali je za ovakav slučaj redovito najprikladnije koristiti kružni dijagram, kao što je pokazano na slici.

Na slici su prikazana dva pogonska stanja uz uslov, da su naponi na oba kraja medjusobno jednaki. Tačka "M" odgovara praznom hodu i definira snagu



Sl. 21.2

na kraju voda, koja je u ovom slučaju jednaka nuli. Ta tačka leži na kružnici sekundarne snage "S_2" uz već spomenuti uslov $U_1 = U_2$. Njoj pripadna tačka "M'" na kružnici "S_1" definira snagu na početku voda. Isto tako tačka "N" definira snagu na kraju voda za neko drugo pogonsko stanje, a njoj pripadna tačka "N'" daje snagu na početku voda. Pomoću tih tačaka su definirane djelatne snage na početku i na kraju voda za razna pogonska stanja, a razlika primarne i sekundarne djelatne snage daje gubitke za to pogonsko stanje (u kružnim dijagramima postoji mogućnost i direktnog očitanja gubitaka, ako se nacrtaju tzv. kružnice gubitaka).

Iz tako dobivenih podataka za razna pogonska stanja možemo crtati dijagram gubitaka snage u ovisnosti o snazi na kraju voda (prenesenoj snazi), kao što je i učinjeno na desnoj strani slike. Tačke "M" i "N" odgovaraju tačkama "M" i "N" u kružnom dijagramu. Kao što je već rečeno, krivulja "ΔP" u ovisnosti o "P_2" crtana je za uslov $U_1 = U_2$. Ali dakako gubitke možemo prikazati u ovisnosti o "P_2" i za druge uslove (npr. $\cos \varphi_2 = \text{konst.}$), pa i u ovisnosti s drugim električnim veličinama.

Ovdje treba naglasiti, da kod voda s poprečnim granama neće gubici biti jednaki nuli, ako je na kraju djelatna snaga jednaka nuli, i to upravo zbog djelovanja poprečnih grana, pa čak ako i nema gubitaka u samim poprečnim granama. Npr. vod bez odvoda uzimat će za svoje poprečne grane kapacitivnu struju, koja će teći kroz uzdužne grane i tamo u djelatnom otporu stvarati gubitke.

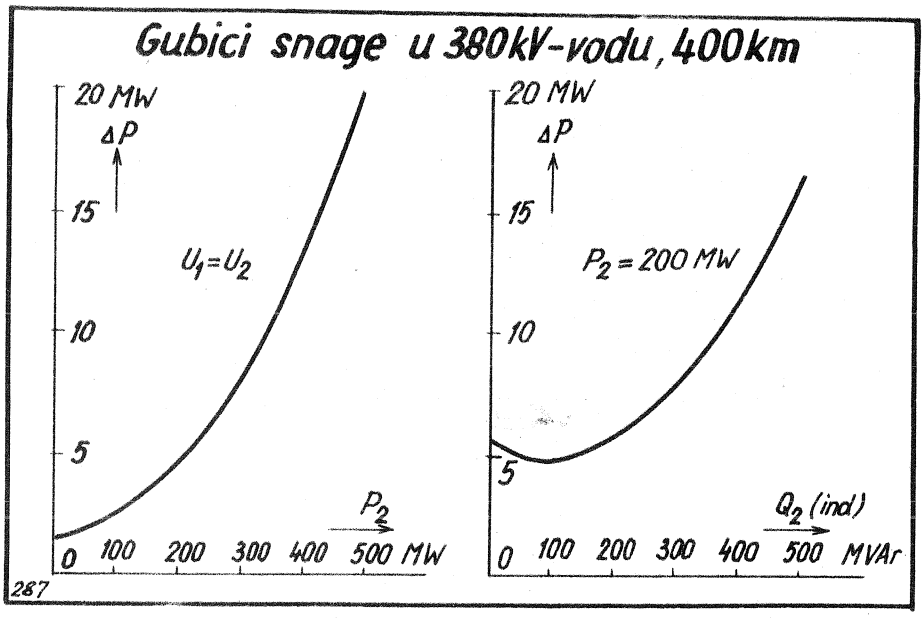
GUBICI SNAGE U 380 kV-VODU

Na slici 20.3 prikazani su dijagrami prema podacima očitanima iz kružnog dijagrama za 380 kV švedski vod (s dva vodiča u snopu) dužine 400 km. Na lijevoj strani dana je ovisnost gubitaka o djelatnoj snazi na kraju, uz uslov da su naponi na početku i kraju jednaki. Iz dijagrama se dobro vidi, da postoje gubici od oko 1,5 MW i za slučaj da je $P_2 = 0$. Na desnoj strani dana je ovisnost gubitaka o jalovoj snazi na kraju voda, uz uslov da se uvijek prenosi djelatna snaga $P_2 = 200$ MW. Ovdje je karakteristično, da gubici nisu najmanji kod $Q_2 = 0$ nego kod neke odredjene vrijednosti (u ovom slučaju kod nekih 100 MVAr induktivnih), pa je u pogledu gubitaka najpovoljnije, ako na kraju imamo odredjenu induktivnu jalovu snagu.

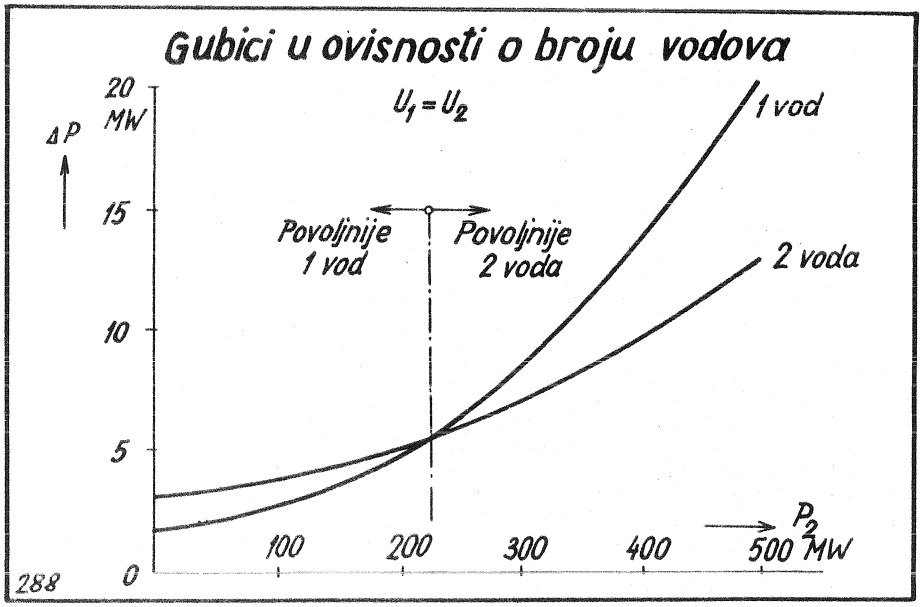
GUBICI U OVISNOSTI O BROJU VODOVA

Na slici 21.4 prikazani su gubici za 1 i za 2 voda 380 kV, 400 km, švedske izvedbe, i to opet u ovisnosti o prenesenoj snazi uz uslov $U_1 = U_2$. Vidi se,

da su u slučaju, kad snagu prenosimo s 2 paralelna voda gubici manji nego kod jednog voda samo za veće prenesene snage. Kod manjih snaga su gubici kod 2 voda veći nego kod jednog voda i to zbog djelovanja poprečnih grana. U pogledu gubitaka bi dakle bilo povoljnije pogon vršiti samo s jednim vodom, sve dok snaga prijenosa ne dosegne vrijednost odredjenu sjecištem obiju krivulja (u našem primjeru je to oko 225 MW), i tek kod većih snaga staviti u pogon i drugi vod. Pitanje je, medjutim, hoćemo li iz drugih razloga (npr. sigurnost pogona) dozvoliti iskapčanje jednog od paralelnih vodova.



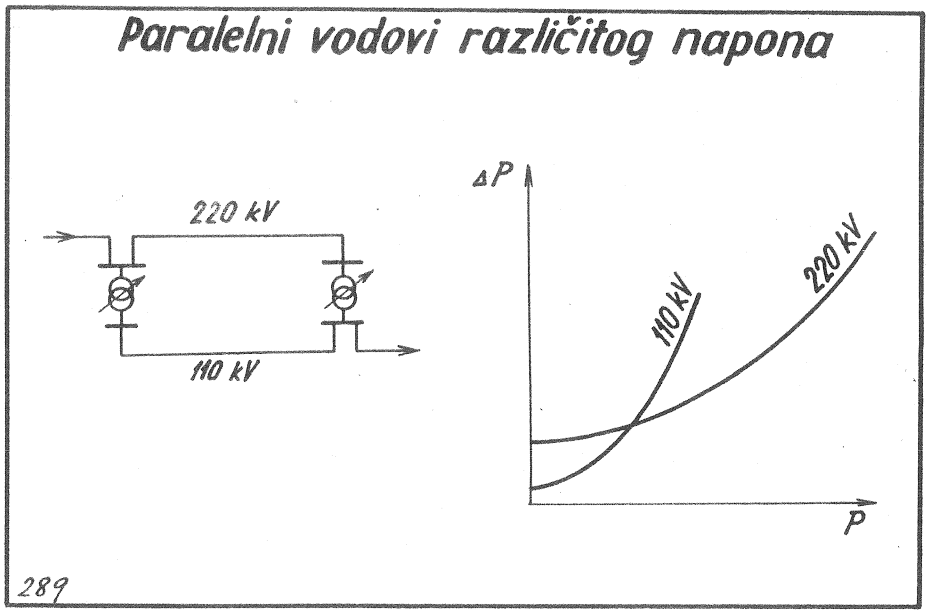
Sl. 21.3



Sl. 21.4

PARALELNI VODOVI RAZLIČITOG NAPONA

Na slici 21.5 je prikazan slučaj prijenosa, koji možemo vršiti bilo putem 22o kV-voda bilo putem llo kV-voda. Ako nemamo na raspolaganju mogućnost regulacije razdiobe snage u oba paralelna voda, onda ne možemo oba voda držati paralelno u pogonu, jer će raspodjela snaga biti vrlo nepovoljna (bilo u pogledu ukupnih gubitaka bilo uslijed preopterećenosti jednog voda). Iz dijagrama na desnoj strani slike se vidi da će u pogledu gubitaka biti kod manjih snaga povoljnije držati u pogonu vod llo kV, a kod većih snaga prijenosa bit će povoljnije pogon vršiti pomoću voda od 22o kV.



Sl. 21.5

SMANJENJE GUBITAKA SNAGE U POGONU

Prema onome što smo do sada razmotrili, na slici 21.6 su pregledno dana sredstva za smanjenje gubitaka snage u pogonu.

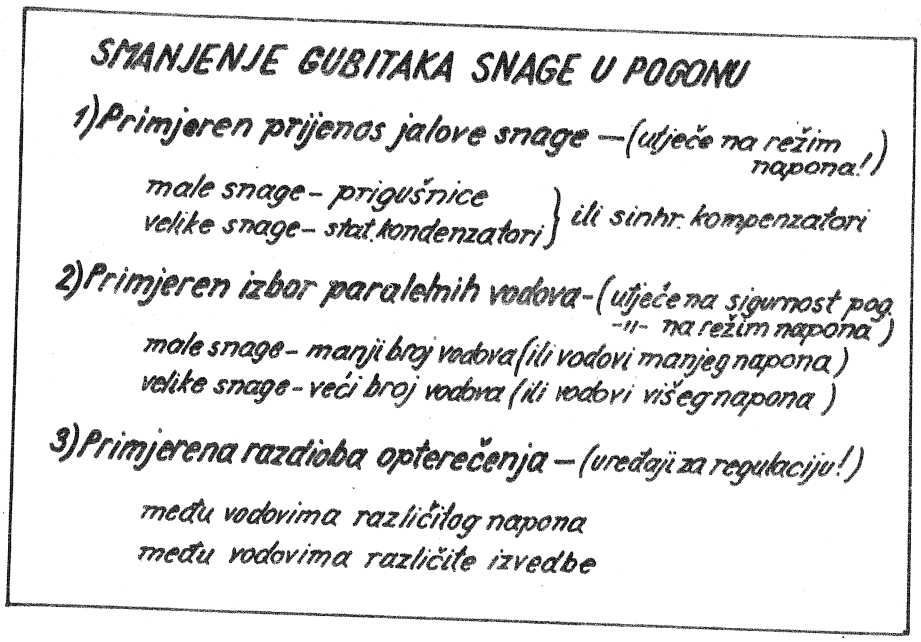
U prvom redu dolazi u obzir regulacija jalove snage pomoću prigušnica, statičkih kondenzatora ili sinhronih kompenzatora, tako da se prenosi ona jalova snaga, koja daje najmanje gubitke. No ovaj način djeluje na režim napona, pa ga treba uskladiti s regulacijom napona, ako npr. imamo regulacione transformatore. Općenito se može npr. reći, da je regulaciju napona u praznom hodu ekonomičnije vršiti pomoću prigušnica nego pomoću regulacionih transformatora.

Nadalje dolazi u obzir izbor, koje ćemo od paralelnih vodova držati u pogonu a koje ne. Kod manjih snaga povoljnije je imati manji broj vodova u pogonu, a kod većih snaga veći broj vodova. Ako su paralelni vodovo različitog napona, onda kod manjih snaga pogon treba vršiti pomoću vodova manjeg napona, a kod većih snaga pomoću vodova većeg napona. Ovaj način smanjenja gubitaka djeluje ne samo na režim napona nego i na sigurnost pogona, pa treba o tome voditi računa.

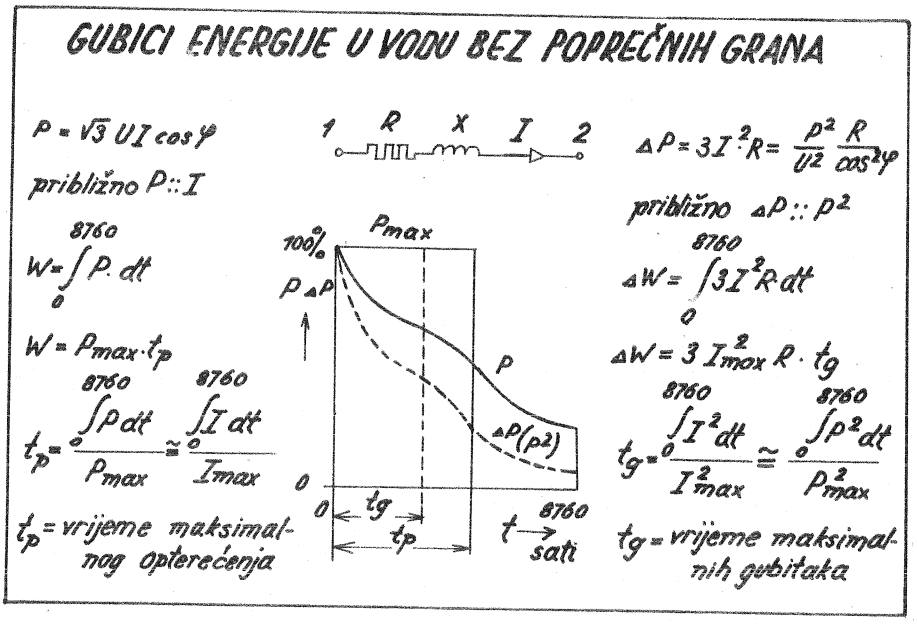
Konačno dolazi u obzir djelovanje na razdiobu opterećenja medju paralelnim vodovima, tako da gubici pri tome budu po mogućnosti minimalni. To dolazi u obzir prvenstveno kod vodova različitog napona, ali i kod vodova istog napona na različite izvedbe. Za djelovanje na razdiobu opterećenja može se upotrijebiti regulacija napona ili serijski kondenzatori, a u krajnjoj liniji iskapčanje pojedinih vodova.

GUBICI ENERGIJE U VODU BEZ POPREČNIH GRANA

Kako se odredjuju gubici energije u vodu bez poprečnih grana, prikazano je na slici 21.7. U sredini gore prikazana je shema voda (odnosno prijenosnog sistema) sa samom uzdužnom granom. Da odredimo godišnje gubitke energije



Sl. 21.6



Sl. 21.7

poteškoća se sastoji u tome, što se struja u vodu tokom godine neprestano mijenja, pa se mijenjaju i gubici snage. Godišnje gubitke energije dobijemo, ako gubitke snage integriramo po vremenu kroz čitavu godinu. U praksi se, međutim, primjenjuje jednostavniji postupak, analogan onome za određivanje prenesene energije.

Na lijevoj strani slike dan je postupak za prenesenu energiju. Iz formule za snagu se vidi, da je snaga približno proporcionalna struji (uz konstantni napon i faktor snage).

Prenesenu energiju dobijemo, ako snagu integriramo po vremenu kroz 8760 sati (to je broj sati u godini dana). Integracija se obično vrši pomoću sredjene krivulje opterećenja, koja je na slici u sredini prikazana punom crtom i označena sa "P".

Sredjena krivulja opterećenja se dobiva tako, da se svakoj ordinati "P" prida tolika apscisa "t", koliko vremena kroz godinu dana se prenosi ta snaga "P" ili veća. Površina ispod krivulje "P" daje nam prenesenu energiju kroz godinu dana. Tu površinu možemo pretvoriti u pravokutnik s visinom "P_{max}", pa je s time definirana njegova osnovica "t_p", što nazivamo vrijeme maksimalnog opterećenja. Iz uvjeta jednakosti površina slijedi izraz za odredjivanje vrijednosti "t_p". Analogno se postupa kod odredjivanja godišnjih gubitaka energije. Gubici snage su proporcionalni sa "P^2", pa zbog toga prijašnju krivulju "P" kvadriramo i dobijemo krivulju koja je na slici prikazana crtkano i označena sa "ΔP". Godišnje gubitke energije dobijemo, ako gubitke snage integriramo po vremenu, a to je (u nekom mjerilu) jednako površini ispod krivulje "ΔP". Tu površinu možemo opet pretvoriti u pravokutnik s visinom "P^2_{max}", pa je time definirana njegova osnovica "t_g", što nazivamo vremenom maksimalnih gubitaka. Iz uvjeta jednakosti površina slijedi izraz za odredjivanje vremena "t_g", a to je vrijeme kroz koje bismo morali prenositi maksimalnu snagu, da dobijemo gubitke jednake stvarnim godišnjim gubicima. Godišnje gubitke energije dobijemo dakle, ako gubitke snage uslijed maksimalne struje u vodu pomnožimo s vremenom maksimalnih gubitaka.

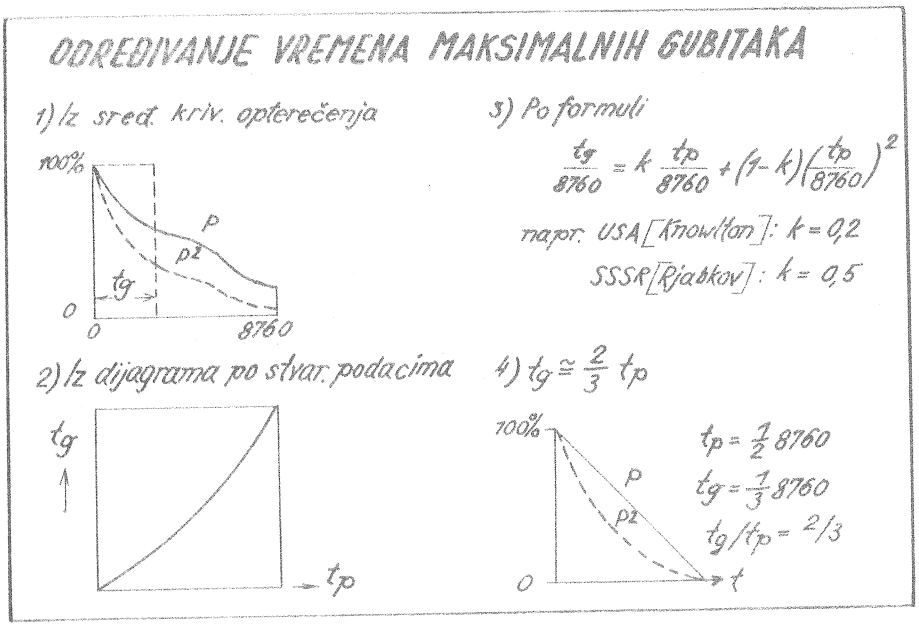
ODREDJIVANJE VREMENA MAKSIMALNIH GUBITAKA

Načini, kako se može odrediti vrijeme maksimalnih gubitaka "t_g" prikazani su na slici 21.8.

Prvo je prikazan način odredjivanja iz sredjene krivulje opterećenja, kao što je već bilo prikazano. Ovaj način je najtačniji, ali treba raspolagati sredjenom krivuljom opterećenja, što obično nije slučaj. Treba naglasiti, da se ovdje radi o sredjenoj krivulji opterećenja u vodu (prijenosnom sistemu), koja se može znatno razlikovati od krivulje opterećenja samoga konzuma.

Drugi način je očitanje iz posebno pripremljenog dijagrama, gdje je "t_g" dan u ovisnosti o "t_p". Takvi se dijagrami mogu pripremiti prema stvarnim podacima, ali treba imati mnogo podataka za njihovu izradu, a primjena im je manje više ograničena na neko područje i na neki vremenski interval.

Treći način je sličan drugom, a sastoji se u korištenju formule, u kojoj je "t_g" dan u ovisnosti o "t_p". Ta formula u stvari aproksimira krivulju iz drugog načina pomoću parabole. Prednost joj je, što su dane prilike karakterizirane samo jednim faktorom "k". Inače ima mane kao i dijagram kojega formula aproksimira.



Sl. 21.8

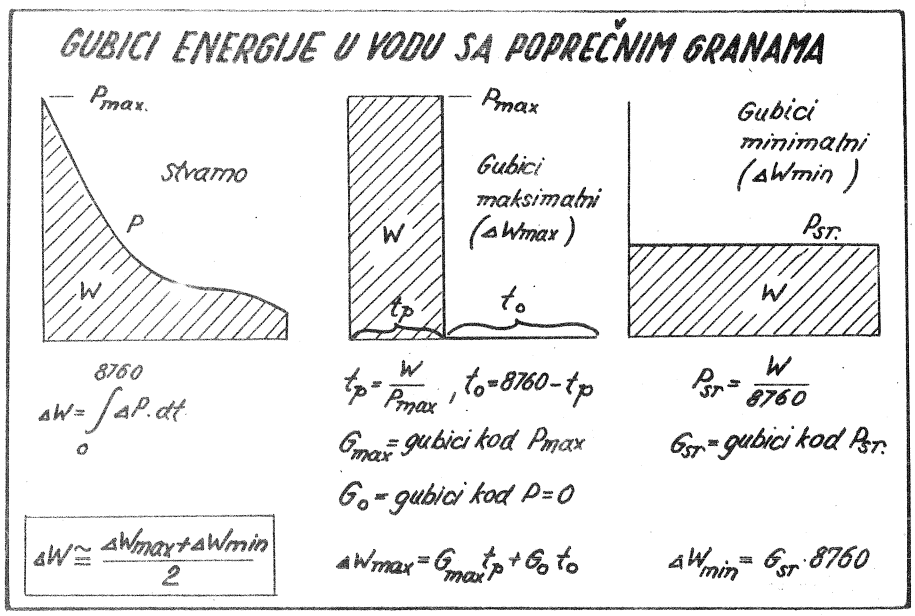
Konačno se može grubo uzeti, da je "t_g" približno jednako 2/3 t_p. To vrijedi kao gruba aproksimacija dosta dobro za prilike, koje vladaju u energetskim sistemima. Taj odnos izmedju "t_g" i "t_p" je tačan za slučaj, da je sredjena krivulja opterećenja dana pravcem, koji od pune vrijednosti pada na nulu, što je takodjer prikazano na slici.

Za manje vrijednosti "t_p" odnos "t_g/t_p" je općenito manji, a za veće vrijednosti "t_p" je veći. Ipak je uvijek "t_g" manje od "t_p". Jedino kod krajnjih vrijednosti $t_p = 0$ i $t_p = 8760$ sati postaje $t_g = t_p$.

GUBICI ENERGIJE U VODU SA POPREČNIM GRANAMA

Kao što smo vidjeli, gubici snage u vodu s poprečnim granama nisu proporcionalni s kvadratom prenesene snage, pa pojam vremena maksimalnih gubitaka "t_g" gubi ovdje svoj smisao, jer prijašnji izvod nema opravdanja. Moramo dakle postupiti na drugi način.

Uzmimo, da je zadana sredjena krivulja opterećenja, kao na slici 21.9 lijevo gore. Mogli bismo doduše odrediti krivulje "ΔP" (računajući tačku po tačku), i onda integracijom te krivulje odrediti i godišnje gubitke energije. Može se, medjutim primijeniti jednostavniji postupak, koji ipak daje dovoljno tačne rezultate. Taj ćemo postupak ovdje opisati.



Sl. 21.9

Zamislimo, da ukupnu energiju ne prenosimo prema stvarnoj sredjenoj krivulji opterećenja, nego jedanput tako da imamo maksimalne gubitke energije, a drugi put tako da imamo minimalne gubitke energije. Slučaj prijenosa s maksimalnim gubicima prikazan je na srednjoj slici, a prijenos se vrši tako da se kroz vrijeme "t_p" prenosi maksimalna snaga "P_{max}" (tome odgovaraju gubici snage "G_{max}"), dok je preostalo vrijeme "t_o" vod neopterećen (tome stanju odgovaraju gubici snage "G_o"). Slučaj s minimalnim gubicima prikazan je na desnoj slici, a prijenos se vrši podjednakom srednjom snagom "P_{sr}" kroz čitavu godinu (tome odgovaraju gubici snage "G_{sr}"). Gubitke snage "G_{max}", "G_o" i "G_{sr}" možemo izračunati na bilo koji poznati način, a onda je lako odrediti i gubitke energije za svaki od ta dva slučaja, kao što je napisano ispod obih slika. Za godišnje gubitke prijenosa uzme se tada srednja vrijednost gubitaka za spomenuta dva slučaja, a formula je napisana lijevo dolje na slici i zaokružena.

22. EKONOMSKI PROBLEMI

EKONOMSKO DIMENZIONIRANJE PRIJENOSA

Godišnji troškovi prijenosa:

1) Troškovi investicije = određeni postotak investiranih sredstava

2) Troškovi uzdržavanja:

za popravke = određeni postotak investiranih sredstava

plaće osoblju = neovisno o parametrima prijenosa

3) Troškovi gubitaka:

u vodovima, u transformatorima } = gubici x cijena gubitaka

Ekonomski kriterij:

ukupni godišnji troškovi = minimum

Sl. 22.1

EKONOMSKO DIMENZIONIRANJE PRIJENOSA

Ekonomsko dimenzioniranje prijenosa se obično svodi na izbor napona i na izbor presjeka vodiča, makar se može raditi i o većim detaljima (općenito izvedbe voda u pogledu stupova, izolatora, materijala i izvedbe vodiča, te nadalje izbora transformatora, aparature u rasklopnim postrojenjima i slično). Na slici 22.1 je navedeno, koji godišnji troškovi uglavnom dolaze u obzir kod nekog prijenosnog sistema.

Za izgradnju prijenosnog sistema treba uložiti određjena sredstva kao investiciju, što povlači za sobom troškove (koji se ponavljaju svake godine) i to za kamate, amortizaciju itd., pa se godišnji troškovi investicija daju kao neki postotak (obično 1o do 12% godišnje) od iznosa investicija. Troškovi za popravke su relativno maleni, pa i njih radi jednostavnosti računamo kao postotak investicije, a plaće osoblja su praktički neovisne o parametrima prijenosa, pa one kod ovog razmatranja ne moraju uopće biti obuhvaćene. Zbog toga se često troškovi investicija i troškovi uzdržavanja (bez plaća) obuhvaćaju zajedno kao troškovi proporcionalni investicijama.

U pogonu nastaju gubici snage i gubici energije, kako u vodovima tako i u transformatorima, pa te gubitke možemo također izraziti kao troškove kroz godinu dana, ako gubicima pridamo određjenu cijenu.

Kod različito izvedenih prijenosnih sistema dobit ćemo i različite ukupne godišnje troškove, makar sve te izvedbe podjednako zadovoljavaju ostalim zahtjevima. Kao najekonomičniju smatrat ćemo onu izvedbu, kod koje su ukupni godišnji troškovi minimalni. Prema tome minimum godišnjih troškova jest ekonomski kriterij za izbor parametara prijenosa.

Ovom ekonomskom kriteriju nastojimo što bolje udovoljiti, nakon što udovoljimo ostalim postavljenim zahtjevima, i to da predvidjeni prijenosni sistem zadovoljava u fizikalnom pogledu (da omogućuje prijenos energije), u kvalitetnom pogledu (da je prijenos energije onoliko kvalitetan koliko želimo, npr. da napon ostaje unutar postavljenih granica i sl.) i u sigurnosnom pogledu (da su ispunjene odredbe sigurnosnih propisa).

EKONOMSKI IZBOR PARAMETARA POKUŠAVANJEM

Najtačniji, iako dugotrajan postupak, za izbor parametara prijenosa na temelju ekonomskog kriterija, jest pokušavanjem. Postupak se sastoji u tome, da se za nekoliko različitih nazivnih napona i za nekoliko različitih presjeka vodiča projektira prijenosni sistem (samo u glavnim crtama, ne detaljno), pa se za svako od tih rješenja izračunavaju ukupni godišnji troškovi. Rezultati se prikažu tabelarno ili dijagramom, kao na slici 22.2, pa se izabere onaj napon i presjek, koji daju najmanje godišnje troškove.

EKONOMSKI IZBOR PARAMETARA ANALITIČKI

Na slici 22.3 je prikazano kako možemo analitičkim putem naći formule za izračunavanje ekonomskog napona i ekonomskog presjeka. U prvom redu treba postaviti izraz za ukupne godišnje troškove kao funkciju napona i presjeka. Iz uslova za minimum (prva derivacija = nula) dobiju se konačno izrazi za ekonomsko rješenje.

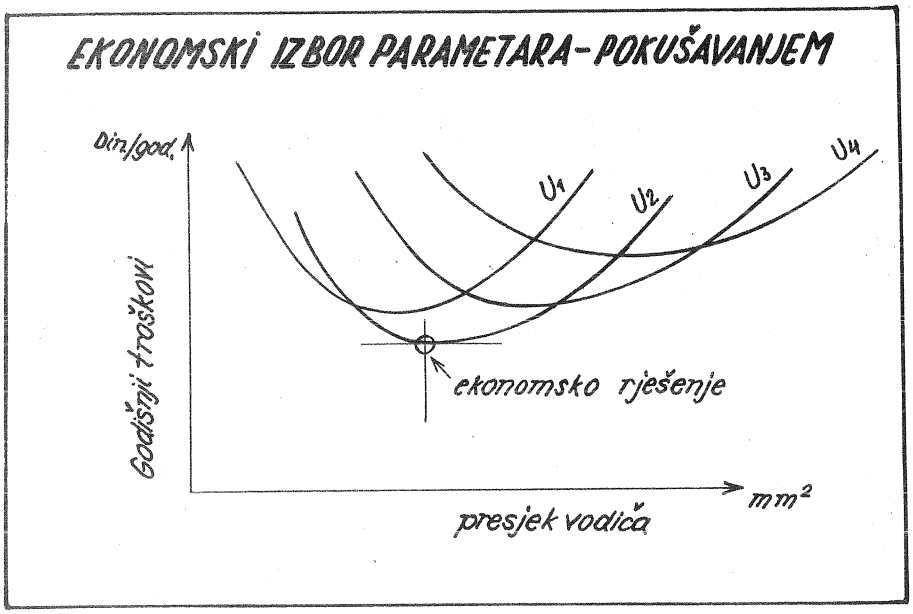
Ovaj postupak ima tu manu, što je matematski teško obuhvatiti sve faktore, koji utječu na godišnje troškove, pa su potrebna mnoga pojednostavljenja i zanemarenja, što dovodi do toga da izvedene formule ne daju dovoljno tačne rezultate i gube vrijednost za drugačije prilike od onih za koje su izvedene.

OPĆENITO O EKONOMICI VODOVA

U pogledu dimenzioniranja presjeka dalekovoda na temelju ekonomskih momenata, iz literature je dobro poznata metoda pomoću tzv. ekonomske gustoće struje, koja se osniva na Kelvinovu pravilu, da troškovi gubitaka moraju biti jednaki troškovima kapitala. Medjutim neopreznа upotreba tako izvedenih formula može dovesti do neispravnih zaključaka, ako se dobiveni rezultati primijene u širem smislu nego što to odgovara pretpostavkama za proračun.

Ovdje će biti razmotreno dimenzioniranje presjeka dalekovoda sa različitih gledišta. Kao kriterij za ekonomski najpovoljnije rješenje bit će uzeto, da cijena prijenosa električne energije bude minimalna.

Gledišta, sa kojih će ekonomski problemi biti razmotreni, prikazana su na slici 22.4. No prije nego pristupimo analizi pojedinih slučajeva moramo postaviti izraz za cijenu prijenosa električne energije.



Sl. 22.2

EKONOMSKI IZBOR PARAMETARA-ANALITIČKI

Godišnji troškovi prijenosa = $T = f(U, A)$

U = nazivni napon prijenosa
A = presjek vodiča

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial U} &= 0\\ \frac{\partial T}{\partial A} &= 0\end{aligned}\right\} \text{ slijedi } U_{ekon},\ A_{ekon}$$

Mane: potrebna pojednostavljenja
rezultati gube vrijednost

Sl. 22.3

Ekonomika vodova

1.) Ekonomski presjek jednog voda
2.) Ekonomski presjek različitog broja vodova
3.) Ekonomski teret jednog voda
4.) Ekonomski broj vodova

Sl. 22.4

CIJENA PRIJENOSA ELEKTRIČNE ENERGIJE

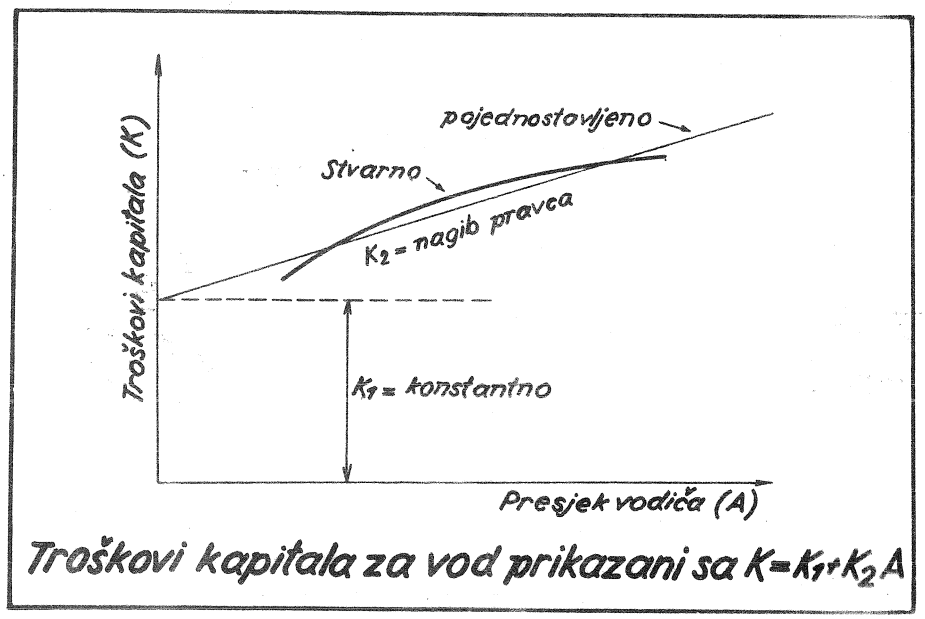
Cijenu prijenosa električne energije možemo dobiti tako, da ukupne troškove kroz promatrani period podijelimo sa brojem prenesenih kilovatsati. Ukupni troškovi sastoje se od troškova kapitala i troškova gubitaka.

Budući da ćemo promatrati problem dimenzioniranja dalekovoda, to je dovoljno da u troškove kapitala obuhvatimo samo troškove kapitala za sam dalekovod. Na slici 22.5 prikazani su troškovi kapitala za vod u ovisnosti o presjeku vodiča. Krivulja na dijagramu predstavlja stvarnu ovisnost u intervalu interesantnom za praksu. Ta se ovisnost medjutim može dovoljno tačno aproksimirati

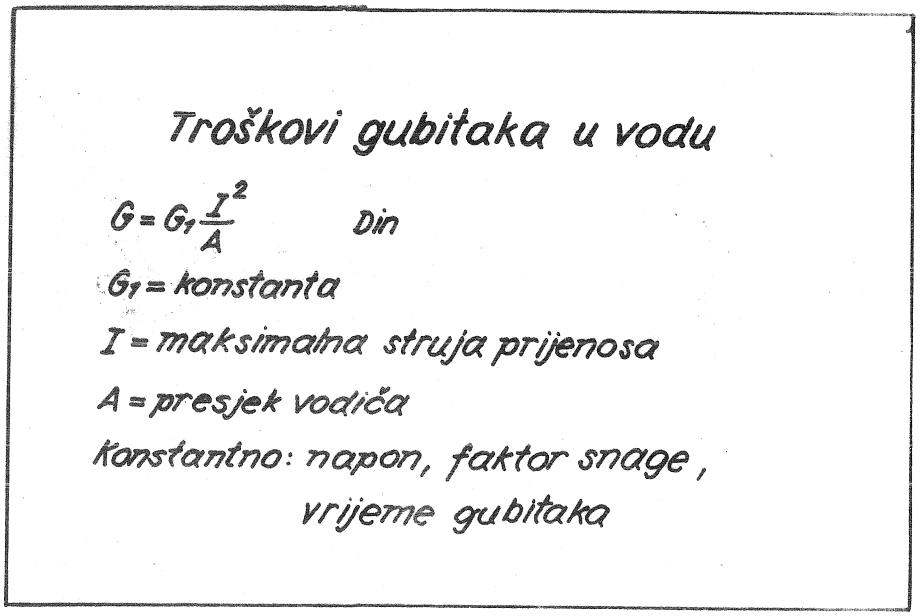
pravcem, čime se dobije pojednostavnjenje ovisnosti troškova kapitala o presjeku. Na taj način možemo troškove kapitala prikazati jednostavnim linearnim izrazom, koji ima jedan konstantni član i jedan član linearno ovisan o presjeku vodiča. Pri tome je pretpostavljeno, da je godišnja stopa za troškove kapitala konstantna, pa ista slika u drugom mjerilu prikazuje i cijenu voda u ovisnosti o presjeku vodiča.

Troškove gubitaka u vodu možemo takodjer prikazati jednostavnim izrazom kao na slici 22.6. Ako zanemarimo utjecaj kapaciteta i odvoda dalekovoda, i ako pretpostavimo da su napon, faktor snage i vrijeme gubitaka konstantni, onda su troškovi gubitaka u vodu direktno proporcionalni presjeku vodiča.

Cijenu prijenosa za jedan preneseni kilovatsat dobit ćemo, ako ukupne troškove podijelimo s brojem prenesenih kilovatsati. Uz iste pretpostavke kao



Sl. 22.5



Sl. 22.6

prije te uz pretpostavku, da je vrijeme maksimalne snage takodjer konstantno, dobiva se za cijenu prijenosa izraz (1) na slici 22.7. Izraz za cijenu prijenosa sastoji se od tri člana. Prva dva člana odgovaraju troškovima kapitala za vod, a treći član odgovara troškovima gubitaka, izraz (2). Ako prva dva člana spojimo zajedno, onda izraz možemo prikazati tako da se sastoji od dva člana, od kojih prvi odgovara troškovima kapitala, a drugi troškovima gubitaka, izraz (3).

Cijena prijenosa za 1 kWh

$$C = \frac{C_1}{I} + C_2\frac{A}{I} + C_3\frac{I}{A} \quad \text{Din} \qquad \ldots(1)$$

C_1, C_2, C_3 . . . konstante

Konstantno: vrijeme maksimalne snage

$$C = k_1 + k_2 + g \text{ , uz: } k_1 = \frac{C_1}{I} \text{ , } k_2 = C_2\frac{A}{I} \text{ , } g = C_3\frac{I}{A} \qquad \ldots(2)$$

$$C = k + g \text{ , uz } k = k_1 + k_2 \qquad \ldots(3)$$

Sl. 22.7

EKONOMSKI PRESJEK JEDNOG VODA

Uzmimo, da su za neki prijenos električne energije zadani osnovni podaci, tj. one veličine, koje smo u prijašnjim razmatranjima uzeli da su konstantne. Za takav slučaj možemo tražiti ekonomski najpovoljniji presjek, tj. onaj presjek kod kojega će cijena prijenosa biti minimalna, slika 22.8. Za zadane energetske podatke možemo uzeti, da je maksimalna struja prijenosa zadana konstanta, izraz (1), pa ćemo ekonomski presjek dobiti uz uslov da cijena prijenosa bude minimalna tj. da derivacija izraza za cijenu po presjeku bude jednaka nuli, izraz (2).

Iz toga uslova dobijemo izraz za ekonomski presjek, izraz (3) a isto tako i izraz za ekonomsku gustoću struje koja je mjerodavna za izbor presjeka jednog voda, izraz (4). Nadalje slijedi ekonomski kriterij za izbor presjeka i taj glasi: onaj dio cijene, koji odgovara troškovima kapitala ovisnima o presjeku, mora biti jednak onom dijelu cijene, koji odgovara troškovima gubitaka, izraz (5). Ili drugim riječima: dio troškova kapitala ovisan o presjeku mora biti jednak troškovima gubitaka.

Kao što se vidi, ovaj kriterij traži, da troškovi gubitaka budu jednaki samo jednom dijelu troškova kapitala, i to onom dijelu ovisnom o presjeku, a ne da troškovi gubitaka budu jednaki ukupnim troškovima kapitala. Jedino za slučaj, da je prvi član u izrazu cijene prijenosa jednak nuli, tj. da je konstantni dio troškova kapitala jednak nuli, dobit ćemo kao ekonomski kriterij, da troškovi gubitaka moraju biti jednaki troškovima kapitala, izraz (6). Ali takav slučaj u praksi izgradnje dalekovoda ne dolazi u obzir.

PRIMJER ZA EKONOMSKI PRESJEK

Uzmimo za ilustraciju primjer, koji je prikazan na slici 22.9. Zadane su tri konstante iz izraza za cijenu prijenosa, i to izračunate prema stvarnim pojedinačnim vrijednostima za jedan primjer iz prakse. Odatle možemo izračunati ekonomsku gustoću struje mjerodavnu za izbor presjeka. Ako još zadamo maksimalnu snagu prijenosa, te napon i faktor snage, možemo dobiti jakost struje, i konačno veličinu ekonomskog presjeka.

Ekonomski presjek jednog voda

$I = konst.$ ...(1)

$$\frac{dC}{dA} = \frac{C_2}{I} - C_3 \frac{I}{A^2} = 0 \quad ...(2)$$

$$A_{ek} = I\sqrt{\frac{C_3}{C_2}} = \text{ekonomski presjek} \quad ...(3)$$

$$\gamma_A = \sqrt{\frac{C_2}{C_3}} = \text{ekonomska gustoća za izbor presjeka jednog voda} \quad ...(4)$$

Ekonomski kriterij: $C_2 \frac{A}{I} = \frac{I}{A} C_3$, to jest $k_2 = g$ ...(5)

uz $C_1 = 0 \rightarrow k = g$ ...(6)

Sl. 22.8

Primjer

$$C_1 = 48{,}5 \frac{Din}{kWh} A$$

$$C_2 = 0{,}282 \frac{Din}{kWh} \cdot \frac{A}{mm^2}$$

$$C_3 = 0{,}0839 \frac{Din}{kWh} \cdot \frac{mm^2}{A}$$

$$\gamma_A = \sqrt{\frac{0{,}282}{0{,}0839}} = 1{,}83 \ A/mm^2$$

$P = 30 MW$, $U = 110 kV$, $\cos\varphi = 0{,}9$

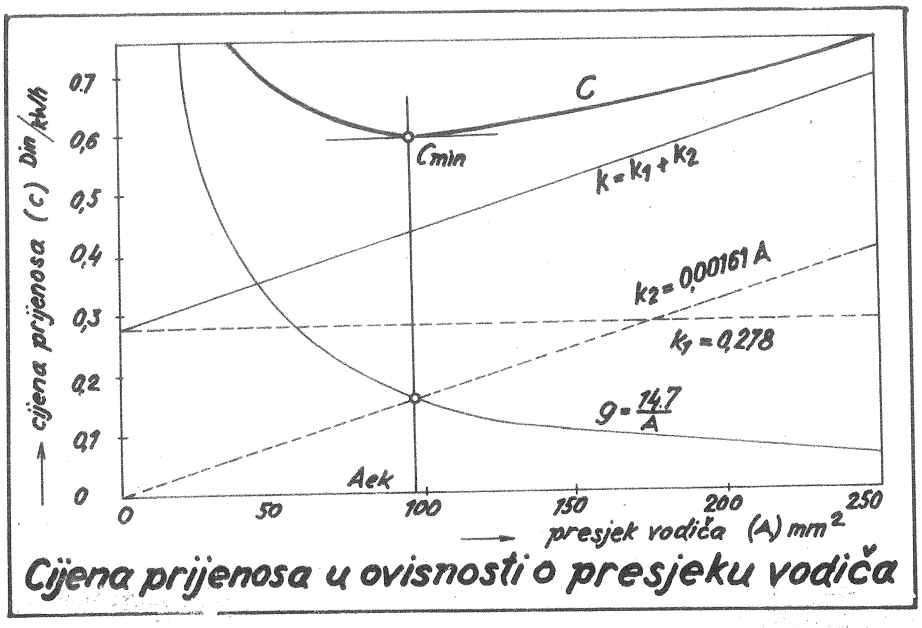
$$I = \frac{30 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3 \cdot 0{,}9} = 175 A$$

$$A_{ek} = I \cdot \gamma_A = 175 \cdot 1{,}83 = 95{,}7 mm^2$$

Sl. 22.9

Radi veće preglednosti prikazani su ovi odnosi na slici 22.1o. Na toj slici prikazana je cijena prijenosa u ovisnosti o presjeku vodiča. Posebno su prikazana sva tri člana iz izraza za cijenu prijenosa. Nadalje je prikazana suma prvih dvaju članova, tj. onaj dio cijene, koji ovisi o troškovima kapitala. I konačno, prikazana je suma svih triju članova, tj. cijena prijenosa.

Ekonomski najpovoljnije rješenje dano je najnižom tačkom krivulje za cijenu prijenosa. Iz slike vidimo, koji ekonomski presjek odgovara toj tački. Isto tako vidimo da ekonomsko rješenje možemo dobiti prema prije postavljenom ekonomskom kriteriju tj. prema sjecištu odgovarajućih krivulja "k_2" i "g".



Sl. 22.1o

ODSTUPANJE OD EKONOMSKIH PRESJEKA

Iz slike 22.1o vidimo, da je krivulja za cijenu prijenosa prilično plosnata u području oko minimuma. To znači, da odstupanje od ekonomski najpovoljnijeg rješenja neće znatno povećati cijenu prijenosa.

Tu je odmah nadalje i pitanje, s kolikom uopće tačnošću možemo izračunati cijenu prijenosa. Ne samo da podaci, koje unosimo u račun, ne mogu biti potpuno tačni (ekonomski se proračun vrši za vremenski period od nekoliko decenija unaprijed!), nego se osim toga i u izvodima formula kriju razna zanemarenja. Tako se npr. šutke pretpostavlja, da nam kapital i materijal stoje na raspolaganju u neograničenim količinama, a to u praksi nije ispunjeno.

Iz svega gornjega slijedi, da se ne moramo držati tačno izračunate vrijednosti za ekonomski presjek. I kod znatnog odstupanja ne može se, naime, tvrditi da to rješenje nije ekonomično. A ako već dopuštamo odstupanje, onda je razumljivo, da ćemo radije odabrati manji presjek, a ne veći presjek od izračunatoga, jer ako već ne možemo biti sigurni, koji nam presjek daje najmanju cijenu prijenosa, to smo kod manjeg presjeka barem sigurni, da smo smanjili investicije kapitala.

EKONOMSKI PRESJEK RAZLIČITOG BROJA VODOVA

Dosada smo promatrali slučaj, da tražimo ekonomski presjek, ako imamo samo jedan vod. Ista razmatranja, dakako, vrijede, ako smo unaprijed odredili broj vodova, i ukupnu snagu prijenosa razdijelili sa brojem vodova. Medjutim, ako broj vodova nije unaprijed odredjen, onda se ne smijemo služiti dosadašnjim rezultatima, nego to moramo posebno razmotriti.

Cijenu prijenosa za "n" vodova možemo prikazati kao na slici 22.11, gdje je u izrazu (1) za cijenu dan ukupni presjek za svih "n" vodova. Vidimo da je prvi član u ovom izrazu "n" puta veći nego u prijašnjem izrazu za cijenu, dok su ostali članovi nepromijenjeni. Ako je broj vodova unaprijed odredjen, onda je "n" konstantno, pa se kao uslov za ekonomski presjek dobiva isti kriterij kao prije.

Prilike, kad broj vodova nije unaprijed odredjen, možemo najbolje prikazati na dijagramu. U tu svrhu odabran je brojčani primjer sa podacima na istoj slici, gdje je kao struja uzeta tri puta veća vrijednost nego u prijašnjim primjerima. Dobiveni izraz za cijenu prijenosa poslužit će nam za crtanje dijagrama, kao što je to učinjeno na slici 22.12.

Na slici 22.12 nacrtana je cijena prijenosa za slučaj s jednim vodom, za

Cijena prijenosa za „n" vodova

$$C = nk_1 + k_2 + g = n\frac{C_1}{I} + C_2\frac{A}{I} + C_3\frac{I}{A} \qquad \ldots (1)$$

A = ukupni presjek za „n" vodova

$\frac{A}{n}$ = presjek za jedan vod

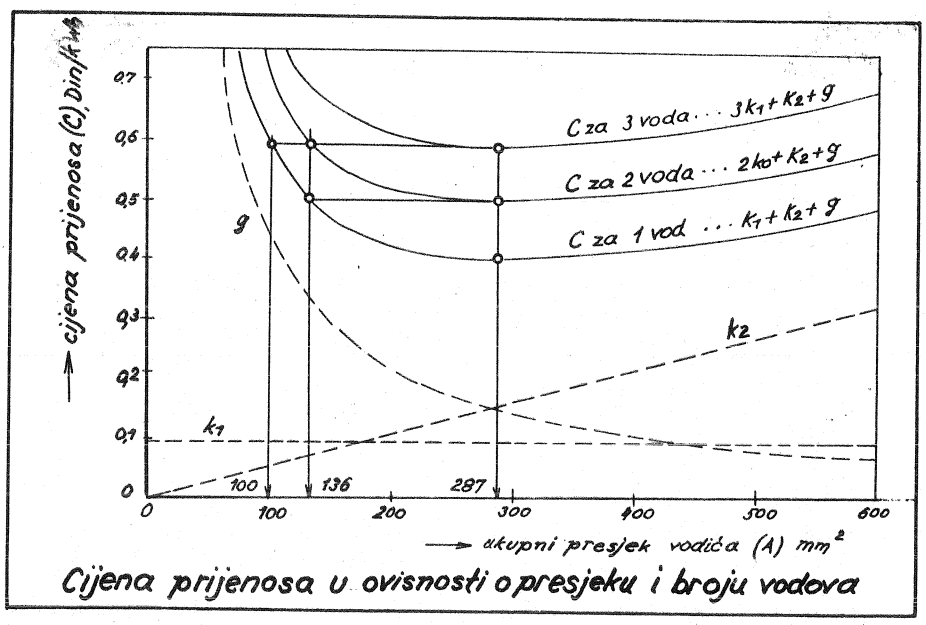
Primjer:

$$I = 3 \cdot 175 = 525\,A$$

$$C = n\frac{48.5}{525} + 0{,}282\,\frac{A}{525} + 0{,}0839\,\frac{525}{A}$$

$$C = n \cdot 0{,}093 + 0{,}000537 \cdot A + \frac{44{,}1}{A}$$

Sl. 22.11



Cijena prijenosa u ovisnosti o presjeku i broju vodova

Sl. 22.12

slučaj s dva voda i za slučaj s tri voda. Vidi se, da se cijene prijenosa za ova tri slučaja medjusobno razlikuju za konstantni iznos "k_1". Ako je unaprijed zadan broj vodova, onda se ekonomsko rješenje dobiva za presjek koji odgovara najnižoj tački dotične krivulje, a to je isti presjek za sva tri slučaja, i on prema dijagramu iznosi 287 mm². To je ekonomski ukupni presjek svih vodova, bez obzira jesmo li unaprijed odabrali rješenje s jednim, s dva ili s tri voda.

Iz iste slike vidimo, da ovaj ukupni presjek ne daje najmanje cijene prijenosa, ako unaprijed nije odredjen broj vodova. Za veoma široko područje različitih vrijednosti presjeka je cijena prijenosa u slučaju jednog voda još uvijek manja od najniže cijene prijenosa za slučaj tri voda. Analogno je za

široko područje presjeka cijena prijenosa za slučaj s dva voda niža od najniže cijene prijenosa za slučaj s tri voda.

Iz slike vidimo da možemo odabrati kao rješenje samo jedan vod sa mnogo manjim presjekom od 287 mm^2, i to sve do najniže vrijednosti od 135 mm^2, a da još uvijek cijena prijenosa ne bude veća nego za slučaj s dva voda. Isto tako za slučaj s jednim vodom možemo presjek smanjiti sve do nekih 1oo mm^2, a da cijena prijenosa bude još uvijek manja od najniže cijene za slučaj s tri voda. Razlog tome očito leži u činjenici, što u izrazu za cijenu prijenosa imamo i konstantni član, koji je proporcionalan broju vodova.

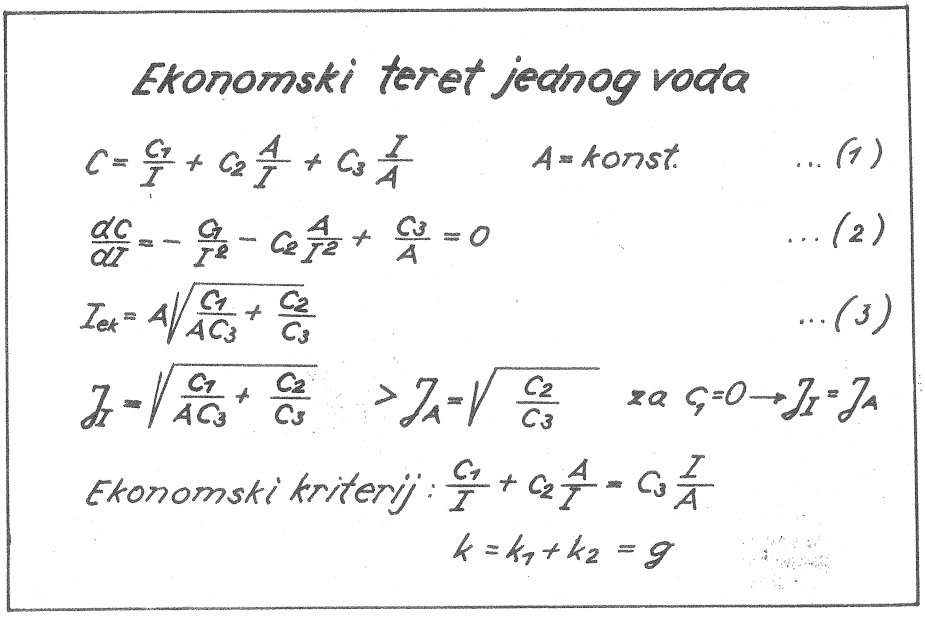
Kao što iz gornjih razmatranja vidimo, ekonomski će razlozi zahtijevati rješenje s malim brojem vodova, pa makar zbog malog ukupnog presjeka dobili veoma velike gustoće struje i velike gubitke energije. Pri tome se može čak i dogoditi, da kao ekonomsko rješenje dobijemo takve gustoće struje, koje su zbog termičkog zagrijavanja vodiča nedopustive. U takvom slučaju, dakako, iz tehničkih razloga neće biti moguće primijeniti najekonomičnije rješenje.

EKONOMSKI TERET JEDNOG VODA

Dosada smo razmatrali prilike, kad je bila zadana struja, koja se prenosi vodom, pa se tražilo ekonomsko rješenje za presjek vodiča. Međutim, kad već imamo neki vod sagradjen i u pogonu, postavlja se pitanje, koliko iznosi njegov ekonomski teret. Na prvi pogled može se učiniti, da je najekonomičnije opteretiti vod toliko, da se sačuva gustoća struje, koja odgovara proračunu ekonomskog presjeka. Međutim to nije tako, kao što ćemo vidjeti iz daljnjeg razmatranja.

Ako tražimo ekonomski teret dalekovoda, onda ćemo tražiti onu struju u dalekovodu, kod koje je cijena prijenosa minimalna. To je načinjeno na slici 22.13. Polazimo opet od istih izraza za cijenu prijenosa, ali uzimamo da je presjek konstantan, izraz (1). Ako deriviramo cijenu po struji i to postavimo jednako nuli, dobit ćemo uslov za ekonomski teret, izraz (2). Tako dobivamo izraz za ekonomsku struju u vodu, izraz (3), i nadalje izraz za ekonomsku gustoću struje. Vidimo, da je gustoća struje za ovako postavljeni zadatak veća od gustoće struje kad se traži ekonomski presjek. Te dvije gustoće struje bile bi jednake jedino onda, kad bi konstantni član u troškovima kapitala bio jednak nuli. Kao ekonomski kriterij ovdje dobivamo, da ukupni troškovi kapitala moraju biti jednaki troškovima gubitaka.

Ovo ćemo ilustrirati na primjeru, koji je prikazan na slici 22.14. Kao presjek uzet ćemo onaj isti, koji smo u prijašnjim primjerima dobili kao ekonomski presjek. Kao ekonomsku gustoću struje sada dobivamo znatno veću vrijednost, a isto tako veću vrijednost dobivamo za ekonomski teret, tj. struju od 294 A i snagu od 5o,3 MW.



Sl. 22.13

Primjer

$A = A_{ek} = 95{,}7\ mm^2$

$$J_I = \sqrt{\frac{48{,}5}{95{,}7 \cdot 0{,}0839} + \frac{0{,}282}{0{,}0839}} = 3{,}07\ A/mm^2$$

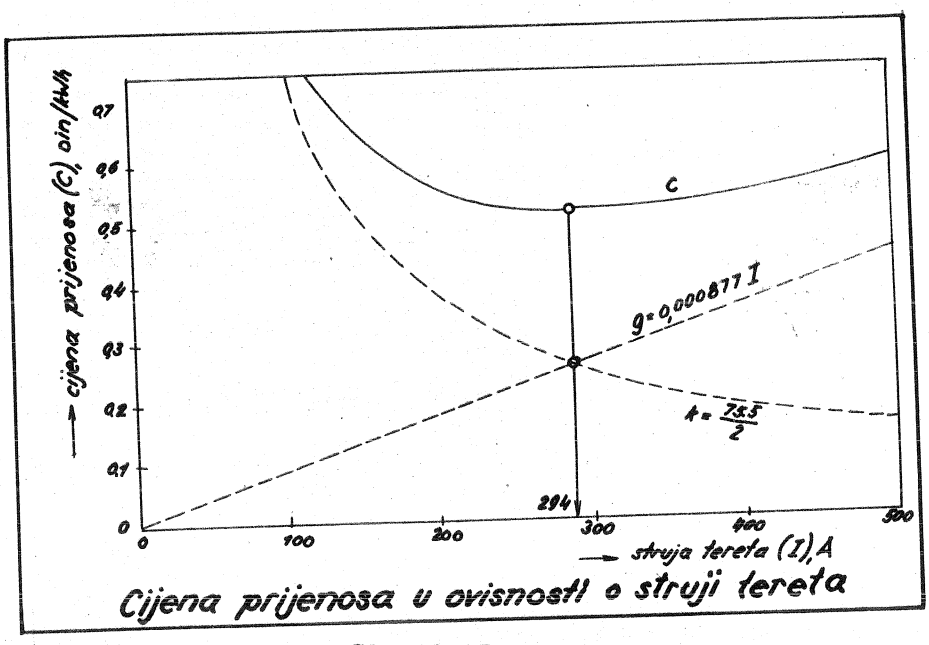
$I_{ek} = 95{,}7 \cdot 3{,}07 = 294\ A$

$P_{ek} = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3 \cdot 294 \cdot 0{,}9 \cdot 10^{-6} = 50{,}3\ kW$

$$C = \frac{48{,}5}{I} + 0{,}282 \cdot \frac{95{,}7}{I} + 0{,}0839\ \frac{I}{95{,}7}$$

$$C = \frac{75{,}5}{I} + 0{,}000877\ I$$

Sl. 22.14



Cijena prijenosa u ovisnosti o struji tereta

Sl. 22.15

Ovaj ćemo primjer ilustrirati dijagramom. U slici 22.14 je postavljen izraz za cijenu prijenosa u ovisnosti o struji, a uz prijašnje brojčane podatke. Prema tom izrazu nacrtan je dijagram na slici 22.15. Tu je nacrtana cijena prijenosa u ovisnosti o struji tereta, i to kao suma dviju krivulja, jedne koja prikazuje dio cijene ovisne o troškovima kapitala i druge koja prikazuje dio cijene ovisne o gubicima. Najniža tačka krivulje za cijenu daje ekonomski teret, tj. 294 A.

U prvi čas začudjuje da smo uz zadanu struju od 175 A dobili ekonomski presjek od 95,7 mm^2, a uz zadani presjek od 95,7 mm^2 da smo dobili ekonomsko opterećenje strujom od 294 A. Da jasnije uočimo razloge za to, nacrtat ćemo krivulje za cijenu prijenosa kod različitih presjeka. Na slici 22.16 postavljena

su još dva izraza za cijenu prijenosa, i to za presjek dva puta manji od ekonomskoga i za presjek dva puta veći od ekonomskoga. Prema tim podacima nacrtani su dijagrami na slici 22.17, i to na isti način kao na slici 22.15. Ako na slici 22.17 podjemo od struje 175 A, vidimo da će cijena prijenosa biti najmanja za slučaj, da je presjek jednak prije izračunatom ekonomskom presjeku. Ali to nije najniža tačka na toj krivulji. Najnižoj tački na toj krivulji naprotiv odgovara struja od 294 A.

Primjer

a) $A = 0{,}5\,A_{ek}$

$$C_{0,5} = \frac{48{,}5}{I} + \frac{73{,}5}{I} + 0{,}001754\,I$$

$$C_{0,5} = \frac{620}{I} + 0{,}001754\,I$$

b) $A = 2{,}0\,A_{ek}$

$$C_{2,0} = \frac{48{,}5}{I} + \frac{54{,}0}{I} + 0{,}0004385\,I$$

$$C_{2,0} = \frac{102{,}5}{I} + 0{,}0004385\,I$$

Sl. 22.16

EKOONOMSKI BROJ VODOVA

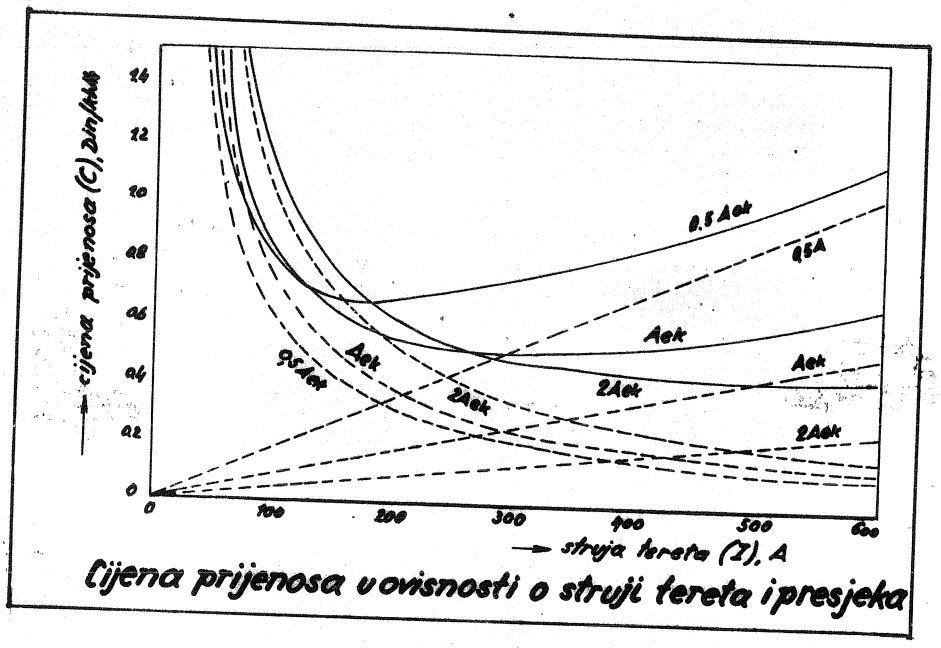
Daljnje pitanje, koje nas u ekonomici dalekovoda u pogonu može interesirati, jest, do koje mjere je ekonomično vršiti prijenos pomoću jednog već izgradjenog dalekovoda, i kada treba sagraditi drugi dalekovod. Drugim riječima, do koje vrijednosti treba da poraste teret u vodu, pa da prijenos pomoću dva dalekovoda bude ekonomičniji od prijenosa putem jednog dalekovoda.

Razmotrit ćemo najprije pitanje, koliko iznosi ekonomski broj vodova, ako je presjek jednog voda unaprijed zadan. To je načinjeno na slici 22.18 gdje je postavljen izraz za cijenu prijenosa kod "n" vodova, izraz (1). Ako je presjek jednog voda unaprijed zadan, a isto tako je zadana snaga prijenosa odnosno struja u vodu, onda ćemo minimum cijene prijenosa dobiti iz uslova, da je derivacija cijene po broju vodova jednaka nuli. Tako je dobiven izraz za ekonomski broj vodova, a isto tako i ekonomski kriterij, koji glasi: dio cijene, koji je ovisan o kapitalu, za sve vodove zajedno mora biti jednak dijelu cijene, koji je ovisan o gubicima u svim vodovima zajedno.

Ovo je opet ilustrirano jednim primjerom, koji je prikazan na slici 22.19. Kao presjek uzet je prije dobiveni ekonomski presjek, a kao struja uzeta je dvostruka vrijednost struje, koja odgovara ekonomskom teretu. Kao rezultat dobili smo, da ekonomski broj vodova iznosi dva, što smo donekle mogli i unaprijed očekivati.

Ovo ćemo opet ilustrirati dijagramom. Na slici 22.2o postavljen je izraz za cijenu prijenosa u ovisnosti o broju vodova, izraz (1). Uz brojčane podatke iz prijašnjih primjera postavljeni su konačni izrazi za cijenu prijenosa u ovisnosti o struji u vodu i to za jedan vod, za dva voda i za tri voda. Prema tim podacima nacrtani su dijagrami na slici 22.21, i to analogno kao što smo i prije postupali.

Iz slike 22.21 se vidi da struji od 588 A odgovara ekonomski broj vodova, koji iznosi dva. Medjutim, iz slike takodjer vidimo, da su dva voda najekonomičnije rješenje i za druge vrijednosti struje, sve dok se vrijednost struje nalazi unutar područja od 416 do 73o A. Očito je, da je od interesa is-



Cijena prijenosa u ovisnosti o struji tereta i presjeka

Sl. 22.17

Ekonomski broj vodova

n = broj vodova

$$C_n = n\left(\frac{C_1}{I} + C_2\frac{A}{I}\right) + \frac{C_2}{n}\cdot\frac{I}{A} \qquad \ldots(1)$$

A = konst. I = konst.

$$\frac{dC_n}{dn} = \frac{C_1}{I} + C_2\frac{A}{I} - \frac{C_3}{n^2}\frac{I}{A} = 0$$

$$n_{ek} = \sqrt{\frac{C_3\frac{I}{A}}{\frac{C_1}{I} + C_3\frac{A}{I}}} = \sqrt{\frac{g}{k_1 + k_2}} = \sqrt{\frac{g}{k}}$$

Ekonomski kriterij: $n \cdot k = \frac{g}{n}$

Sl. 22.18

tražiti općenito onu vrijednost struje, kod koje je npr. cijena prijenosa s jednim vodom jednaka cijeni prijenosa s dva voda. Ta će vrijednost struje biti kriterij, da li ćemo kao ekonomski broj vodova uzeti jedan ili dva voda.

Primjer

$A = A_{el} = 95{,}7\,mm^2 \quad I = 2I_{el} = 2 \cdot 294 = 588\,A$

$k_1 = \frac{C_1}{I} = \frac{48{,}5}{588} = 0{,}0825$

$k_2 = C_1 \frac{A}{I} = 0{,}282 \frac{95{,}7}{588} = 0{,}0460$

$g = C_3 \frac{I}{A} = 0{,}0839 \frac{588}{95{,}7} = 0{,}516$

$$n_{el} = \sqrt{\frac{0{,}516}{0{,}0825 + 0{,}0460}} = 2$$

Sl. 22.19

Broj vodova i struja tereta

$$C_n = n\left(\frac{C_1}{I} + C_2 \frac{A}{I}\right) + \frac{C_3}{n} \cdot \frac{I}{A}$$

$$C_n = n \frac{C_1 + C_2 + A}{I} + \frac{1}{n} \cdot \frac{C_3 I}{A} \qquad \ldots (1)$$

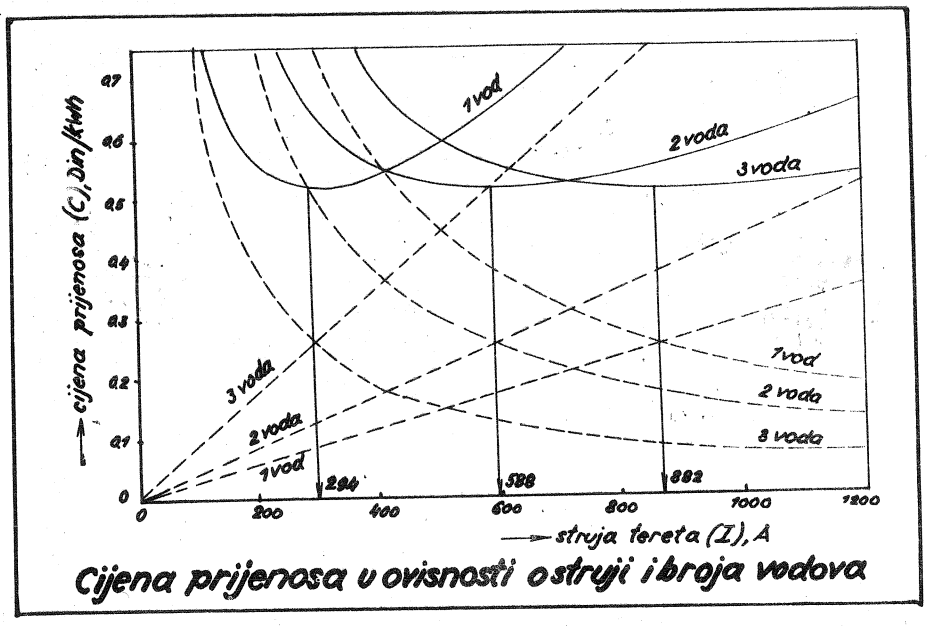
$$C_n = n \frac{75{,}5}{I} + \frac{1}{n} 0{,}000877\, I$$

$C' = \frac{75{,}5}{I} + 0{,}000877\, I$ .... za 1 vod

$C'' = \frac{151{,}0}{I} + 0{,}0004385\, I$ ..... za 2 voda

$C''' = \frac{226{,}5}{I} + 0{,}0002923\, I$ .... za 3 voda

Sl. 22.20



Cijena prijenosa u ovisnosti o struji i broja vodova

Sl. 22.21

Ekonomski broj vodova

$$C_n = n \cdot k + \frac{g}{n} \qquad \ldots (1)$$

$$C_{(n+1)} = (n+1)k + \frac{g}{n+1} \qquad \ldots (2)$$

$$C_n = C_{(n+1)}$$

$$n \cdot k + \frac{g}{n} = (n+1)k + \frac{g}{n+1} \qquad \ldots (3)$$

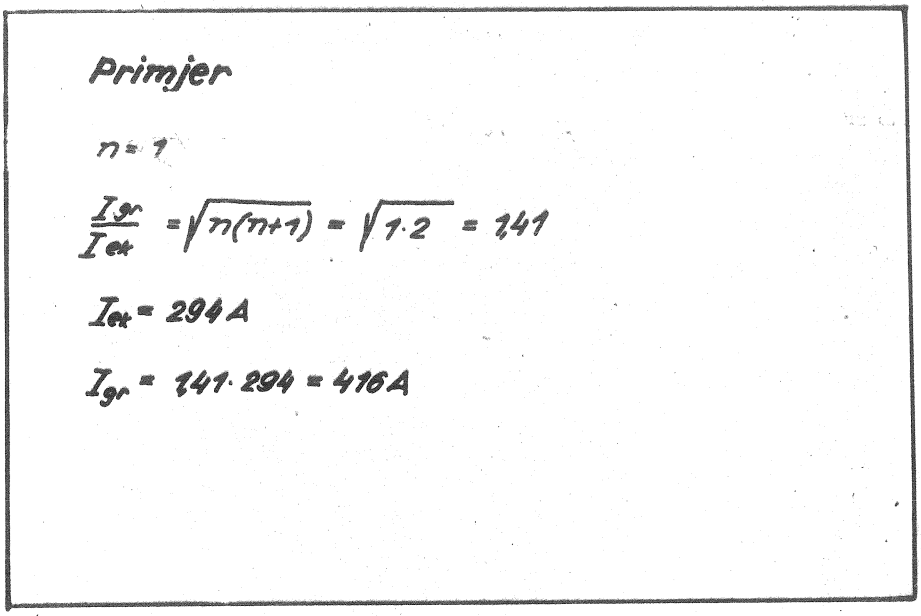
$\frac{g}{k} = n(n+1)$, a uz $\frac{g}{k} = \left(\frac{I_{gr}}{I_{ek}}\right)^2$ slijedi

$$\frac{I_{gr}}{I_{ek}} = \sqrt{n(n+1)} \qquad \ldots (4)$$

Sl. 22.22

To je načinjeno na slici 22.22. U prvom redu dan je izraz za cijenu prijenosa kod "n" vodova, izraz (1), a u drugom redu dan je izraz za cijenu prijenosa kod jednog voda više, izraz (2). Uslov za rješenje dobijemo, ako te dvije cijene izjednačimo, izraz (3). Konačno imamo još jedan izraz, koji treba da uzmemo u račun. Naime kod struje, koja odgovara ekonomskom teretu voda, dio cijene uslijed troškova kapitala jednak je dijelu cijene uslijed troškova gubitaka. Zbog toga će odnos cijela cijene uslijed troškova gubitaka prema dijelu cijene uslijed troškova kapitala biti proporcionalan kvadratu odnosa struja. Na taj način dobijemo konačni izraz koji nam daje odnos granične struje prema struji ekonomskog tereta u ovisnosti o broju vodova, izraz (4). Granična struja je ona, kod koje je cijena prijenosa jednaka za manji i za veći broj vodova.

To je opet ilustrirano primjerom koji je prikazan na slici 22.23. Traži se granična struja za jedan odnosno dva voda. Kao rezultat dobivamo struju od 416 A. To znači da u pogonu možemo raditi s jednim vodom, sve dok struka u vodu ne prekorači vrijednost od 416 A, a tek ako struja prekorači tu vrijednost, bit će ekonomičnije izgraditi još jedan vod. Medjutim, i opet se može dogoditi, a to je slučaj i u našem primjeru, da termička granica bude niža od ovako dobivene ekonomske granice, pa da iz tehničkih razloga ne možemo vod opteretiti onoliko koliko bi to iz ekonomskih razloga bilo povoljno.



Sl. 22.23

Glava V

Z A Š T I T A O D K R A T K O G S P O J A

23. PRILIKE KOD KRATKIH SPOJEVA

KRATKI SPOJEVI

Kratki spoj u mreži nastaje, kad električno naprezanje izolacije prekorači njezinu električnu čvrstoću. Uzrok, dakle, može biti ili povećanje napona, koji djeluje na izolaciju (obično tzv. prenaponi, npr. udarac munje u vodič) ili smanjenje izolacije (npr. dodir vodiča uslijed njihanja) ili kombinirano (npr. smanjenje izolacionog nivoa uslijed orošenja izolatora za vodu i istodobno prenapon uslijed nekog sklapanja u mreži).

Kratki spojevi predstavljaju najneugodnije smetnje u mrežama s teškim i štetnim posljedicama, pa se treba s time upoznati da bismo se znali prikladno zaštititi.

Uzrok kratkog spoja može biti:

1) prolazne naravi: unutarnji i vanjski prenaponi, orošenje izolacije (uslijed električnog luka izolator se osuši), dodir od njihanja vodiča, premoštenje nekim stranim tijelom (ptica, grana) koje uslijed kratkog spoja izgori,

2) trajne naravi: onečišćenje izolatora, lom izolatora i pad vodiča na konzolu ili na drugi vodič, premoštenje nekim stranim tijelom koje ne izgori.

Kod prolaznog uzroka kratkog spoja stvori se na mjestu kvara električni luk, koji i dalje održava kratki spoj, makar je prvotni uzrok i prestao. Tek kad vod iskopčamo nestane luka pa i kratkog spoja, i kod ponovnog ukapčanja neće biti smetnja. Kod trajnog uzroka kratkog spoja općenito neće biti električnog luka, a ako nakon iskapčanja ponovno ukopčamo, imat ćemo još uvijek kratki spoj.

Kratki spoj može imati i svoj otpor (obično je to otpor električnog luka), ali može biti i bez otpora (direktni kratki spoj).

VRSTE KRATKIH SPOJEVA

Na slici 23.1 su prikazane karakteristične vrste kratkih spojeva s obzirom na to, koliki broj faznih vodiča dolazi u kratki spoj, te nadalje dolazi li i do spoja sa zemljom. Pri tome je važno i to, kako je uzemljeno zvjezdište mreže. Na slici su razlikovana samo dva glavna slučaja:

a) uzemljeno zvjezdište ili tačnije rečeno efikasno uzemljeno zvjezdište, kod kojeg slučaja ni kod kojeg kvara napon neke faze ne prekorači vrijednost od 80% linijskog napona, jer je impedancija uzemljenja razmjerno malena,

b) neuzemljeno zvjezdište ili tačnije rečeno neefikasno uzemljeno zvjezdište, gdje u slučaju kvara napon faznog vodiča može prekoračiti 80% od linijskog napona, jer je impedancija uzemljenja razmjerno velika.

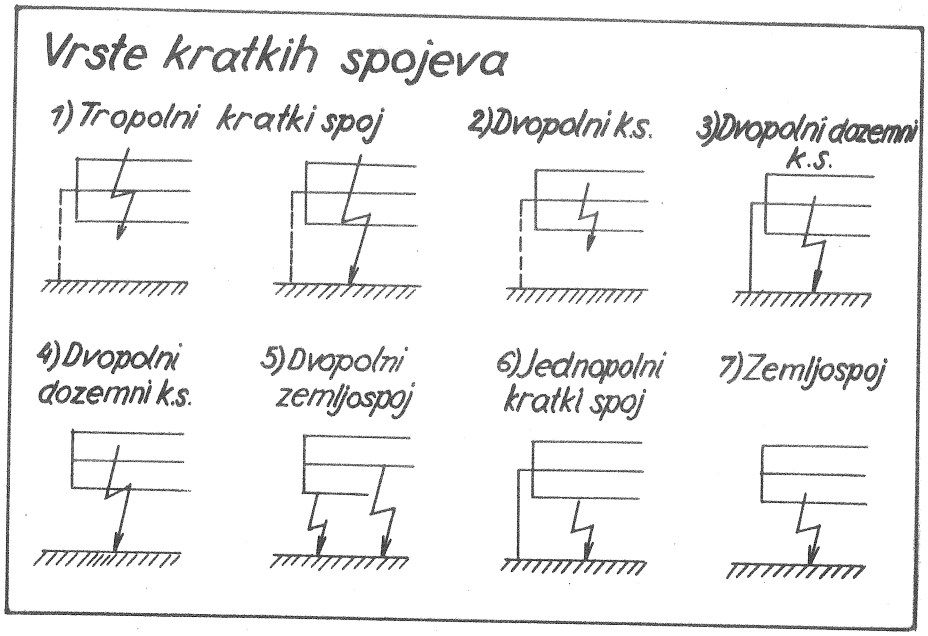
1) Najprije je prikazan trofazni kratki spoj bez spoja sa zemljom ili sa spojem sa zemljom i to za slučaj uzemljenog kao i neuzemljenog zvjezdišta. Za sva ova četiri oblika trofaznog kratkog spoja električne prilike su jednake.

2) Zatim je prikazan dvopolni kratki spoj i to opet bilo kod uzemljenog bilo kod neuzemljenog zvjezdišta, a električne prilike su jednake za oba slučaja.

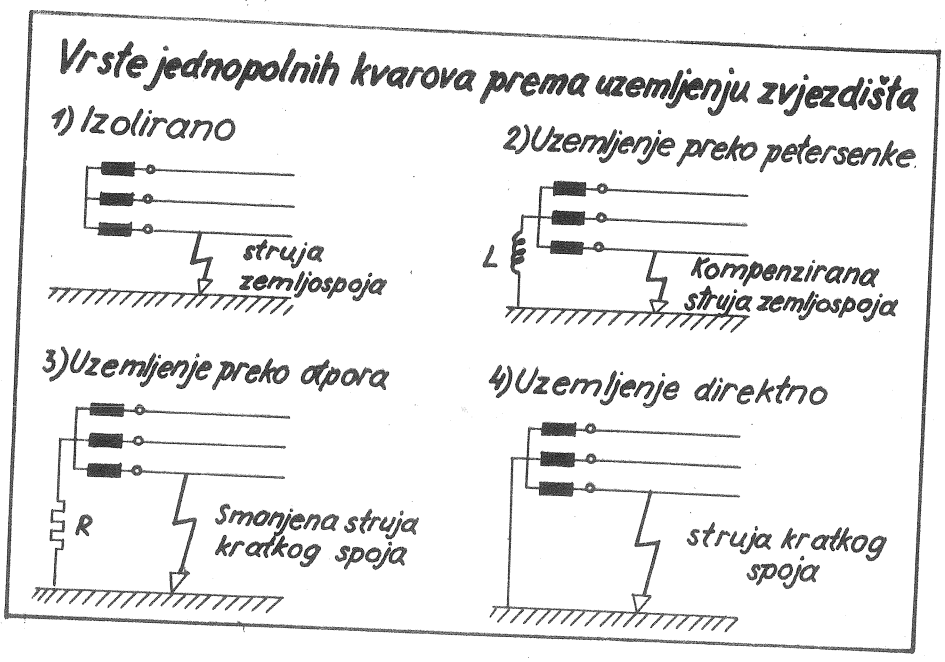
3) Iza toga su prikazani dvopolni dozemni kratki spojevi, gdje dolazi do medjusobnog spoja dviju faza i zemlje, i to posebno za slučaj s uzemljenim,

4) posebno za slučaj s neuzemljenim zvjezdištem, jer električne prilike u ova dva slučaja nisu jednake.

5) Nadalje je prikazan još jedan slučaj dvopolnog kvara, tzv. dvopolni zemljospoj, gdje dvije faze dolaze u spoj sa zemljom, ali na raznim mjestima, dok do spoja izmedju faza ne dolazi. Ovakav slučaj je interesantan samo kod mreža s neuzemljenim zvjezdištem.



Sl. 23.1



Sl. 23.2

6) Konačno su prikazana dva slučaja spoja izmedju jedne faze i zemlje. Ako to nastupi kod uzemljene mreže, kvar nazivamo jednopolnim kratkim spojem,

7) ako nastupi kod neuzemljene mreže, takav kvar nazivamo zemljospojem.

VRSTE JEDNOPOLNIH KVAROVA

Na slici 23.2 su prikazana 4 karakteristična jednopolna kvara, koje možemo razlikovati već prema načinu, kako je zvjezdište mreže uzemljeno.

1) Ako je zvjezdište izolirano, ne postoji izmedju vodiča i zemlje galvanska veza nego jedino kapacitivna (preko dozemnih kapaciteta), pa će na mjestu

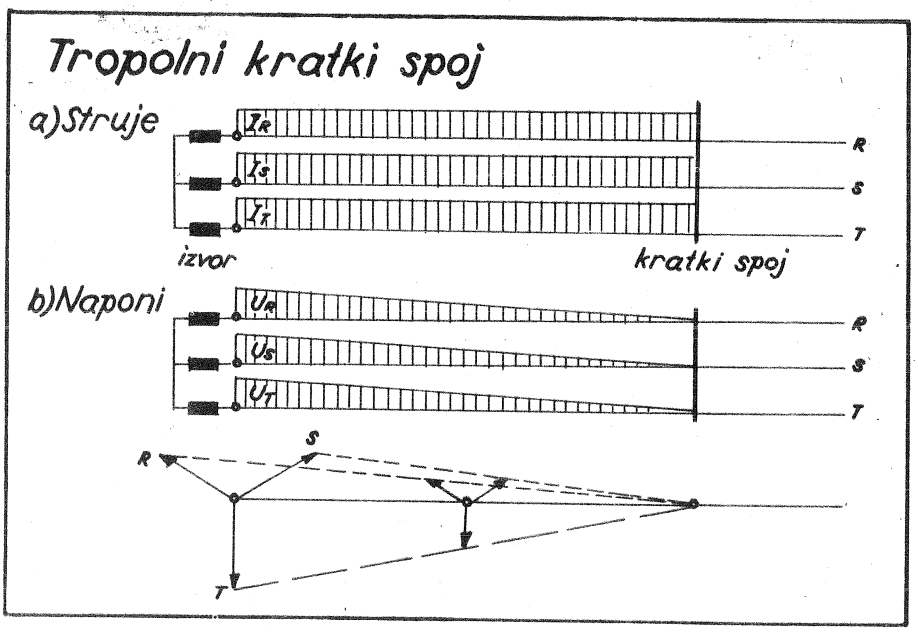
kvara teći kapacitivna struja, koju nazivamo strujom zemljospoja, a takav kvar nazivamo zemljospojem.

2) Da se kompenzira kapacitivna struja zemljospoja, može se zvjezdište uzemljiti preko prigušnice, koja je udešena da bude u rezonanciji s dozemnim kapacitetom. Na mjestu kvara teče sada kompenzirana struja zemljospoja, i to je uglavnom djelatna struja (zbog gubitaka u mreži).

3) U svrhu da se smanje prenaponi u mreži, može se zvjezdište uzemljiti ili preko djelatnog otpora ili 4) direktno. U oba slučaja imamo kratki spoj preko zemlje, a struju kvara nazivamo strujom kratkog spoja i ona je uglavnom induktivna. U slučaju da je uzemljenje provedeno preko otpora, struja kratkog spoja je u izvjesnoj mjeri smanjena.

TROPOLNI KRATKI SPOJ

Električne prilike kod tropolnog kratkog spoja prikazane su na slici 23.3.



Sl. 23.3

a) Na gornjem crtežu prikazane su struje u vodičima: struje su jednake u sva tri vodiča, i teku kroz sve elemente mreže u nepromijenjenom iznosu od izvora sve do mjesta kvara.

b) Na donjem crtežu dane su naponske prilike. Naponi u sve tri faze padaju postepeno od pune vrijednosti kod izvora do nule kod mjesta kratkog spoja. Ipak fazni naponi ostaju simetrični u svakoj tački voda, jer se sva tri fazna napona podjednako smanjuju.

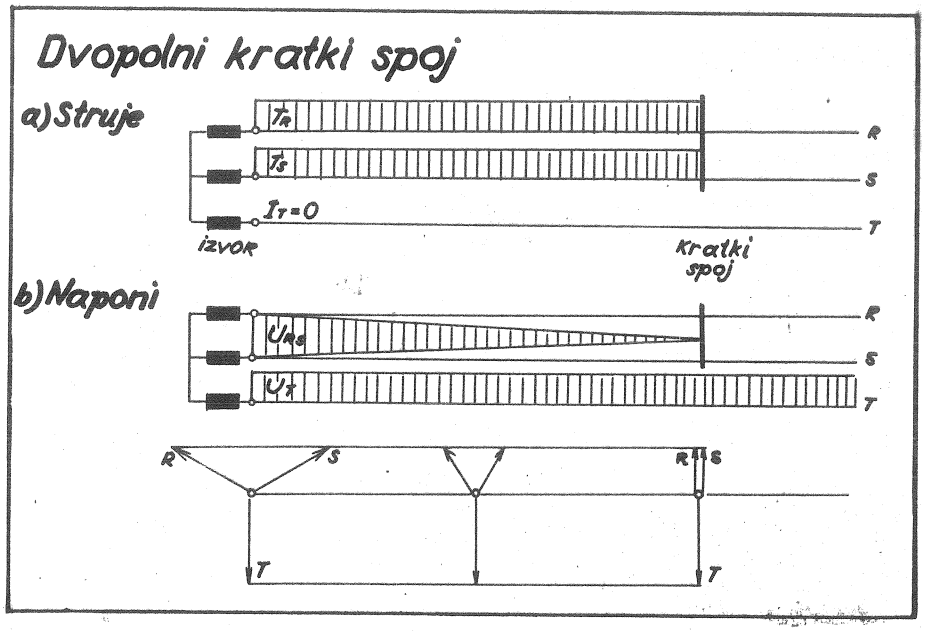
Električne prilike su, kao što vidimo, jednake u sve tri faze, pa zato tropolni kratki spoj nazivamo simetričnim kratkim spojem za razliku od ostalih koji su nesimetrični.

DVOPOLNI KRATKI SPOJ

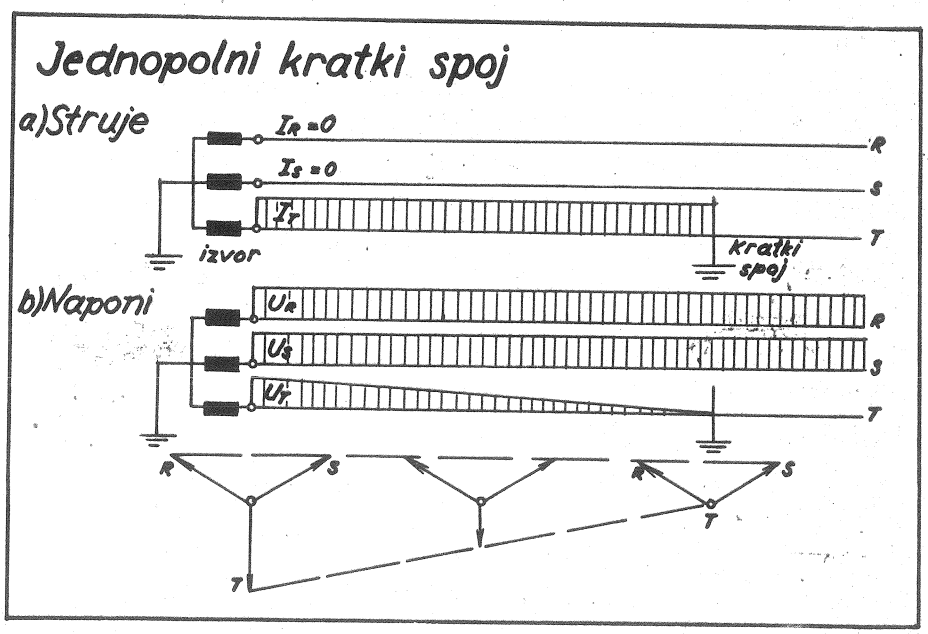
Električne prilike kod dvopolnog kratkog spoja bez spoja sa zemljom prikazane su na slici 23.4.

a) Struje teku samo u bolesnim fazama, i to u istom iznosu od izvora do kratkog spoja (u stvari jedna te ista struja teče u fazi "R" od izvora do kratkog spoja i onda kroz fazu "S" natrag do izvora). Struja u zdravoj fazi jednaka je nuli.

b) Fazni napon u zdravoj fazi je konstantan od izvora do kraja voda, a linijski napon izmedju bolesnih faza postepeno pada od pune vrijednosti kod izvora do nule kod kratkog spoja. Kako se linijski napon smanjuje duž voda i kako se mijenjaju fazni naponi bolesnih faza, pokazano je na donjoj skici.



Sl. 23.4



Sl. 23.5

JEDNOPOLNI KRATKI SPOJ

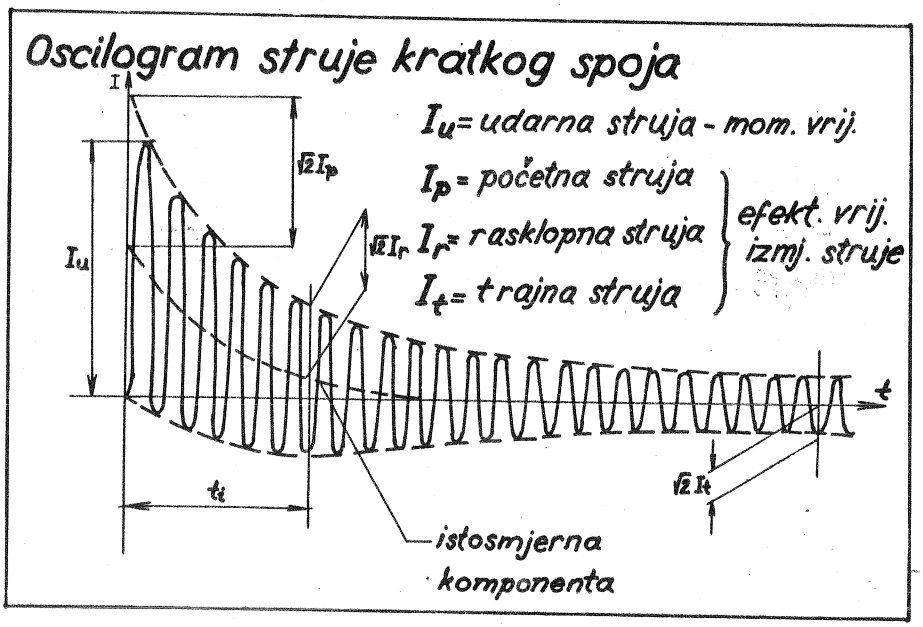
Električne prilike kod jednopolnog kratkog spoja (zvjezdište je uzemljeno) prikazane su na slici 23.5.

a) Struja teče samo u bolesnoj fazi i onda se kroz zemlju vraća natrag.

b) Fazni naponi zdravih faza su konstantni duž čitavog voda, dok fazni napon bolesne faze postepeno pada od pune vrijednosti kod izvora do nule kod mjesta kratkog spoja.

OSCILOGRAM STRUJE KRATKOG SPOJA

Na slici 23.6 je prikazan oscilogram struje kratkog spoja s kotiranim karakterističnim veličinama. Struja kratkog spoja osim izmjenične komponente ima redovito i istosmjernu komponentu.



Sl. 23.6

Najveću momentalnu vrijednost, koju struja uopće postigne "I_u", a koja se sastoji od istosmjerne i izmjenične komponente, nazivamo udarna struja i ona je mjerodavna za dinamička naprezanja. Najveću efektivnu vrijednost izmjenične komponente "I_p" nazivamo početna struja i ona je mjerodavna za naprezanje sklopke kod ukapčanja na kratki spoj. Efektivnu vrijednost struje "I_r" u momentu iskapčanja "t_i" nazivamo rasklopnom strujom i ona je mjerodavna za naprezanje sklopke kod iskapčanja kratkog spoja. Efektivnu vrijednost, na kojoj se struja ustali "I_t" nazivamo trajna struja kratkog spoja, i ona je mjerodavna za termička naprezanja, ako kratki spoj duže traje.

ŠTETNE POSLJEDICE KRATKOG SPOJA

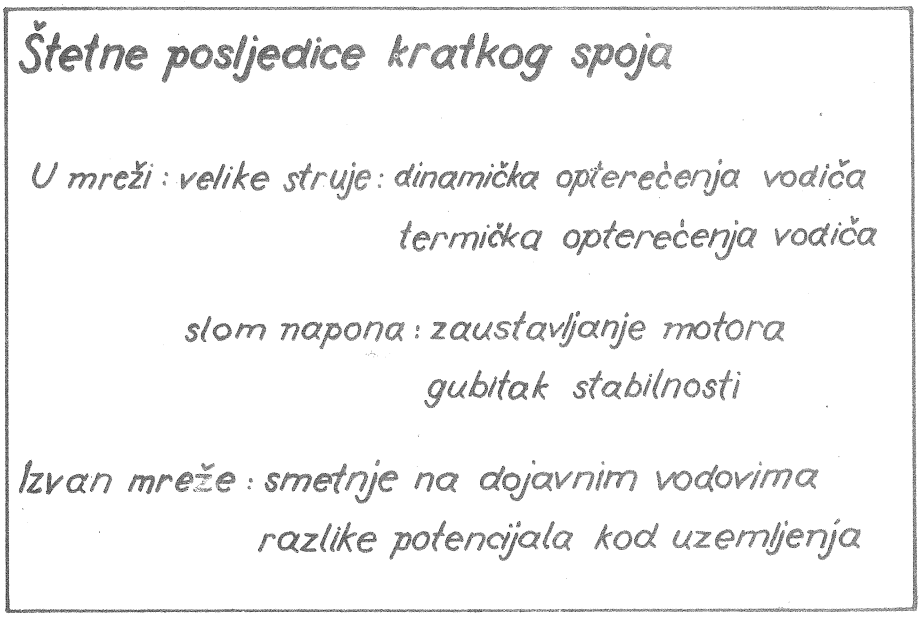
Štetne posljedice uslijed raznih vrsta kratkih spojeva prikazane su na slici 23.7, a nastaju u samoj mreži uslijed velikih struja kratkog spoja, i uslijed sloma napona, ali isto tako i izvan mreže.

Dinamička opterećenja vodiča nastaju uslijed velike momentalne vrijednosti struje i za njih je mjerodavna udarna struja. Ova opterećenja mogli bismo izbjeći jedino tako, kad bismo kratki spoj iskopčali u vrlo kratko vrijeme, prije nego struja postigne iole veću vrijednost. To se medjutim može postići samo pomoću osigurača, ali se oni ne upotrebljavaju u mrežama za prijenos električne energije. Sklopke ne mogu iskopčati tako brzo, pa do dinamičkih opterećenja u postrojenjima za prijenos električne energije uvijek dolazi.

Termička opterećenja vodiča odgovaraju uglavnom efektivnoj vrijednosti trajne struje i vremenu, koliko traje kratki spoj. Zbog toga treba kratki spoj iskopčati prije nego dodje do termičkih razaranja.

Zaustavljanje motora (ili općenito nepravilni rad trošila) nastaje prvenstveno u blizini kratkog spoja, gdje je slom napona najizrazitiji. Nakon povratka napona (kad je kratki spoj iskopčan) može doći zbog toga do udarca u mreži itd. I ova štetna posljedica zahtijeva razmjerno brzo iskapčanje kratkog spoja.

Stabilnost takodjer može biti ugrožena zbog kratkog spoja, i to tim više, što je više smanjena sinhronizaciona sila i što kratki spoj duže traje. U mrežama najvišeg napona se zbog toga zahtijeva vrlo brzo isključivanje kratkog spoja.



Sl. 23.7

Smetnje na dojavnim vodovima nastaju indukcijom kod nesimetričnih spojeva i kod zemljospojeva, pa o tome treba voditi računa. Naponi inducirani u dojavnim vodovima mogu biti opasni ne samo za uredjeje nego i za ljude, pa se i ovdje opasnost smanjuje što bržim isklapanjem kratkog spoja.

Kod kvarova gdje dolazi do spoja sa zemljom, teče u zemlji struja kvara, pa na tom mjestu može doći do znatnih razlika potencijala, koje su to opasnije što duže traju.

24. PRORAČUN KRATKOG SPOJA

PRORAČUN KRATKOG SPOJA

Općeniti postupak za proračun kratkog spoja prikazan je na slici 24.1. Ako zadanu mrežu promatramo samo kroz čvorišta s elektromotornim silama, čvorište gdje je kratki spoj, i nul-tačku (sve nultačke u sistemu možemo smatrati medjusobno spojenima), dobijemo situaciju kao na skici 1), gdje je primjera radi uzeta mreža s tri elektromotorne sile. Tačka K označuje mjesto kratkog spoja.

Na takvu mrežu primijenimo Théveninov teorem, pa dobijemo situaciju kao na skici 2. Sve elektromotorne sile su premoštene, a na mjestu kvara imamo narinuti napon "U", koji je jednak naponu, što je tu vladao prije kratkog spoja.

Ovu mrežu možemo dalje reducirati na samu jednu impedanciju "Z", pa dobivamo situaciju prikazanu skicom 3. Impedancija "Z" jest impedancija mreže promatrane izmedju tačaka "K" i "O", tj. izmedju mjesta kratkog spoja i nultačke. Izmjeničnu komponentu struje kratkog spoja je lako izračunati.

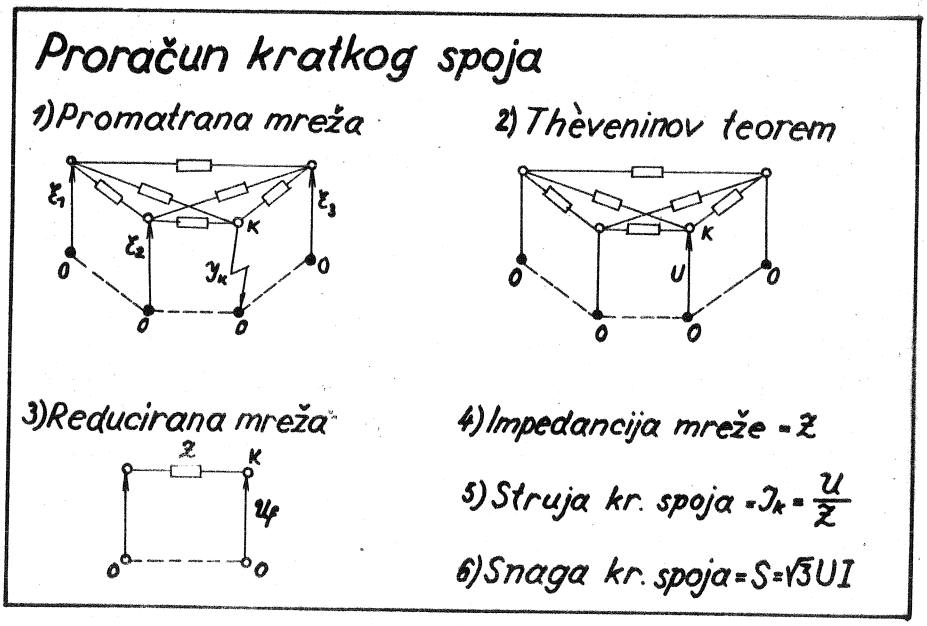
Ako se radi o trofaznoj mreži i tropolnom (simetričnom) kratkom spoju, onda se izvedeni postupak može direktno primijeniti, s time da je proračun izvršen za jednu fazu. Opravdanje medjusobnog spajanja svih nul-tačaka leži u tome, što u simetričnim prilikama sve nul-tačke imaju isti potencijal. Ovdje je narinuti napon "U" jednak faznom naponu na mjestu kratkog spoja prije kvara. Konačno se često daje i snaga kratkog spoja prema formuli navedenoj pod 6).

POSTAVLJANJE MREŽE ZA PRORAČUN KRATKOG SPOJA

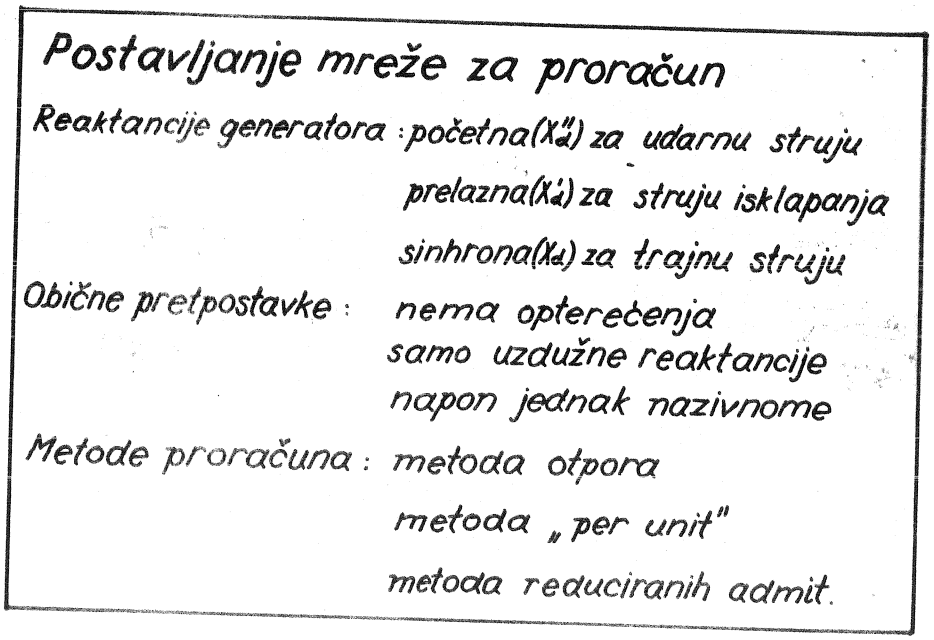
Na slici 24.2 su dane još neke upute u vezi postavljanja mreže za proračun kratkog spoja.

Već prema tome, koju struju kratkog spoja računamo, treba kod generatora u mrežu uvrstiti odgovarajuću reaktanciju. Kod proračuna rasklopne struje obično računamo s prelaznom reaktancijom. što odgovara vrlo kratkom vremenu isklapanja.

Proračun kratkog spoja se često pojednostavnjuje, pa su na slici navedene najobičnije pretpostavke. Poprečne grane se redovito zanemaruju osim kod zemljospoja, gdje one igraju bitnu ulogu. Djelatni otpor se redovito zanemaruje osim kod kabelskih mreža, gdje je prema induktivnom otporu relativno velik.



Sl. 24.1

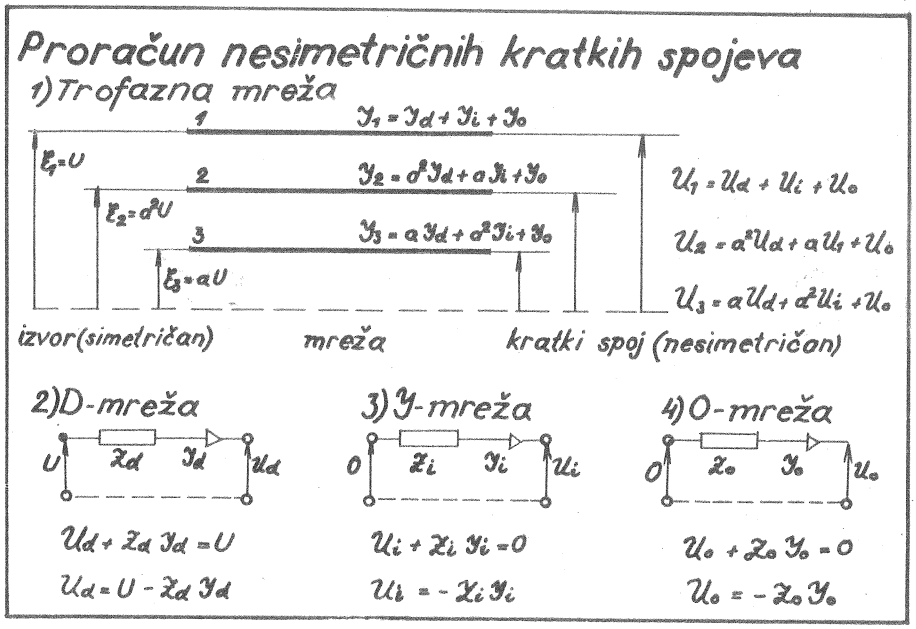


Sl. 24.2

Za postavljanje mreže može se upotrijebiti bilo koja od već opisanih metoda proračuna. Metoda reduciranih admitancija ima tu prednost, što parametar svakog elementa mreže ima brojčanu vrijednost snage kratkog spoja tog elementa, pa to povećava preglednost proračuna, a kao rezultat redukcije mreže se dobiva direktno brojčana vrijednost tražene snage kratkog spoja.

PRORAČUN NESIMETRIČNIH KRATKIH SPOJEVA

Osnova za proračun nesimetričnih kratkih spojeva dana je na slici 24.3.



Sl. 24.3

1) Prvo je prikazana pojednostavnjena trofazna mreža s izvorom na jednoj i kratkim spojem na drugoj strani. Izvor ima simetrične elektromotorne sile jednake nazivnom naponu "U". Fazni naponi na mjestu kratkog spoja, dakako, nisu simetrični, pa su prikazani pomoću simetričnih komponenata. Isti je slučaj sa strujama u pojedinim fazama.

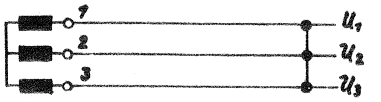
Za izračunavanje simetričnih komponenata struje i napona na mjestu kratkog spoja moramo dakle dobiti rezultantne impedancije za čitavu mrežu, i to direktnu, inverznu i nultu. Moramo dakle postaviti mrežu s direktnim impedancijama (tzv. direktna mreža, skraćeno D-mreža), pa je svesti na jednu jedinu impedanciju "Z_d" izmedju elektromotorne sile izvora i kratkog spoja. To je direktna impedancija mreže. Isto tako postavimo inverznu i nultu mrežu, pa njihovom redukcijom dobijemo inverznu impedanciju mreže "Z_i" i nultu impedanciju mreže "Z_o". Tako reducirane tri mreže (D-, I- i O-mreža) prikazane su također na slici zajedno sa simetričnim komponentama elektromotorne sile izvora (gdje su zbog simetrije inverzna i nulta komponenta jednake nuli), te simetričnim komponentama struje i napona na mjestu kratkog spoja. Iz toga direktno slijede izrazi, koji će nam poslužiti za izračunavanje struja i napona kod pojedinih vrsta kratkog spoja.

TROPOLNI (SIMETRIČNI) KRATKI SPOJ

Radi potpunosti izvest ćemo pomoću simetričnih komponenata najprije proračun tropolnog kratkog spoja, makar se tu radi o simetričnim prilikama. Proračun je prikazan na slici 24.4, gdje je dana odgovarajuća shema i tropolni spoj definiran izrazom (1), tj. da su svi fazni naponi na mjestu kratkog spoja jednaki nuli. Odatle slijedi, da su i sve simetrične komponente napona na mjestu kratkog spoja jednake nuli, izrazi (2).

Iz D-mreže (ako uvrstimo $U_d = 0$) slijedi izraz (3) za direktnu komponentu struje "I_d", a iz I-mreže i O-mreže slijedi, da su ostale komponente struje jednake nuli, izrazi (4) i (5). Prema tome konačno slijedi, da je struja kvara "I_{III}" jednaka direktnoj komponenti struje, odnosno kvocijentu faznog na-

Tropolni (simetrični) kratki spoj



izvor mreža kratki spoj

Postavljamo: $U_1 = U_2 = U_3 = 0$ (1)

Slijedi: $U_d = \frac{1}{3}(U_1 + aU_2 + a^2U_3) = 0$

$U_i = \frac{1}{3}(U_1 + a^2U_2 + aU_3) = 0$ } (2)

$U_o = \frac{1}{3}(U_1 + U_2 + U_3) = 0$

D-mreža: $U_d + Z_d J_d = U \rightarrow 0 + Z_d J_d = U \rightarrow J_d = \frac{U}{Z_d}$ (3)

I-mreža: $U_i + Z_i J_i = 0 \rightarrow 0 + Z_i J_i = 0 \rightarrow J_i = 0$ (4)

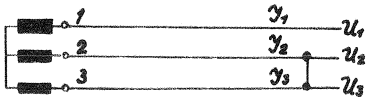
O-mreža: $U_o + Z_o J_o = 0 \rightarrow 0 + Z_o J_o = 0 \rightarrow J_o = 0$ (5)

Konačno: $J_{III} = J_1 = J_d + J_i + J_o = J_d + 0 + 0 = J_d \rightarrow \boxed{J_{III} = \frac{U}{Z_d}}$ (6)

$J_1 = J_{III}$, $J_2 = a^2 J_{III}$, $J_3 = a J_{III}$ (7)

Sl. 24.4

Struje dvopolnog kratkog spoja



Postavljamo: $J_o = 0$ (1)

$J_1 = 0$ (2)

$U_2 = U_3$ (3)

Iz (2): $J_1 = J_d + J_i + J_o = 0$, uz (1) slijedi $J_i = -J_d$ (4)

Iz (3): $a^2U_d + aU_i + \cancel{U_o} = aU_d + a^2U_i + \cancel{U_o} \rightarrow U_i = U_d$ (5)

Iz (5), te D- i I-mreže: $-Z_i J_i = U - Z_d J_d$

uz (4): $Z_i J_d + Z_d J_d = U \rightarrow J_d = \frac{U}{Z_d + Z_i}$ (6)

Iz (4) i (1): $J_{II} = J_2 = a^2 J_d + a J_i + J_o = (a^2 - a) J_d$

uz: $(a^2 - a)U = a^2U - aU = \underline{a}_2 - \underline{a}_3 = \underline{a}_{23}$ } $J_{II} = \frac{\underline{a}_{23}}{Z_d + Z_i}$ (7)

Struje: $J_1 = 0$, $J_2 = J_{II}$, $J_3 = -J_{II}$ $I_{II} = \frac{\sqrt{3}\,U}{|Z_d + Z_i|}$

Sl. 24.5

pona i direktne impedancije, izraz (5), što je uostalom već otprije poznato. Na kraju su ispisane struje pojedinih faza (7).

STRUJE DVOPOLNOG KRATKOG SPOJA

Na slici 24.5 izvedene su formule za struje dvopolnog kratkog spoja bez spoja sa zemljom, gdje je prvo dana odgovarajuća shema, i kvar definiran izrazima (1) do (3). Izraz (1) slijedi iz uslova, da nema spoja sa zemljom pa niti puta za zatvaranje nulte struje. Dalje je izveden izraz (4) za inverznu struju, koja je jednaka direktnoj s protivnim predznakom, te izraz (5) za inverzni napon, koji je jednak direktnom. Odatle uz pomoć izraza za direktnu i inverznu mrežu (što je prikazano prije) dobije se izraz (6) za direktnu komponentu struje, koja je jednaka faznom naponu podijeljenom sa sumom direktne i

inverzne impedancije. Ako kao struju kvara uzmemo struju u fazi 2 dobijemo izraz (7), koji kaže da je struja kvara jednaka linijskom naponu izmedju bolesnih faza podijeljenom sa sumom direktne i inverzne impedancije. Struja u fazi "3" ima očigledno isti iznos ali suprotni predznak. Sam iznos struje kvara daje izraz (8), koji kaže da je struja jednaka linijskom naponu kroz suma direktne i inverzne impedancije.

NAPONI DVOPOLNOG KRATKOG SPOJA

Na slici 24.6 dan je izvod napona dvopolnog kratkog spoja.Iz prije provedenog proračuna struja imamo izraze (1) do (3). Dalje slijedi, da je nulta komponenta napona takodjer jednaka nuli (4), a za inverznu odnosno direktnu komponentu napona (koje su jednake) izvedeni su izrazi (5) odnosno (6). Naponi pojedinih faza na mjestu kratkog spoja dani su izrazima (7) do (9), pri čemu je uvaženo da je $(a^2 + a) = -1$. Kao što se vidi, naponi bolesnih faza su medjusobno jednaki, a napon zdrave faze jednak je njihovoj sumi, ali sa suprotnim predznakom.

Naponi dvopolnog kratkog spoja

Iz proračuna struja: $\mathcal{Y}_o = 0$ (1)

$$\mathcal{Y}_i = -\mathcal{Y}_d = -\frac{U}{Z_d + Z_i} \quad (2)$$

$$U_i = U_d \quad (3)$$

Iz 0-mreže i (1): $U_o = -Z_o \mathcal{Y}_o = 0 \rightarrow U_o = 0$ (4)

Iz $\mathcal{Y}$-mreže i (2): $U_i = -Z_i \mathcal{Y}_i = (-Z_i)\frac{-U}{Z_d + Z_i} \rightarrow U_i = U\frac{Z_i}{Z_d + Z_i}$ (5)

Iz (3): $U_d = U_i \rightarrow U_d = U\frac{Z_i}{Z_d + Z_i}$ (6)

Naponi $U_1 = U_d + U_i + U_o = 2U_d \rightarrow U_1 = U\frac{2Z_i}{Z_d + Z_i}$ (7)

$$U_2 = a^2 U_d + a U_i + U_o = (a^2 + a)U_d = -U_d \rightarrow U_2 = -U\frac{Z_i}{Z_d + Z_i} \quad (8)$$

$$U_3 = a U_d + a^2 U_i + U_o = (a + a^2)U_d = -U_d \rightarrow U_3 = -U\frac{Z_i}{Z_d + Z_i} \quad (9)$$

Sl. 24.6

STRUJE JEDNOPOLNOG KRATKOG SPOJA

Proračun struja jednopolnog kratkog spoja prikazan je na slici 24.7, gdje je prvo dana odgovarajuća shema i kvar definiran izrazima (1) do (3). Dalje je izveden izraz (4) za inverznu struju, koja je jednaka direktnoj, i izraz (5), pri čemu je uvaženo da je $(a + a^2) = -1$, za nultu struju, koja je isto jednaka direktnoj. Konačno je izračunata direktna struja, izraz (6), pa se vidi, da je ona jednaka faznom naponu podijeljenom sa sumom direktne, inverzne i nulte impedancije. Konačno je izračunata struja kvara, izraz (7), a to je struja u bolesnoj fazi, koja je jednaka trostrukom faznom naponu podijeljenom sa sumom direktne, inverzne i nulte impedancije.

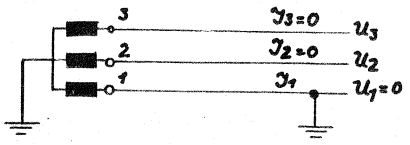
NAPONI JEDNOPOLNOG KRATKOG SPOJA

Na slici 24.8 dan je izvod formula za napone jednopolnog kratkog spoja, pri čemu koristimo prije dobivene rezultate za vrijednost direktne, inverzne i nulte komponente struje (sve te tri komponente su medjusobno jednake).

Najprije je izračunat napon "U_2" iz svojih komponenata, tako da je za svaku komponentu uzet izraz koji smo prije postavili, a slijedi iz D-, I- odnosno 0-mreže. Uvrštavajući uslov, da su sve tri komponente struje jednake, te uvrštavajući iznos za direktnu komponentu struje i konačno sredivši dobivamo izraz (I). Analogno dobivamo izraz (2) za napon "U_3".

To su naponi zdravih faza. Napon bolesne faze dakako je $U_1 = 0$.

Struje jednopolnog kratkog spoja



Postavljamo: $\mathcal{I}_3 = a\mathcal{I}_d + a^2\mathcal{I}_i + \mathcal{I}_o = 0$ (1)

$\mathcal{I}_2 = a^2\mathcal{I}_d + a\mathcal{I}_i + \mathcal{I}_o = 0$ (2)

$U_1 = U - Z_d\mathcal{I}_d - Z_i\mathcal{I}_i - Z_o\mathcal{I}_o = 0$ (3)

Iz (1) = (2) $\quad a\mathcal{I}_d + a^2\mathcal{I}_i + \mathcal{I}_o = a^2\mathcal{I}_d + a\mathcal{I}_i + \mathcal{I}_o$

$(a - a^2)\mathcal{I}_d = (a - a^2)\mathcal{I}_i \rightarrow \mathcal{I}_i = \mathcal{I}_d$ (4)

Iz (1) i (4): $a\mathcal{I}_d + a^2\mathcal{I}_i + \mathcal{I}_o = (a + a^2)\mathcal{I}_d + \mathcal{I}_o = 0 \rightarrow \mathcal{I}_o = \mathcal{I}_d$ (5)

Iz (3), (4) i (5): $U - (Z_d + Z_i + Z_o)\mathcal{I}_d = 0 \rightarrow \mathcal{I}_d = \dfrac{U}{Z_d + Z_i + Z_o}$ (6)

$\mathcal{I}_I = \mathcal{I}_1 = \mathcal{I}_d + \mathcal{I}_i + \mathcal{I}_o = 3\mathcal{I}_d \rightarrow \mathcal{I}_I = \dfrac{3U}{Z_d + Z_i + Z_o}$

Sl. 24.7

Naponi jednopolnog kratkog spoja

a) $U_2 = a^2U_d + aU_i + U_o = a^2(U - Z_d\mathcal{I}_d) - aZ_i\mathcal{I}_i - Z_o\mathcal{I}_o$, uz $\mathcal{I}_d = \mathcal{I}_i = \mathcal{I}_o$:

$U_2 = a^2U - (a^2Z_d + aZ_i + Z_o)\mathcal{I}_d$, uz $\mathcal{I}_d = \dfrac{U}{Z_d + Z_i + Z_o}$ slijedi

$U_2 = \dfrac{U}{Z_d + Z_i + Z_o}(\cancel{a^2Z_d} + a^2Z_i + a^2Z_o - \cancel{a^2Z_d} - aZ_i - Z_o)$

$U_2 = U\dfrac{(a^2 - a)Z_i - (1 - a^2)Z_o}{Z_d + Z_i + Z_o} = \dfrac{\mathcal{E}_{23}Z_i - \mathcal{E}_{12}Z_o}{Z_d + Z_i + Z_o}$ (1)

b) $U_3 = aU_d + a^2U_i + U_o = a(U - Z_d\mathcal{I}_d) - a^2Z_i\mathcal{I}_i - Z_o\mathcal{I}_o$, uz $\mathcal{I}_d = \mathcal{I}_i = \mathcal{I}_o$:

$U_3 = aU - (aZ_d + a^2Z_i + Z_o)\mathcal{I}_d$

$U_3 = \dfrac{U}{Z_d + Z_i + Z_o}(\cancel{aZ_d} + aZ_i + aZ_o - \cancel{aZ_d} - a^2Z_i - Z_o)$

$U_3 = U\dfrac{(a - a^2)Z_i - (1 - a)Z_o}{Z_d + Z_i + Z_o} = \dfrac{\mathcal{E}_{31}Z_o - \mathcal{E}_{23}Z_i}{Z_d + Z_i + Z_o}$ (2)

Sl. 24.8

STRUJE KRATKIH SPOJEVA

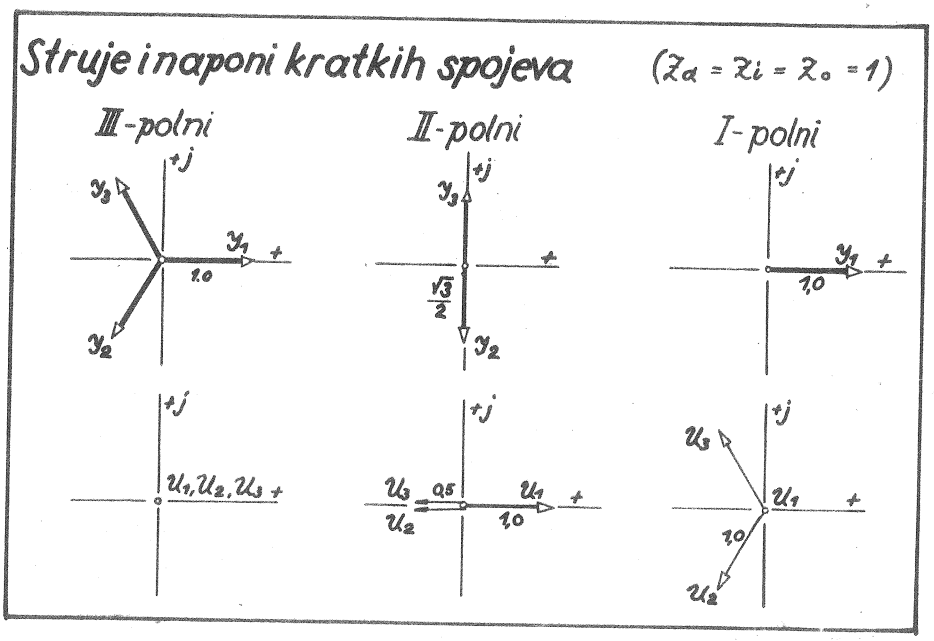
Na slici 24.9 dan je pregled izračunatih struja za različite vrste kratkih spojeva. Što se tiče simetričnih komponenata struja kod tropolnog kratkog spoja imamo samo direktnu komponentu. Kod dvopolnog imamo direktnu i inverznu, i one su medjusobno jednake ali s protivnim predznakom. Kod jednopolnog kratkog spoja imamo sve tri komponente i sve tri su medjusobno jednake.

Što se tiče struja u fazama kod tropolnog kratkog spoja imamo struje u sve tri faze i sve su medjusobno jednake ali okrenute za 120°. Kod dvopolnog kratkog spoja imamo struje samo u dvije (bolesne) faze i one su medjusobno jednake ali s protivnim predznakom. Kod jednopolnog kratkog spoja imamo struju samo u jednoj (bolesnoj) fazi.

Struje kratkih spojeva

	III-polni	II-polni	I-polni
$y_d =$	$\frac{U}{z_d}$	$\frac{U}{z_d + z_i}$	$\frac{U}{z_d + z_i + z_o}$
$y_i =$	0	$-y_d$	y_d
$y_o =$	0	0	y_d
$y_1 =$	$\frac{U}{z_d}$	0	$\frac{3U}{z_d + z_i + z_o}$
$y_2 =$	$a^2 y_1$	$\frac{\dot{\varepsilon}_{23}}{z_d + z_i}$	0
$y_3 =$	$a y_1$	$-y_2$	0
$I_k =$	$\frac{U}{z_d}$	$\frac{\sqrt{3}U}{\lvert z_d + z_i \rvert}$	$\frac{3U}{\lvert z_d + z_i + z_o \rvert}$

Sl. 24.9



Sl. 24.1o

Struja kvara je u sva tri slučaja dana kvocijentom napona i impedancije. Kod tropolnog kratkog spoja je to fazni napon i direktna impedancija, kod dvopolnog je to linijski napon i suma direktne i inverzne impedancije, a kod jednopolnog kratkog spoja je to trostruki fazni napon i suma direktne, inverzne i nulte impedancije.

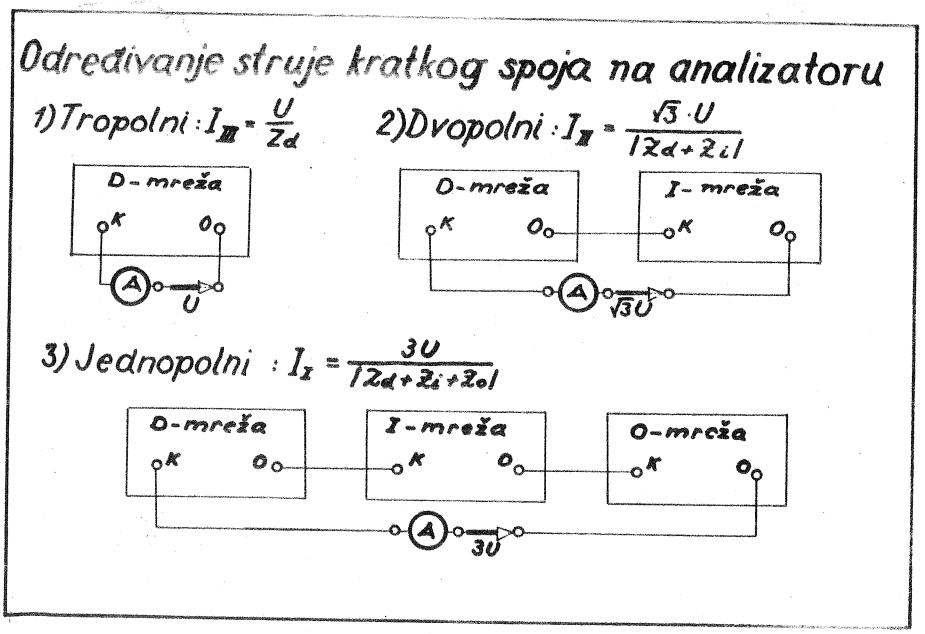
STRUJE I NAPONI KRATKIH SPOJEVA

Na slici 24.1o je dan pregled vektora za struje i napone kod raznih kratkih spojeva, i to (radi jednostavnosti) uz pretpostavku da su direktna, inverzna i nulta impedancija medjusobno jednake i da imaju samo realnu komponentu jednaku jedinici. Struje i naponi odredjeni su prema prije izvedenim formulama po metodi simetričnih komponenata.

ODREDJIVANJE STRUJE KRATKOG SPOJA NA ANALIZATORU

Na slici 24.11 je prikazano, kako se mogu struje kratkog spoja odrediti mjerenjem na mrežnom analizatoru. Prikazana su samo tri karakteristična slučaja kratkog spoja, koja smo prije detaljnije obradili. Već prema vrsti kratkog spoja treba postaviti ili samo direktnu mrežu, ili direktnu i inverznu, ili direktnu, inverznu i nultu mrežu. Na svakoj mreži se mjerenje vrši izmedju tačke kratkog spoja "K" i nul-tačke "O". Iz prikazanih slika je jasno, da se mjerenjem struje dobiju vrijednosti, koje zadovoljavaju prije izvedene formule.

Radi jednostavnosti često se zanemaruje razlika izmedju direktne i inverzne mreže, pa se umjesto njih dvije postavlja samo jedna mreža s dvostruko većim impedancijama.



Sl. 24.11

ODREDJIVANJE IMPEDANCIJA MREŽE MJERENJEM

Impedancije mreže možemo odrediti mjerenjem na način prikazan na slici 24.12.

1) Prvo proizvedemo u mreži tropolni kratki spoj, te izmjerimo fazni napon i struju kratkog spoja. Iz poznatog izraza za struju kratkog spoja slijedi izraz (1), pomoću kojeg možemo izračunati direktnu impedanciju "Z_d".

2) Zatim proizvedemo dvopolni kratki spoj, te izmjerimo linijski napon (ili ga odredimo mjereći fazni napon) i struju kratkog spoja, pa po izrazu (2) izračunamo inverznu impedanciju "Z_i", što možemo, jer je direktna impedancija već poznata.

3) Konačno proizvedemo jednopolni kratki spoj, te iz izmjerene struje i faznog napona, i poznate direktne i inverzne impedancije izračunamo nultu impedanciju "Z_o" prema izrazu (3).

25. PRINCIPI ZAŠTITE OD KRATKOG SPOJA

PRINCIPI ZAŠTITE

Na slici 25.1 dani su pregledno principi zaštite od kratkog spoja. Pri tome se mora voditi računa o dvojemu: (1) o ograničenju samog kratkog spoja, o čijim smo štetnim posljedicama već govorili, pa ga je potrebno iskopčati, i (2) o ograničenju iskapčanja, jer svako iskapčanje dovodi do ispada izvjesnog dijela mreže iz pogona.

ODREĐIVANJE IMPEDANCIJA MREŽE MJERENJEM

1) III-polni kr. spoj: mjerimo U, $\mathcal{Y}_{III}$

$$\text{iz } \mathcal{Y}_{III} = \frac{U}{Z_d} \rightarrow Z_d = \frac{U}{\mathcal{Y}_{III}} \quad (1)$$

2) II-polni kr. spoj: mjerimo U_{23}, $\mathcal{Y}_{II}$

$$\text{iz } \mathcal{Y}_{II} = \frac{U_{23}}{Z_d + Z_i} \rightarrow Z_i = \frac{U_{23}}{\mathcal{Y}_{II}} - Z_d \quad (2)$$

3) I-polni kr. spoj: mjerimo U, $\mathcal{Y}_I$

$$\text{iz } \mathcal{Y}_I = \frac{3U}{Z_d + Z_i + Z_o} \rightarrow Z_o = \frac{3U}{\mathcal{Y}_I} - Z_d - Z_i \quad (3)$$

Sl. 24.12

a) Kratki spoj možemo u prvom redu ograničiti po čestoći, ako broj kratkih spojeva smanjimo na minimum ispravnom izolacijom i prikladnom zaštitom od prenapona. Ali usprkos svih tih mjera ne možemo kratke spojeve potpuno ukloniti, pa moramo s njima računati.

b) Nadalje možemo kratki spoj ograničiti po prostoru, tako da štetne posljedice obuhvate što manji dio mreže, a to se može postići prikladnom shemom spoja.

c) Isto tako možemo kratki spoj ograničiti po intenzitetu, tako da struja kratkog spoja postigne što manju vrijednost. To se može postići opet prikladnom shemom spoja (vrlo često se upotrebljava spoj generatora i transformatora u bloku, bez generatorskih sabirnica, baš iz ovog razloga) ili npr. primjenom prigušnica.

Sva tri navedena načina za ograničenje kratkog spoja djeluju u stvari tako da smanjuju sve smetnje, koje uslijed kratkog spoja nastaju u mreži. Naročito treba naglasiti, da se smanjuju i dinamička naprezanja, od kojih se iskapčanjem pomoću sklopaka ne možemo zaštititi. Ova sredstva se medjutim redovito ne ubrajaju u zaštitu od kratkog spoja u užem smislu (tzv. relejna zaštita) nego se obuhvaćaju općenito ispravnim projektiranjem mreže.

d) Kao zadnja mogućnost ograničenja kratkog spoja ostaje, da ga ograničimo po vremenu na taj način da ga iskopčamo, tj. da prekinemo vezu izmedju mjesta kratkog spoja i izvora. To iskapčanje mora biti izvedeno brzo, jer trajanje smetnje povećava njezine štetne posljedice (sve osim dinamičkog naprezanja), pa ga moramo provesti automatski, a uredjaje za tu svrhu nazivamo relejima. Pogotovu se brzo iskapčanje zahtijeva u mrežama za prijenos energije, gdje neke smetnje naročito dolaze do izražaja (gubitak stabilnosti, smetnje na dojavnim vodovima, razlike potencijala kod uzemljenja). Iskapčanje osim toga mora biti i pouzdano tako, da se svaki kratki spoj iskopča, pa i u slučaju da neki zaštitni uredjaj zataji.

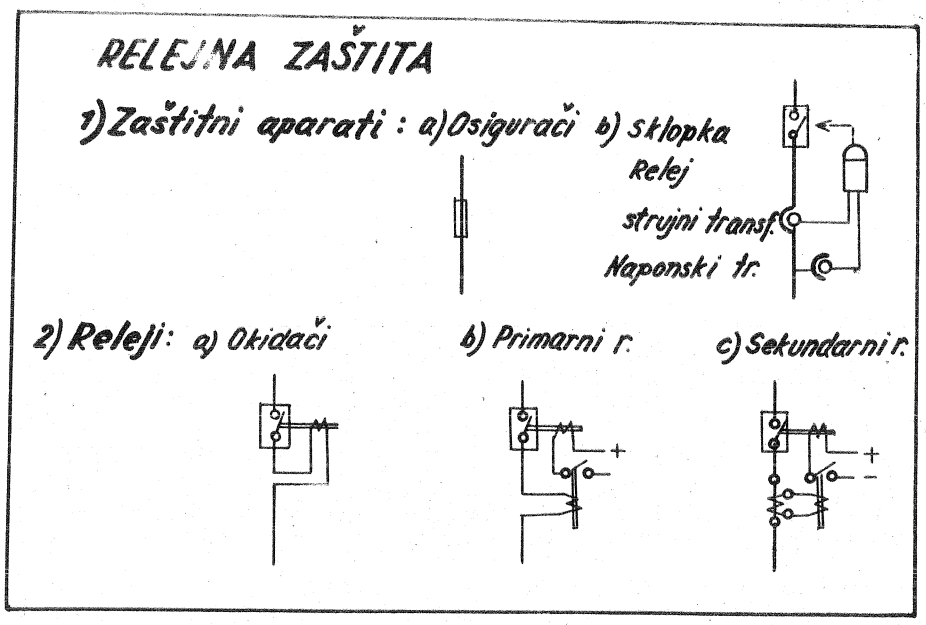
Kao što je rečeno, svaki kratki spoj moramo iskopčati, što opet dovodi do štetnih posljedica, pa moramo i samo iskapčanje što više ograničiti.

e) U prvom redu to možemo opet učiniti po čestoći, tako da do iskapčanja dodje samo u slučaju kvara, a ne inače.

f) Zatim ograničenje možemo provesti po prostoru, tako da iskopčamo samo najnužniji dio mreže, kako bi što veći dio ostao u pogonu.

O tome kako ćemo riješiti ograničenje kratkog spoja po vremenu te ograničenje iskapčanja po čestoći i prostoru, tj. o tome koji ćemo kriterij upotrijebiti za iskapčanje, ovisi i izvedba releja koje ćemo u konkretnom slučaju pri-

Sl. 25.1



Sl. 25.2

mijeniti. O tome će kasnije biti detaljnije govora.

g) Iskapčanje možemo ograničiti i po vremenu, tako da brzo nakon iskapčanja (dakle opet automatski) opet ukopčamo, pa će se pogon nastaviti, ako je uzrok kratkog spoja bio prolazan (a to je najčešći slučaj).

h) I konačno u slučaju jednopolnog kratkog spoja (a to su najčešći kvarovi u mreži) možemo iskopčati samo jednu i to bolesnu fazu, dok druge dvije ostaju same u pogonu do momenta automatskog uklapanja, a time se znatno poboljšava stabilnost, jer dvije faze u pogonu ipak održavaju neku sinhronizacionu silu.

RELEJNA ZAŠTITA

Relejna zaštita za iskapčanje kratkog spoja sastoji se od raznih aparata, što je prikazano na slici 25.2. Najjednostavniji način iskapčanja kratkog spoja jest pomoću osigurača, ali kako se ovi upotrebljavaju samo do nekih 60 kV, ne dolaze uopće u obzir u mrežama za prijenos električne energije. Tu se kratki spoj mora iskopčati pomoću sklopke, na koju djeluje relej, a taj mjereći električne veličine odredjuje kad treba iskopčati, i u tom smislu djeluje na sklopku. Da se omogući mjerenje električnih veličina u mrežama za prijenos električne energije, potrebno su mjerni transformatori.

Što se tiče samih releja, oni mogu biti izvedeni kao: (a) okidači koji direktno koriste mjerenu struju za okidanje sklopke, (b) primarni releji, koji za okidanje sklopke koriste posebni izvor struje (obično istosmjerni), a za zatvaranje tog strujnog kruga koriste direktno mjerenu struju (primarnu struju), i (c) sekundarni releji, koji inače rade kao i primarni releji, ali se za zatvaranje pomoćnog strujnog kruga koriste sekundarnom strujom mjernih transformatora. U mrežama za prijenos električne energije dolaze u obzir samo sekundarni releji.

Sl. 25.3

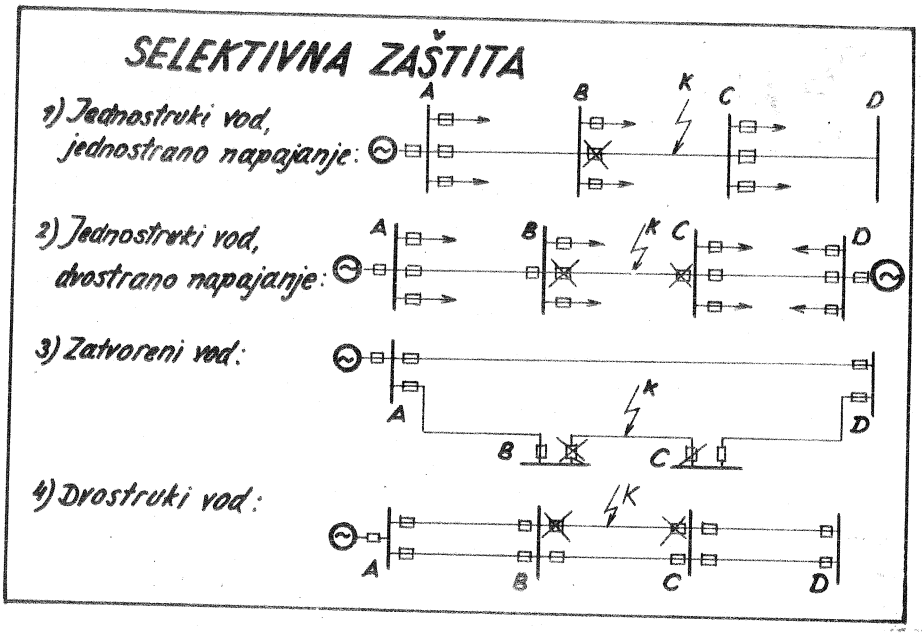
KRITERIJI ZA DJELOVANJE RELEJNE ZAŠTITE

Iz onog, što je prije rečeno u vezi s principima zaštite, slijede zahtjevi koji se postavljaju na relejnu zaštitu, te konačno i načini izvedbe relejne zaštite, a to je pregledno prikazano na slici 25.3.

Zaštita u prvom redu mora biti osjetljiva, te tačno utvrditi postojanje kvara, tako da ne dodje do iskapčanja u pogonu zdrave mreže, a niti da nastali kratki spoj ostane neiskopčan. Drugi zahtjev jest selektivnost, a to znači da zaštita treba da iskapča samo najnužniji dio mreže, ili drugim riječima da releji utvrde ne samo da postoji kvar nego da pronadju i mjesto kvara, te dadu komandu za iskapčanje samo onim sklopkama, koje su potrebne da se bolesni dio mreže iskopča.

Brzina jest treći zahtjev, koji se stavlja za zaštitu i o potrebi brzine kod iskapčanja je već bilo govora. Konačno se na zaštitu stavlja zahtjev i u pogledu rezerve, a to znači ako zaštita na jednom mjestu zataji, da treba zaštita na drugom mjestu da stupi u djelovanje, tako da uvijek imamo u rezervi neku zaštitu, ako zataji ona koja bi prva trebala da djeluje.

Releji, koji karakteriziraju način djelovanja čitave zaštite, mogu biti različite izvedbe. Glavne izvedbe, koje se upotrebljavaju za zaštitu vodova u mrežama, navedene su na istoj slici. Svaka izvedba različito udovoljava postavljenim zahtjevima, a o tome će biti govora u daljnjem razmatranju.



Sl. 25.4

SELEKTIVNA ZAŠTITA

Na slici 25.4 prikazano je nekoliko primjera smještaja zaštite u mreži, da bi se postigla selektivna zaštita.

1) Kod jednostrukog voda, napajanog s jedne strane, dovoljno je zaštitu postaviti samo na izlaze vodova iz sabirnica pojedinih stanica. Kod kratkog spoja npr. izmedju stanica "B" i "C" treba da iskopča označena sklopka u "B" (u izlaznom vodu prema "C"). Doduše, čitava mreža iza te sklopke ostaje izvan pogona i potrošači priključeni na stanice "C" i "D" ostanu bez snabdjevanja, ali to u slučaju jednostranog napajanja ne možemo izbjeći.

2) Kod jednostrukog voda, napajanog s dvije strane, mora se zaštita postaviti u svim odvojcima sa sabirnica, jer svi odvojci predstavljaju "izlaze" vodova, bilo prema jednom bilo prema drugom izvoru, bilo prema oba izvora. U slučaju kratkog spoja npr. izmedju stanica "B" i "C" treba da iskopčaju označene sklopke u vodu izmedju stanica "B" i "C". Taj vod će biti izbačen iz pogona, ali sve drugo ostaje u pogonu i nijednom konzumentu nije prekinuto snabdjevanje.

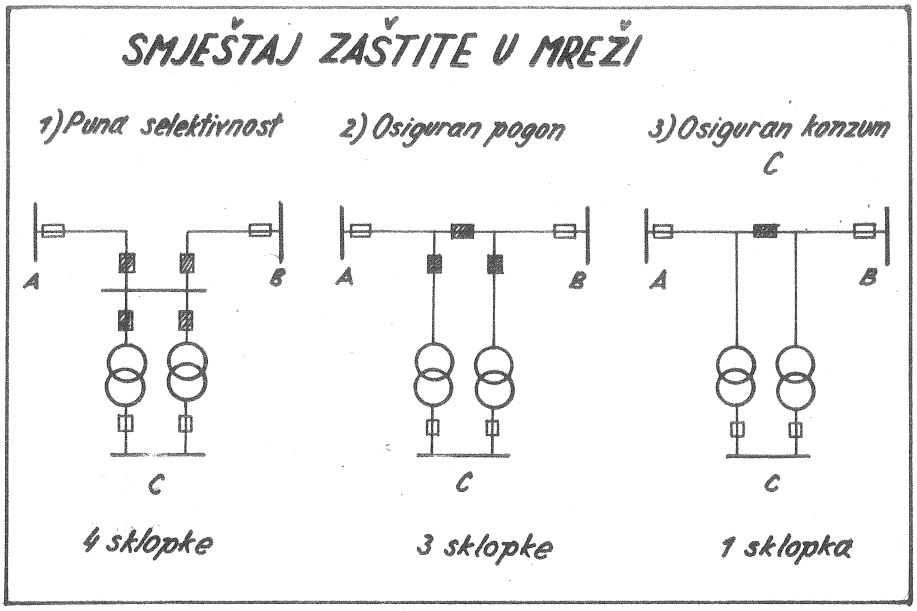
3) Kod zatvorenog voda u obliku prstena, pa makar tu bio i samo jedan izvor energije, ipak je svaka stanica napajana sa dvije strane, pa opet treba zaštitu postaviti u sve odvojke. U slučaju kvara na vodu izmedju "B" i "C" ispast će taj vod iz pogona, ali sve drugo ostaje u pogonu i snabdjevanje nije nigdje prekinuto.

4) Kod dvostrukog voda, pa makar bio napajan samo s jedne strane, situacija je opet slična kao kod prstenastog voda i zaštitu treba postaviti u svaki odvojak. Kod kvara na jednom vodu, izmedju "B" i "C" ispast će taj vod iz pogona, dočim će drugi vod izmedju "B" i "C" ostati u pogonu, a isto tako i sva ostala mreža, te potrošači neće biti ometani.

SMJEŠTAJ ZAŠTITE U MREŽI

Na slici 25.5 prikazan je primjer transformatorske stanice "C", kojoj se dobavlja energija iz dva pouzdana čvorišta "A" i "B". Ako želimo osigurati snabdjevanje konzuma u "C", moramo omogućiti tzv. dvostrano napajanje, tj. i iz čvorišta "A" i iz čvorišta "B", dakle stanica "C" mora biti priključena preko dva voda. Ali i u pogledu transformatora moramo imati punu rezervu, što će redovito dovesti do postavljanja dvaju transformatora, od kojih svaki može sam snabdjevati konzum.

1) Na skici 1) prikazano je rješenje stanice sa sabirnicama i 4 sklopke.



Sl. 25.5

To rješenje daje punu selektivnost, jer zaštita može odvojiti iz pogona posebno bilo koji vod ili bilo koji transformator. Medjutim, pita se, je li tolika selektivnost uopće potrebna. Nije naime bitno da održimo princip selektivnosti pod svaku cijenu, jer je taj princip proistekao iz osnovnog zahtjeva, da se održi snabdjevanje potrošača. Važno je dakle održati u pogonu one dijelove mreže, koji su dovoljni za snabdjevanje potrošača, a više od toga u stvari nije potrebno.

2) Na skici 2 prikazano je rješenje iste stanice, ali samo sa 3 sklopke (dakle 1 sklopku i pripadnu aparaturu smo uštedili). Ovo rješenje ne zadovoljava potpuno princip selektivnosti, jer u slučaju iskapčanja jednog voda i jedan transformator ispada iz pogona. Ali osigurava u stvari istu sigurnost pogona, jer u slučaju ispada jednog voda, ostaje u pogonu drugi vod i jedan transformator za snabdjevanje konzuma u "C", dok u slučaju ispada jednog transformatora ostaje u pogonu ne samo drugi transformator za snabdjevanje konzuma u "C" nego čak i veza izmedju stanica A i B.

3) Ako dozvolimo, da se u slučaju kvara jednog transformatora prekine veza izmedju stanica "A" i "B", jer ta veza inače za pogon mreže uopće nije potrebna (a ta veza ionako nije osigurana, jer imamo samo jednostruki vod), onda se možemo zadovoljiti s rješenjem prema skici 3, gdje u stanici "C" postoji samo 1 sklopka na strani gornjeg napona. Kvar bilo na jednom vodu bilo na jednom transformatoru izbacit će doduše iz pogona uvijek i vod i transformator, ali snabdjevanje konzuma "C" će ipak biti osigurano.

26. NADSTRUJNA ZAŠTITA

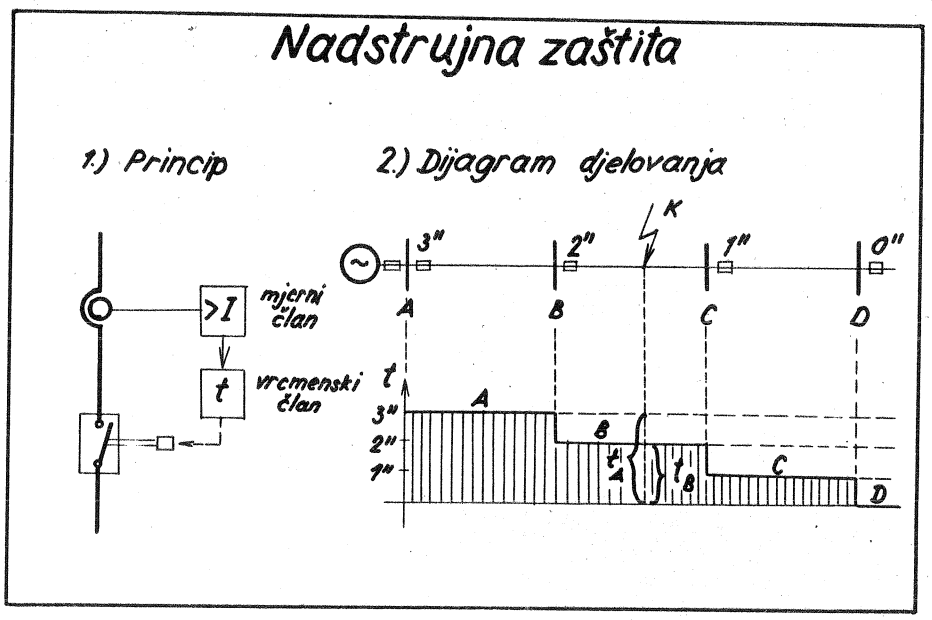
OPĆENITO O NADSTRUJNOJ ZAŠTITI

Način na koji radi nadstrujna zaštita prikazan je na slici 26.1.

1) Najprije je prikazan princip rada, koji se sastoji u tome, da relej mjeri struju u štićenom vodu. Kad ta struja prekorači utvrdjenu granicu, relej reagira, jer je prevelika struja indikacija da postoji kratki spoj. Struja na releju se udešava na toliko veću struju od maksimalne struje u pogonu, kako ne bi došlo do krivog iskapčanja, tj. do iskapčanja u zdravom mreži. Time se postiže prikladna osjetljivost releja. Prema načinu djelovanja samom je releju odnosno zaštiti ime "nadstrujna".

Radi postizavanja selektivnosti mjernom članu dodaje se vremenski član, kojim se namjerno zateže vrijeme iskapčanja. To vremensko zatezanje se na releju takodjer može udešavati.

2) Na istoj slici prikazan je dijagram djelovanja nadstrujne zaštite u jednostavnom primjeru jednostrano napajanog voda. Vremensko zatezanje pojedinih releja, koji se nižu jedan iza drugoga, udesi se tako, da relej ima to duže zatezanje, što je bliže izvoru. To je ujedno općeniti princip za vremensko stepenovanje nadstrujne zaštite. Kod kratkog spoja npr. na vodu "B-C", reagirat će svi releji izmedju izvora i kratkog spoja, ali će iza 2 sekunde iskopčati relej u "B", i time će kratki spoj biti selektivno eliminiran. Relej u "A" ima duže vrijeme zatezanja pa neće iskopčati (time je postignuta selektivnost), nego jedino u slučaju da zaštita u "B" zataji (time je postignuto rezervno djelovanje).



Sl. 26.1

KARAKTERISTIKE NADSTRUJNIH RELEJA

Na slici 26.2 prikazani su glavni oblici karakteristika nadstrujnih releja, koje daju ovisnost vremena iskapčanja o struji, koja teče kroz relej.

1) Zavisnu karakteristiku imaju releji vrlo jednostavne izvedbe, a tu se može udešavati samo struja, iznad koje vrijednosti relej uopće treba da djeluje. Kod većih struja se gubi selektivnost, jer je vremenski skok (tj. razlika u vremenu zatezanja izmedju dva susjedna releja) premalen, pa lako dodje do krivog iskapčanja, tj. da prije iskopča relej, koji ima duže vrijeme zatezanja.

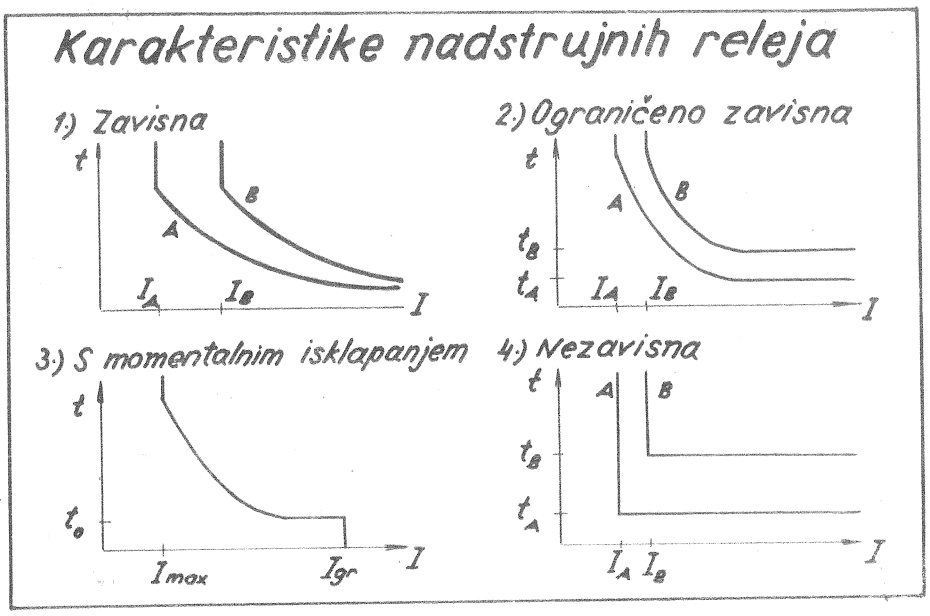
2) Da se tome izbjegne, rade se releji s ograničeno zavisnom karakteristikom, gdje se udešava i vrijeme, ispod kojeg ni u kojem slučaju ne može pasti trajanje vremenskog zatezanja. Tako je osiguran potrebni vremenski skok za sigurno postizanje selektivnosti i kod najvećih vrijednosti struja.

3) Često se ograničeno zavisnoj karakteristici dodaje i momentalno iskapčanje, za slučaj da struja prekorači neku graničnu vrijednost "I_{gr}". Ovo se koristi tamo, gdje bi razmjerno velika struja dovela do oštećenja, ako duže potraje, ali se time gubi na selektivnosti.

Sve tri navedene karakteristike, gdje vrijeme zatezanja na neki način ovisi o struji, upotrebljavaju se samo u mrežama manjeg napona, ali se redovito ne upotrebljavaju u mrežama za prijenos električne energije, jer tu ne mogu osigurati potrebnu selektivnost.

4) Kod nezavisne karakteristike se udešava struja i vrijeme zatezanja, i to je vrijeme zatezanja potpuno neovisno o struji.

Releji s takvom karakteristikom imaju veću preciznost rada, i upotrebljavaju se i u mrežama za prijenos električne energije (ukoliko se uopće upo-



Sl. 26.2

trijebi nadstrujna zaštita). Struja se obično udešava na 1,2 do 2,o x I_n (I_n = = nazivna struja releja odnosno strujnog transformatora). Struja se ne smije udesiti niti na premalu vrijednost, da ne dodje do iskapčanja u zdravoj mreži, npr. kod eventualnih kratkotrajnih preopterećenja, ali niti na preveliku vrijednost, inače relej neće osjetiti kratki spoj. Vrijeme se na releju udešava već prema planu vremenskog stepenovanja u mreži. Vremenski skok izmedju releja i releja iznosi obično izmedju o,5 i 1,o sekunde. Vremenski skok ne smije biti premalen, kako bi se osiguralo selektivno iskapčanje, ukolik releji i ne rade sasvim precizno, ali niti prevelik, da trajanje kratkog spoja ne bude predugo.

NADSTRUJNA ZAŠTITA KOD DVOSTRANOG NAPAJANJA

Najjednostavniji slučaj primjene nadstrujne zaštite kod dvostrukog napajanja prikazan je na slici 26.3, gdje je uzet jednostruki vod napajan s obje strane.

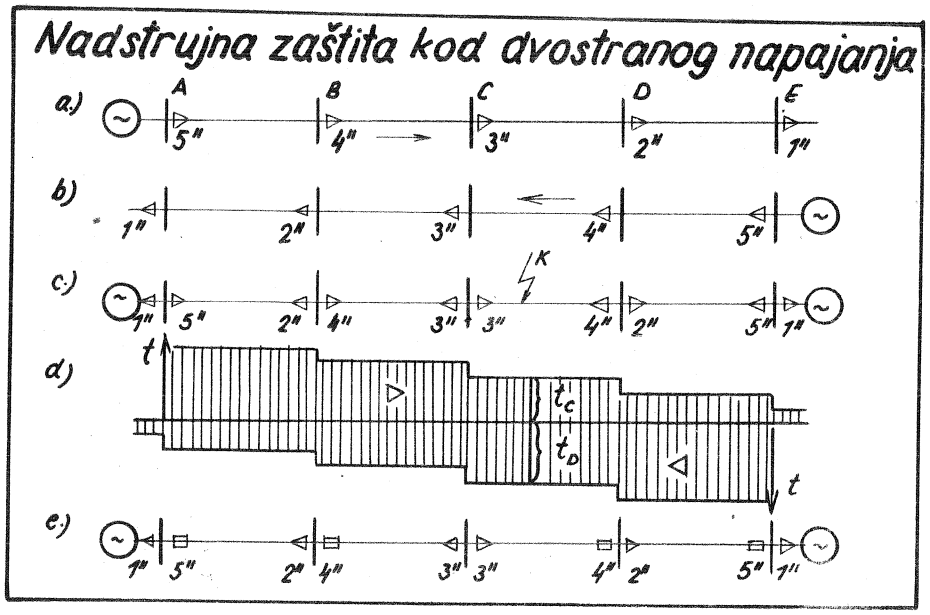
a) Najprije je prikazan vod s napajanjem samo s lijeve strane, te je prema tome napajanju postavljena i nadstrujna zaštita, tj. samo s desne strane sabirnica (na izlazu) i sa vremenskim stepenovanjem od desna ulijevo (radi preglednosti stepenovanje je zaokruženo na punu sekundu). Ova zaštita treba da radi samo ako energija kratkog spoja teče udesno, pa je zaštita prikazana tako orjentiranim trokutima.

b) Zatim je na vod postavljena zaštita, kako bi je zahtijevalo napajanje s desne strane. U stvari ovdje imamo analognu situaciju kao i prije, samo što su zamijenjene lijeva i desna strana.

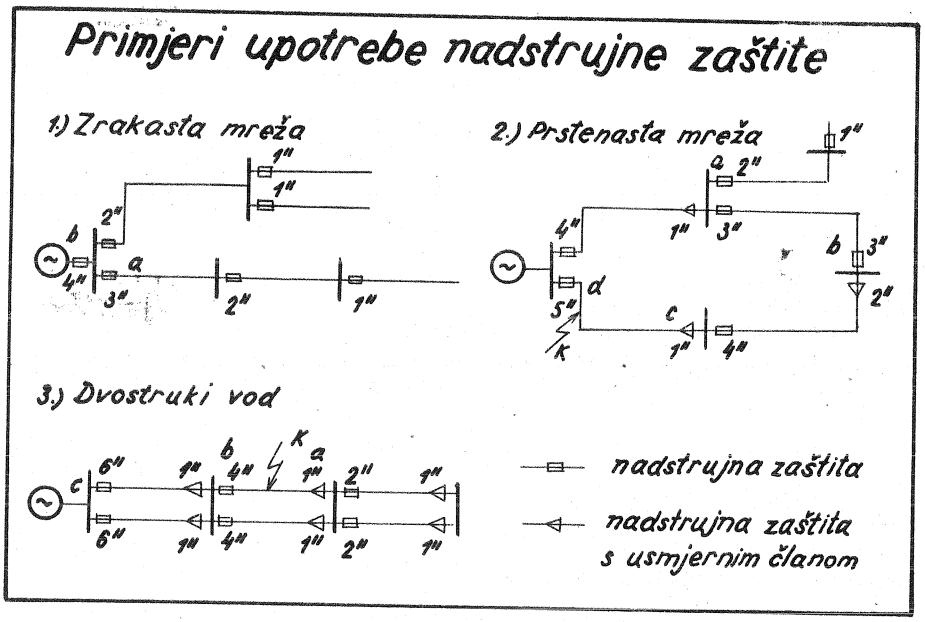
c) Budući da vod ima stvarno dvostrano napajanje, to moramo postaviti svu dosad navedenu zaštitu.

U slučaju kratkog spoja npr. na odsjeku "C-D" moraju iskopčati dva najbliža releja, koji imaju vremena 3 odnosno 4 sekunde. Da se to osigura, moraju releji imati i usmjerni član, tako da iskapčaju samo oni releji, kod kojih energija kratkog spoja teče od sabirnica prema vani. Inače bi kod bilo kojeg kratkog spoja uvijek iskapčali releji sa zatezanjem od 1 sekunde i uvijek bi čitav vod ispao iz pogona.

d) Dalje je prikazan dijagram djelovanja za ovakvu zaštitu, pri čemu je za svaki smjer crtan posebni dijagram, i to (kao što je običaj) jedan odozgo a drugi odozdo.



Sl. 26.3



Sl. 26.4

e) Usmjerni član, koji odredjuje smjer energije, pa mora mjeriti ne samo struju nego i napon, znatno komplicira nadstrujnu zaštitu. Taj se član medjutim može izbjeći kod onih releja, koji imaju duže vrijeme iskapčanja, jer je samim dužim vremenom već spriječeno krivo iskapčanje. Za dani slučaj zaštita bi se dakle izvela kao na donjoj skici, gdje je kvadratićima prikazana nadstrujna zaštita bez usmjernih članova.

PRIMJERI UPOTREBE NADSTRUJNE ZAŠTITE

Na slici 26.4 prikazana su tri primjera upotrebe nadstrujne zaštite, koji ujedno pokazuju kako dolazi do dugih vremena iskapčanja. Radi jednostavnosti vremenski skok je opet uzet 1 sekundu.

1) Na skici 1 prikazana je zrakasta mreža. Tu je zaštita sasvim jednostavna, samo treba paziti, da svaki relej ima duže vrijeme od bilo kojeg releja iza njega. Zbog toga je relej "a" sa 3 sekunde mjerodavan za stepenovanje releja "b", kojemu dakle treba vremensko zatezanje udesiti na 4 sekunde. S time se još više produžuje vrijeme iskapčanja.

2) Na skici 2 prikazana je prstenasta mreža. Tu ćemo u prvom redu postaviti stepenovanje na otvorenom odvojku. Kod prstena ćemo postupiti kao kod dvostrukog napajanja, tj. kao da su sabirnice izvora otvorene i da svaki dio ima svoje napajanje. Osim toga opet stepenovanje mora biti ispravno i obzirom na odvojke. Zbog toga je relej "a" mjerodavan za stepenovanje releja "b", koji je dakle morao biti udešen na 3 sekunde. No ima još jedan razlog, koji produžuje vrijeme iskapčanja. Uzmimo, da je nastao kratki spoj na mjestu "K", dakle blizu izvora. U tom slučaju može se dogoditi, da struja koja okolo naokolo kroz prsten teče prema kratkom spoju nije dovoljno jaka da relej "c" proradi, nego će on proraditi tek nakon što zaštita "d" iskopča i s time se struja kroz "c" poveća. Vrijeme dok kratki spoj bude stvarno iskopčan iznosit će u ovom primjeru ukupno 6 sekunda.

3) Na skici 3 prikazan je dvostruki vod, koji prolazi kroz nekoliko stanica sa sabirnicama. Na svim odvojcima, koji izlaze prema izvoru, mogu se vremena udesiti na najmanju vrijednost (u našem primjeru 1 sekunda), bez bojazni od krivog iskapčanja, jedino im se mora dodati usmjerni član. Npr. Kod kratkog spoja na mjestu "K" samo će u releju "a" teći struja sa smjerom koji dopušta iskapčanje, dok će u ostalim relejima stepenovanima na jednu sekundu ili biti suprotan smjer ili uopće neće biti struje. Ostali releji se normalno stepenuju, što se tiče redoslijeda, samo vremenski skok treba povećati. Ako je kratki spoj naime blizu releja "b", može se dogoditi, da bude iskopčan tek nakon 4+1 = 5 sekunda, kao što je objašnjeno gore. Da ne dodje do krivog iskapčanja releji "c" ne smiju biti udešeni na 5 sekundi nego na 6 sekundi. To opet dovodi do produženja vremena iskapčanja.

Osobine nadstrujne zaštite

Zahtjevi:	Ispunjenje:
Osjetljivost	donekle
Selektivnost	donekle
Brzina	slabo
Rezerva	dobro

Sl. 26.5

OSOBINE NADSTRUJNE ZAŠTITE

Na slici 26.5 dan je pregled osebina nadstrujne zaštite, prema onome što je o njoj bilo rečeno.

Zahtjev osjetljivosti ispunjen je samo donekle, jer struja na koju relej reagira mora biti tako udešena da relej ne iskopča kratkotrajna preopterećenja, ali da uvijek iskopča kratki spoj. To medjutim nije moguće uvijek postići. Naime u mrežama napona iznad 3o kV lako se može dogoditi da noću kod malog uvrštenja strojeva i manje uzbude (zbog malog opterećenja) struja kratkog spoja (trajna) bude manja čak i od najveće pogonske struje.

Zahtjev selektivnosti ispunjen je takodjer samo donekle. U dosadašnjim primjerima nismo imali nigdje više nego dvostruko napajanje (otvoreni vod s 2 izvora ili prsten s 1 izvorom). Selektivnost se naime pomoću nadstrujne zaštite može postići samo u tako jednostavnim slučajevima, a kod složenijih mreža selektivnost nije moguće ostvariti.

Brzina je zahtjev, kojega nadstrujna zaštita najslabije ispunjava. Čim imamo nekoliko releja jedan iza drugoga, vrijeme iskapčanja se penje na nekoliko sekundi, a to je često više nego što se može dozvoliti, pogotovu ako je u pitanju stabilnost mreže.

Jedino zahtjevu rezerve nadstrujna zaštita dobro udovoljava, jer svaki relej služi kao rezerva za sve one releje koji su dalje od izvora.

Iz svega rečenoga se vidi, da nadstrujna zaštita normalno neće doći u upotrebu u mrežama za prijenos električne energije, gdje se radi o razmjerno velikim naponima, složenoj konfiguraciji mreže i većoj opasnosti od gubitka stabilnosti. Ako se u takvoj mreži upotrijebi nadstrujna zaštita umjesto koje druge, onda će to biti iznimni slučaj ili iznimke prilike. Ali se nadstrujna zaštita može upotrijebiti, a često se i upotrebljava, uz neku drugu zaštitu, gdje onda nadstrujna zaštita ima ulogu rezerve. Tom zahtjevu ona dobro udovoljava, a na rezervno djelovanje zaštite se ionako ne stavljaju oštro ostali zahtjevi.

27. DISTANTNA ZAŠTITA

OPĆENITO O DISTANTNOJ ZAŠTITI

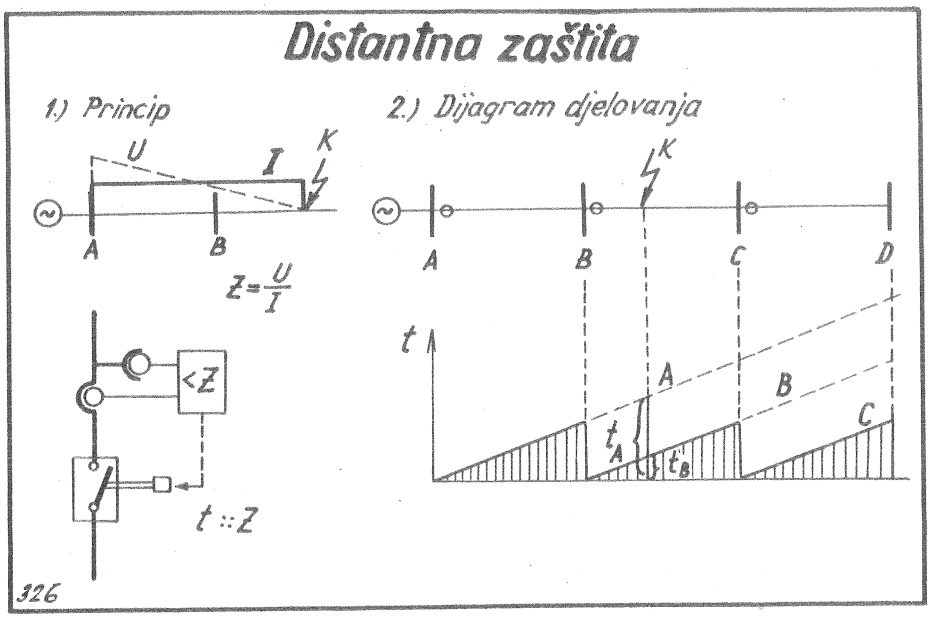
Način na koji radi distantna zaštita u principu je prikazan na slici 27.1.

1) Princip rada je slijedeći: relej mjeri struju i napon te odredjuje njihov kvocijent, koji je jednak impedanciji "Z" izmedju releja i kratkog spoja. Tako će relej u "A" izmjeriti veći napon, dakle i veću impedanciju nego relej u "B". I distantni releji imaju vremensko zatezanje, ali je ovo ovisno o veličini impedancije, te je to veća što je impedancija veća (grubo možemo uzeti da je vremensko zatezanje proporcionalno impedanciji). Kako će izmjerena impedancija biti to manja, što je relej bliže kratkom spoju, to će i vrijeme zatezanja biti to manje, što je relej bliže kratkom spoju. Drugim riječima: prvi će iskopčati oni releji, koji su najbliže kratkom spoju.

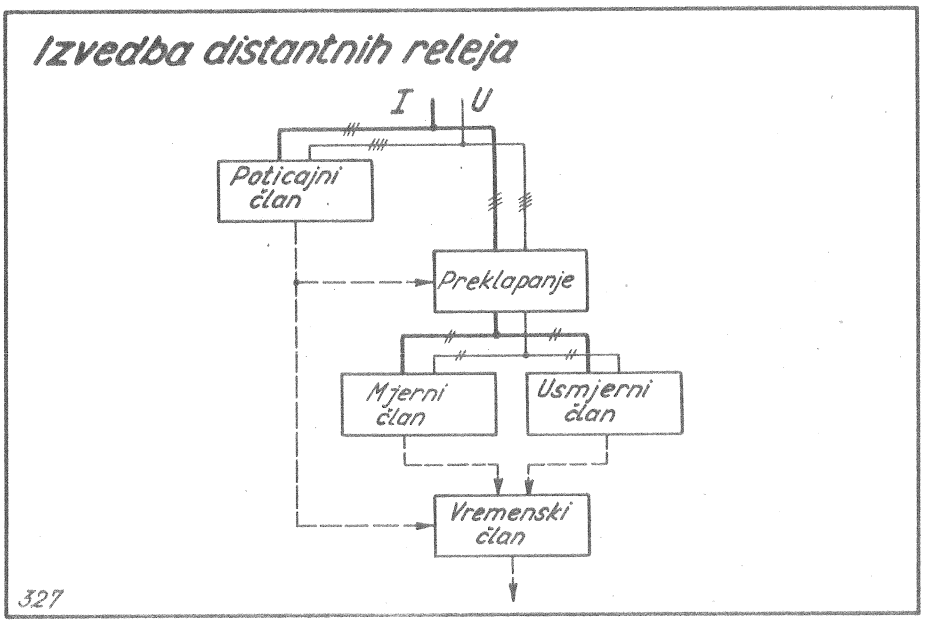
2) Na skici 2 prikazan je dijagram djelovanja distantne zaštite na jednostavnom primjeru jednostrukog voda napajanog s jedne strane. Prikazano je vrijeme iskapčanja pojedinih releja u ovisnosti o položaju kratkog spoja. Kod prikazanog kratkog spoja u "K", će relej u "B" iskopčati nakon vremena "t_B". Time je kratki spoj eliminiran, pa relej u "A" neće više djelovati, nego jedino u slučaju ako relej u "B" zataji. Imamo dakle i rezervno djelovanje, koje na slici odgovara linijama izvučenima crtkano, dočim išrafirana ploha odgovara glavnom djelovanju.

Na ovaj način je postignuto troje: (1) relej pouzdano reagira na svaki kratki spoj, jer mjeri ne samo povećanje struje nego i smanjenje napona, tako da njegova osjetljivost ne dolazi u pitanje, (2) vremena iskapčanja su skraćena obzirom na nadstrujnu zaštitu, jer su stepenice vremenskog stepenovanja nagnute (vidjet ćemo kasnije kako se vrijeme iskapčanja može smanjiti na minimum, i (3) postignuta je potpuna selektivnost, jer će - bez obzira na konfiguraciju mreže - uvijek iskopčati samo najbliži releji, a to znači da će biti izbačen iz pogona samo najnužniji dio mreže. Zbog toga se ovi releji upotrebljavaju mnogo u mrežama najvišeg napona.

Budući da se distantni releji upotrebljavaju u mrežama s višestrukim napajanjem oni trebaju i usmjerni član, jer bi inače svi releji na istim sabirnicama (koji su izmjerili istu udaljenost kratkog spoja) iskopčali, a treba da iskopča samo onaj, kroz koji energija kratkog spoja izlazi iz sabirnica. Usmjerne članove moraju imati svi distantni releji, i ne mogu se uštediti na nekima (kao kod nadstrujne zaštite), jer ovdje nisu neki releji udešeni na duže, a neki na kraće vrijeme.



Sl. 27.1



Sl. 27.2

IZVEDBA DISTANTNIH RELEJA

Na slici 27.2 prikazana je izvedba distantnih releja u glavnim crtama. Budući da se mjerenje vrši radi jednostavnosti redovito samo jednofazno, to je potrebno preklapanje mjerenog člana na bolesnu fazu, a time upravlja poticajni član, koji ujedno služi i za otkrivanje da uopće postoji kratki spoj. Tako se u principu distantni relej sastoji od slijedećih dijelova.

Poticajni član služi u prvom redu za otkrivanje, da je došlo do kratkog spoja i za davanje poticaja da relej stupi u funkciju. Zbog toga mora poticajni

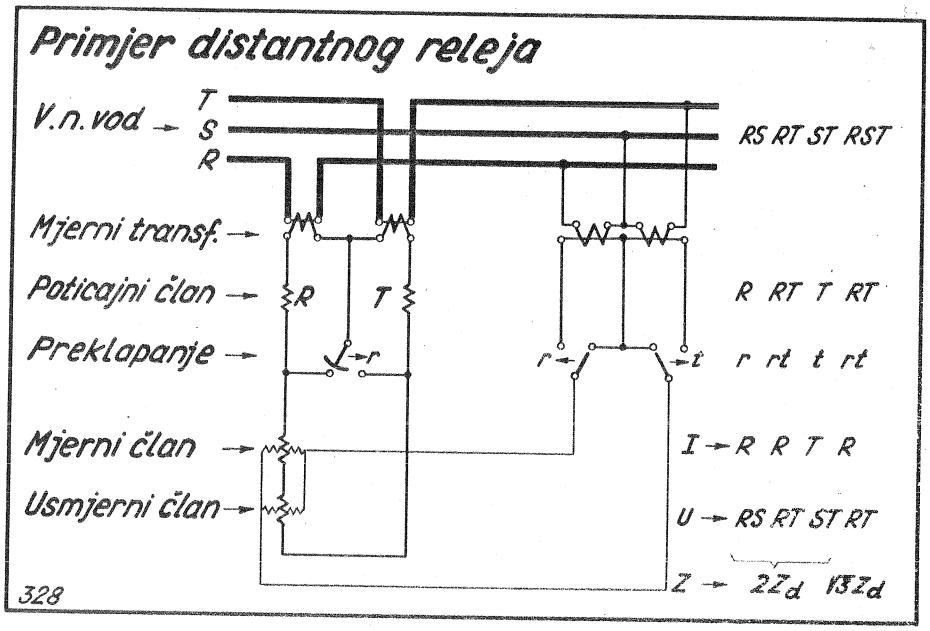
član obuhvatiti sve tri faze. Kriterij za djelovanje je redovito smanjenje impedancije ispod udešene vrijednosti, što nazivamo podimpedantnim poticajem. Poticajni član mora dakle osim svih struja mjeriti i sve napone. Na taj način osigurana je potrebna osjetljivost releja. No za mreže manjeg napona može se upotrijebiti i nadstrujni poticaj, što je jednostavnije i jeftinije, a taj može biti smješten samo u dvije faze, ako mreža nije kruto uzemljena.

Drugi zadatak poticajnog člana jest da odredi, u kojoj ili u kojim fazama postoji kvar, te da dade komandu članu za preklapanje, koji će onda priključiti mjerni član na ispravni napon i ispravnu struju. Zbog toga i član za preklapanje mora dobiti sve struje i sve napone, ali osim toga njemu daje komandu i poticajni član.

Mjerni i usmjerni član dobivaju izabranu struju i napon, te svoje podatke prenose na vremenski član. Mjerni član prenosi podatak o izmjerenoj impedanciji, o čemu će ovisiti koliko vremensko zatezanje je potrebno, a usmjerni član prenosi podatak o smjeru energije, o čemu će ovisiti, treba li uopće dati sklopki komandu za iskapčanje ili ne. Releji, koji mjere impedanciju zovu se i impedantni, ali ima izvedba gdje se mjeri reaktancija (reaktantni releji) ili uglavnom djelatni otpor (konduktantni releji).

Vremenski član počinje mjeriti vrijeme, čim mu poticajni član direktno javi postojanje kratkog spoja (tim se postiže veća vremenska tačnost) i djeluje prema podacima dobivenim od mjernog i usmjernog člana.

Prikazana izvedba daje samo principjelnu sliku. Stvarne izvedbe mogu imati još razne pomoćne članove, ili su neki od prikazanih spojeni u jedan član.



Sl. 27.3

PRIMJER DISTANTNOG RELEJA

Na slici 27.3 je dan primjer za preklapanje jednog jednostavnog distantnog releja s nadstrujnim poticajem u dvije faze. Primjer je pojednostavljen koliko je god moguće, samo da se što preglednije prikaže djelovanje poticajnog člana i preklapanja.

Struja i napon visokonaponskog voda mjere se pomoću mjernih transformatora, i to dva strujna u fazama R i T i dva naponska za napone RS i ST. Poticajni članovi su nadstrujni i mjere struju u fazama R i T, pa ako struja prekorači udešenu vrijednost, daju poticaj za preklapanje. Član za preklapanje ima 1 preklopku za struju i 2 preklopke za napon, koje se pomaknu u stranu označenu strelicom, ako dade poticaj ona faza čije je slovo upisano uz preklopku. Kod zdrave mreže niti mjerni niti usmjerni član nemaju napona.

Na desnoj strani slike prikazano je odgovarajućim oznakama kako djeluje relej u slučaju dvopolnog i tropolnog kratkog spoja. Vrsta kratkog spoja označena je slovima faza u visini visokonaponskog voda (RS znači dvopolni kratki spoj izmedju faza R i S itd.). U visini poticajnog člana označeno je, koji nadstrujni poticaj proradi u dotičnom slučaju, a u visini člana za preklapanje koja preklopka proradi. Ispod toga je navedeno, koju struju i napon mjeri član i konačno, koju impedanciju dobijemo iz toga mjerenja.

U slučaju dvopolnog kratkog spoja izmedju faza R i S dat će poticaj faza R. Strujna preklopka će se pomaknuti udesno i kroz mjerni član će teći struja faze R. Lijeva naponska preklopka će se pomaknuti ulijevo i mjerni član će mjeriti napon R-S. Mjerni član dakle mjeri napon izmedju bolesnih faza i struju jedne bolesne faze. Lako se uvjeriti da se analogno dogadja i kod svih dvopolnih kratkih spojeva, pa je izmjerena impedancija dakle jednaka 2 Z_d (budući da u petlji kratkog spoja nema generatora, to je $Z_i = Z_d$).

U slučaju tropolnog kratkog spoja relej izmjeri struju u jednoj fazi, ali ne izmjeri fazni napon (kao što bi trebalo) nego linijski napon, tako da je izmjerena impedancija sada jednaka $\sqrt{3}.Z_d$. To znači da će kod tropolnog kratkog spoja relej nešto brže iskopčati nego kod dvopolnog kratkog spoja na istom mjestu. Kod ove jednostavne izvedbe se ta netačnost u radu tolerira.

KARAKTERISTIKE DISTANTNIH RELEJA

Na slici 27.4 prikazano je nekoliko tipičnih karakteristika distantnih releja, koje prikazuju vrijeme iskapčanja u ovisnosti o izmjerenoj impedanciji (odnosno reaktanciji i sl.).

1) Na skici 1 prikazana je tzv. linearna karakteristika, koja bi odgovarala postavljenom principu, da je vrijeme iskapčanja proporcionalno izmjerenoj impedanciji. Ovakva karakteristika dovodi do dugih vremena iskapčanja kod kratkih spojeva na kraju dugih odsječaka vodova (zaštita nije brza), odnosno do malog vremenskog skoka izmedju dva susjedna releja, ako je odsječak voda vrlo kratak, pa to može dovesti do krivog iskapčanja (zaštita nije dovoljno selektivna).

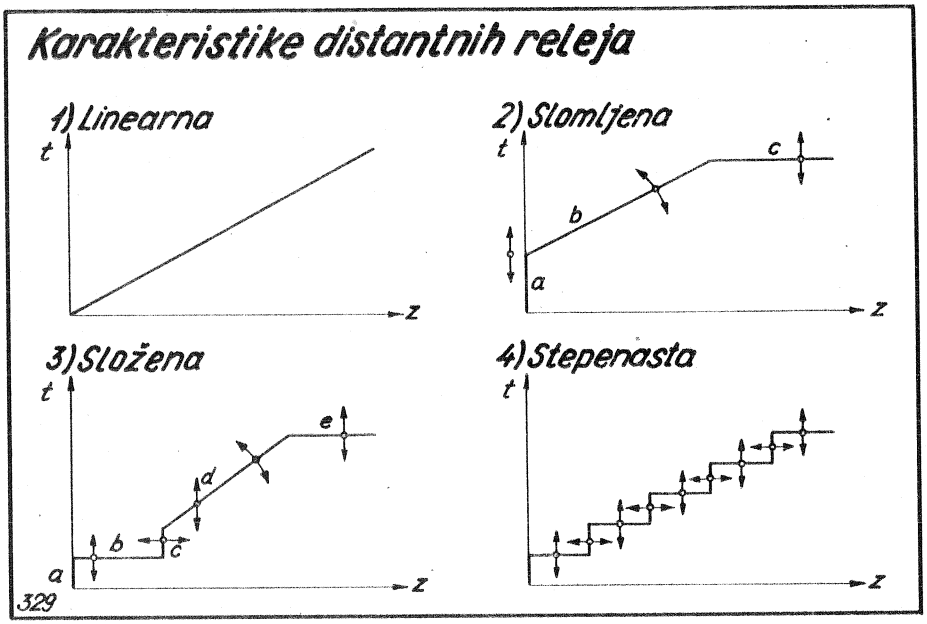
2) Na skici 2 prikazana je slomljena karakteristika, gdje su izbjegnute navedene mane. U prvom redu imamo tako zvano osnovno vrijeme iskapčanja (dio "a"), koje možemo udešavati (ali koje ionako ne može biti jednako nuli, kao što smo idealizirali kod linearne karakteristike, jer iz konstruktivnih razloga zaštita treba neko vrijeme od pojave kratkog spoja do iskapčanja za svoj vlastiti rad). Zatim dolazi dio "b", kojem se strmina također može udešavati. Pomoću ispravnog udešavanja visine dijela "a" i strmine dijela "b" možemo izbjeći prije navedene poteškoće. Ali sad dolazi kod rezervnog djelovanja do neispravnog iskapčanja i predugih vremena zatezanja, pa je zato dio karakteristike "b" prekinut i nastavljen horizontalnim dijelom "c", kojemu se položaj može opet udešavati. Time se može postići i ispravno rezervno djelovanje.

Odsječak voda, koji ovaj relej štiti u svom glavnom djelovanju, nalazi se unutar dijela karakteristike "b". To znači da će kod kratkog spoja na kraju odsječka vrijeme iskapčanja biti znatno duže nego kod kratkog spoja na početku odsječka, što u stvari za postizanje selektivnosti nije potrebno.

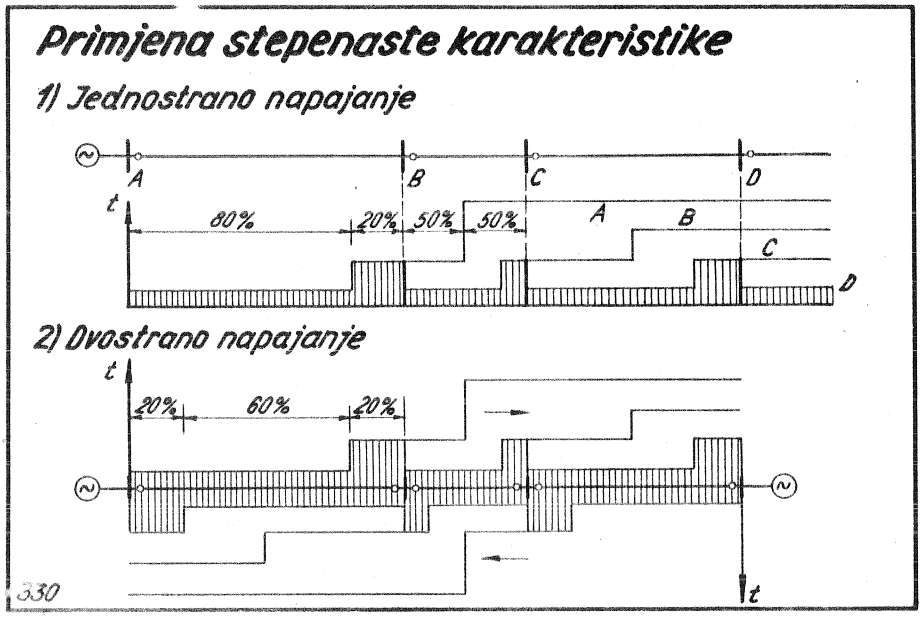
3) Na skici 3 prikazana je tzv. složena karakteristika, gdje je i ta mana izbjegnuta. Nakon osnovnog vremena (dio "a") karakteristika ide horizontalno (dio "b"), tako da se svi kratki spojevi u tom dijelu voda iskapčaju u najkraće moguće vrijeme. Ovim horizontalnim dijelom se obuhvati oko 80% dužine odsječka, a više se ne može, jer bi došla u pitanje selektivnost. Zatim dolazi uspravni dio karakteristike "c", što je potrebno za postizavanje dovoljnog vremenskog skoka izmedju dva susjedna releja. Konačno dolazi kosi dio "d" i opet horizontalni dio "e" kao i prije. Svaki pojedini dio karakteristike se može udešavati po položaju, a kosi dio "d" osim toga i po nagibu. Ova karakteristika dobro rješava zadatke distantne zaštite, ali je prilično složena, a zahtijeva i posebni mehanizam za kosi dio karakteristike "d".

4) Na skici 4 prikazana je stepenasta karakteristika, gdje je uopće izbjegnut kosi dio karakteristike kao nepotreban i nespretan, a karakteristika se sastoji od 3 do 5 stepenica, koje se sve mogu udešavati po svom položaju. Ovakva karakteristika je pregledna, lako ju je kod releja ostvariti i ima sve prednosti, pa se kod modernih releja danas jedino ona upotrebljava.

Treba naglasiti da se u karakteristikama daje impedancija koju mjeri relej, a ne impedancija mreže, na koju je relej priključen preko mjernih transformatora. Da se dobije impedancija koju mjeri relej, treba impedanciju mreže



Sl. 27.4



Sl. 27.5

pomnožiti s prijenosnim odnosom strujnih transformatora i podijeliti s prijenosnim odnosom naponskih transformatora.

PRIMJENA STEPENASTE KARAKTERISTIKE

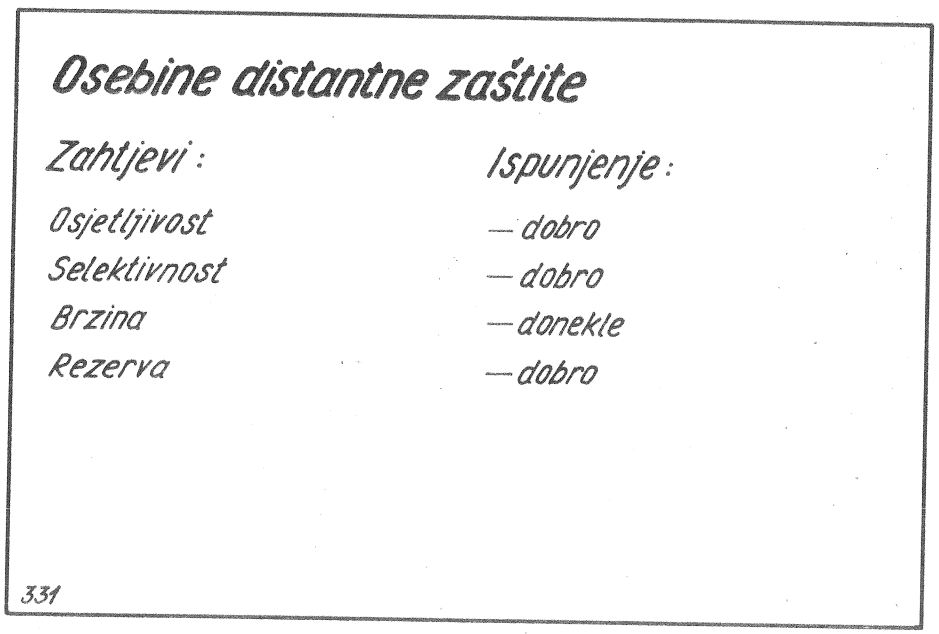
Na slici 27.5 prikazana je primjena distantne zaštite sa stepenastom karakteristikom od 3 stepena, i to na jednostrukom vodu, napajanom s jedne odnosno s obje strane.

1) Kod jednostranog napajanja postavljamo dijagram djelovanja polazeći od

releja, koji je najviše udaljen od izvora. Relej "D" udesit ćemo tako, da prvim stepenom štiti prvi dio voda (ostalo se na slici ne vidi). Relej "C" udesit ćemo tako da prvim stepenom štiti oko 8o% voda C-D, a onda prelazi na drugi stepen (ostalo se na slici ne vidi). Relej "B" će prvim stepenom štititi oko 8o% voda B-C, a zatim prelazi na drugi stepen negdje do polovice voda C-D i tu prelazi na treći stepen. Relej "A" će prvim stepenom štititi oko 8o% voda A-B, drugim stepenom ide otprilike do polovice voda B-C, i tu prelazi na treći stepen s nešto većim skokom. Što se tiče vremena pojedinih stepena, ona moraju biti tolika, da osiguravaju dovoljni vremenski skok izmedju dva susjedna releja, koji je potreban za ispravni rad. Kao što se vidi, oko 8o% kvarova bit će iskopčano u vremenu prvog stepena, a oko 2o% u vremenu drugog stepena, čime je prilično dobro zadovoljeno zahtjevu brzine.

2) Kod dvostranog napajanja postupamo analogno, ali jedanput obzirom na jedan izvor i drugi put obzirom na drugi izvor, slično kao što smo radili kod nadstrujne zaštite, pa je i dijagram djelovanja crtan na isti način. Vidimo da će ovdje u vremenu prvog stepena biti iskopčano samo oko 6o% kratkih spojeva, dok će oko 4o% kratkih spojeva biti iskopčano u vremenu drugog stepena (otprilike 1 sekunda).

Da što veći broj kratkih spojeva iskopčamo u vremenu prvog stepena možemo načiniti dvoje: (1) da prvi stepen što više produžimo, npr. do 85% dužine voda (ali više ne možemo), pa će samo 3o% kratkih spojeva biti iskopčano u drugom stepenu, ili (2) da sklopke uz oba kraja istog odsjeka povežemo visoko-frekventnim kanalom, tako da iskapčanje jedne sklopke dovodi do istodobnog iskapčanja i druge sklopke, pa ćemo sve kratke spojeve imati iskopčane u prvom stepenu.



Sl. 27.6

OSOBINE DISTANTNE ZAŠTITE

Na slici 27.6 dan je pregled osebina nadstrujne zaštite, prema onome, što je o njoj bilo rečeno.

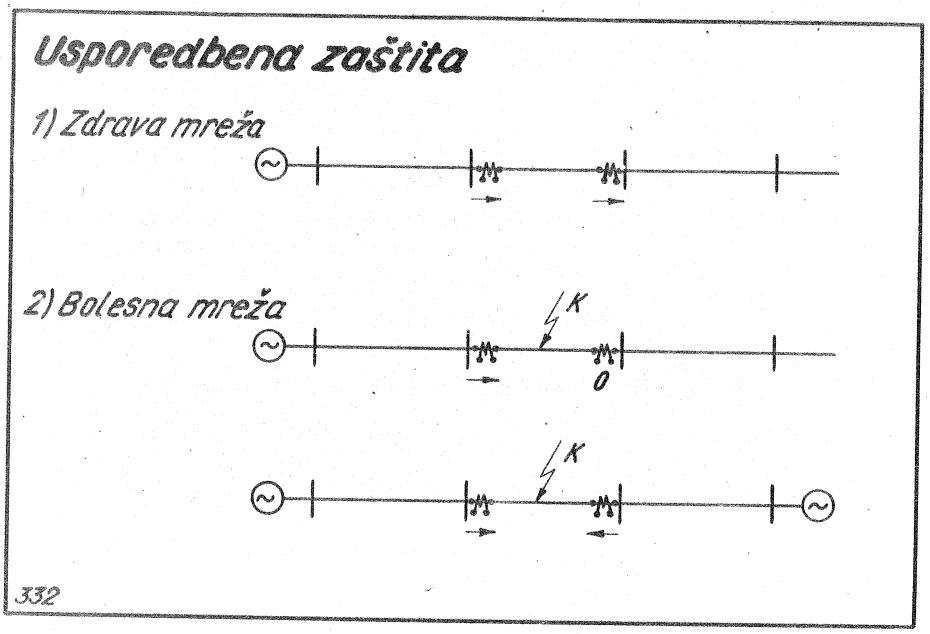
Zahtjev osjetljivosti ispunjen je dobro uz pretpostavku, da se primijeni podimpedantni poticaj, tamo gdje je to potrebno (mreže višeg napona).

Zahtjev selektivnosti takodjer je dobro ispunjen, jer se selektivnost može bez daljnjega postići za bilo kakvu konfiguraciju mreže.

Zahtjev brzine ispunjen je samo donekle, jer se dobar dio kratkih spojeva (više od trećine) eliminira tek u drugom vremenskom stepenu (vrijeme iskapčanja oko 1 sekunda), ukoliko se ne primijeni visoko-frekventno povezivanje releja.

Zahtjev rezerve takodjer je dobro ispunjen, te svaki relej predstavlja rezervu za sve one, koji su bliže kratkom spoju od njega.

28. USPOREDBA ZAŠTITA



Sl. 28.1

OPĆENITO O USPOREDBENOJ ZAŠTITI

Na slici 28.1 prikazan je princip usporedbene zaštite, koja se često naziva i diferencijalna zaštita. Zaštita radi na taj način, da mjeri neku električnu veličinu (npr. struju) na početku i na kraju istog odsjeka voda, te ih usporedjuje.

Kod zdrave mreže je mjerena električna veličina jednaka na početku i na kraju odsječka, i to po iznosu i po smjeru, tako da su obje mjerene veličine u ravnoteži. Dok ta ravnoteža postoji, zaštita neće djelovati.

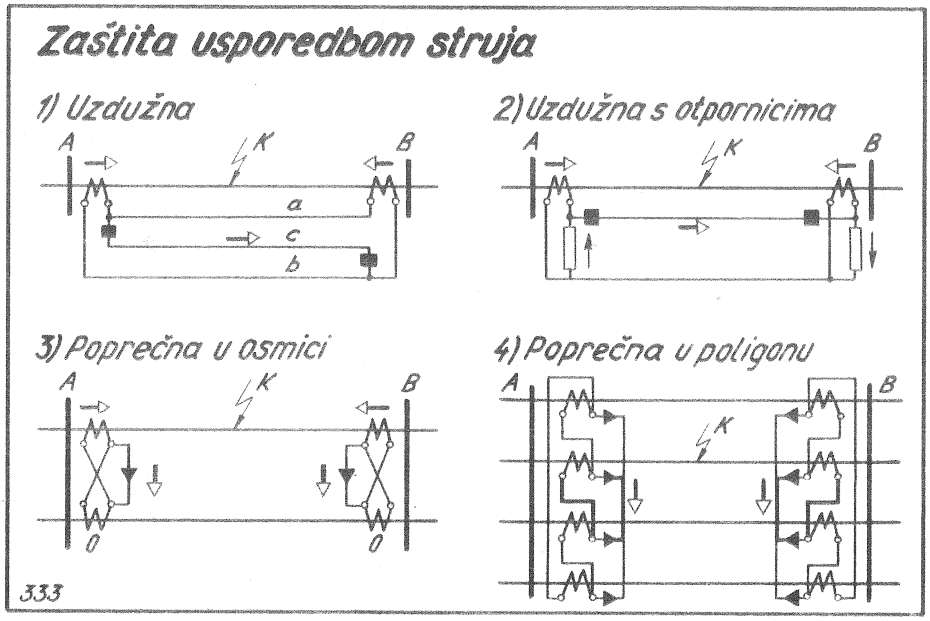
Kod bolesne mreže, ako nastane kratki spoj u štićenom odsječku, ta će ravnoteža biti poremećena. Ako je štićeni odsječak napajan samo s jedne strane, tu će biti izmjerena neka vrijednost mjerene električne veličine, ali će s druge strane njezina vrijednost biti jednaka nuli. Ako je štićeni odsječak napajan obostrano, mjerena električna veličina imat će neku vrijednost na oba kraja odsječka, ali će na svakom kraju biti suprotnog smjera. U oba slučaja ravnoteža će biti poremećena, a zaštita (usporedjujući mjerenu električnu veličinu na oba kraja) će to ustanoviti, te dati nalog obim sklopkama da se odsječak iskopča.

Kao što se vidi, kod usporedbene zaštite se može postići velika osjetljivost, jer relej samo treba da ustanovi neravnotežu. Selektivnost uopće ne čini nikakve poteškoće, jer ova zaštita ionako obuhvaća samo onaj odsjek, u kojem je postavljena. Ona niti ne osjeti, ako kvar nastane izvan štićenog odsjeka, pa uopće ne može doći do neselektivnog iskapčanja. Za postizanje selektivnosti nisu dakle potrebna nikakva dodatna sredstva (kao što je vremensko zatezanje kod nadstrujne i distantne zaštite). Ali zahtjevu rezerve ovdje uopće nije udovoljeno.

ZAŠTITA USPOREDBOM STRUJA

Načini, kako se može provesti zaštita usporedbom struja, prikazani su na slici 28.2.

1) Prvo je prikazana jednostavna uzdužna zaštita. Na početku i kraju voda mjeri se struja putem strujnih transformatora, koji su sekundarno spojeni pomoć-



Sl. 28.2

nim vodičima "a" i "b", tako da sačinjavaju zatvoreni strujni krug. Kod zdravog voda oba će strujna transformatora davati istu struju, koja će se bez poteškoća zatvarati kroz vodiče "a" i "b". Osim toga postoji i uzdužni spoj pomoću vodiča "c", u koji su na svakoj strani umetnuti releji osjetljivi na struju. Ali kod zdravog voda kroz vodič "c" ne teče nikakva struja.

Ako nastane kratki spoj u štićenom vodu, struje na oba kraja voda neće više biti u ravnoteži, pa se neće više moći zatvarati kroz vodiče "a" i "b". Jedan dio struje teći će i kroz vodič "c", na što će oni reagirati i dati sklopkama komandu za iskapčanje. Ovakva zaštita zahtijeva za uzdužnu vezu 3 vodiča razmjerno velikog presjeka (inače su strujni transformatori previše opterećeni), pa nije prikladna za iole duže vodove.

2) Kod uzdužne zaštite s otpornicima struja svakog strujnog transformatora se zatvara preko svog otpornika, u kojem zbog toga nastaje pad napona proporcionalan struji. Ta su dva otpornika spojena uzdužno s 2 pomoćna vodiča, u koje su umetnuti releji. Kod zdravog voda u oba otpornika nastanu jednaki padovi napona, koji u strujnom krugu s uzdužnim pomoćnim vodičima djeluju jedan protiv drugoga, pa kroz releje ne teče nikakva struja.

Kod bolesnog voda nestane ravnoteže izmedju padova napona, pa uslijed njihove razlike poteče struja kroz releje. Ovdje su potrebna samo 2 vodiča i to manjeg presjeka, ali je još uvijek potrebna uzdužna veza.

3) Kod poprečne zaštite uzdužna veza je izbjegnuta, ali se može upotrijebiti samo kod dva ili više paralelnih vodova jednake izvedbe. Kod poprečne zaštite u osmici radi se o zaštiti dvaju paralelnih vodova. U stanici "A" postavljeni su strujni transformatori u oba voda, te su medjusobno unakrsno spojeni (osmica), a izmedju njih je još priključen relej osjetljiv na struju i na smjer. Analogno je postupljeno i u stanici "B". Kad su oba voda zdrava, teći će u oba voda jednaka struja. U stanici "A" sekundarna struja transformatora zatvarat će se kroz unakrsni spoj i kroz relej neće teći nikakva struja (analogno u stanici "B").

Ako nastane kratki spoj u jednom vodu, poremetit će se ravnoteža struja u strujnim transformatorima stanice A, pa će dio struje teći i kroz relej. Već prema tome, koji vod je u kvaru, struja će kroz relej teći u jednom ili drugom smjeru, pa će relej prema tome dati nalog za iskapčanje odnosnoj sklopki (analogno u stanici "B").

4) Poprečna zaštita u poligonu upotrebljava se kod tri ili više paralelnih vodova jednake izvedbe. U stanici "A" (u stanici "B" sve je analogno stanici "A") postavljeni su strujni transformatori u svaki vod i medjusobno spojeni u

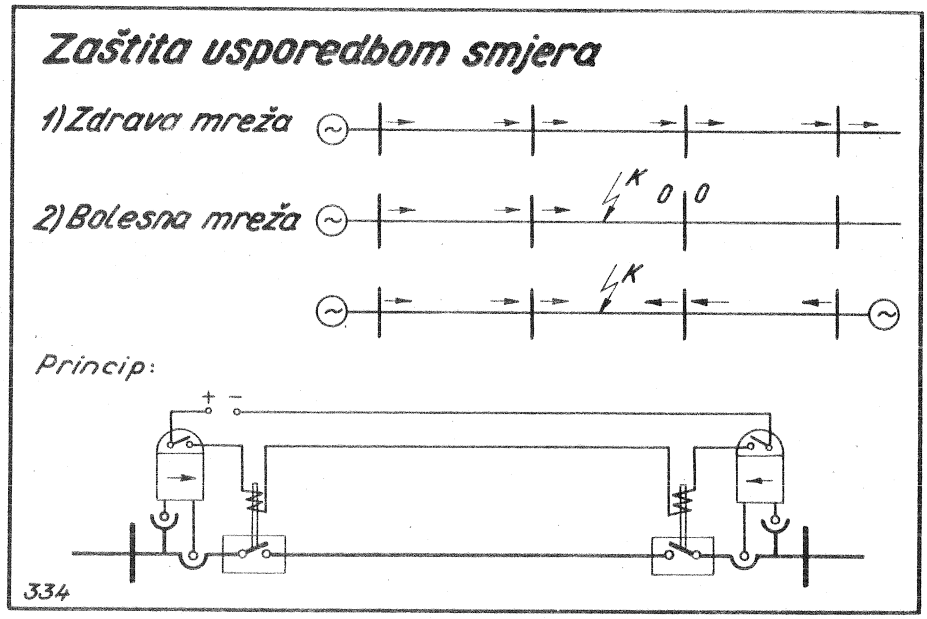
poligon. Na svaki od njih priključen je relej, osjetljiv na struju i smjer, te su svi releji na drugoj strani spojeni u zajedničko zvjezdište. Kod zdravih vodova teći će u svim strujnim transformatorima ista struja, koja će se zatvarati kroz poligon, pa kroz nijedan relej neće teći struja.

Ako je jedan vod u kvaru, struja u tom vodu će biti veća i neće se moći zatvarati kroz ostale strujne transformatore, nego će dio struje teći kroz strujni krug, koji je na slici podebljan, i to u prikazanom smjeru. Struja će u stvari teći kroz dva releja, ali treba da reagira samo onaj kod kojeg struja teče od strujnog transformatora prema zvjezdištu, što se postiže usmjernim članom i tako komandu za iskapčanje dobije samo sklopka bolesnog voda.

ZAŠTITA USPOREDBOM SMJERA

Kod ove zaštite se usporedjuje samo smjer električne energije na oba kraja štićenog voda a ne iznos neke električne veličine. Princip rada prikazan je na slici 28.3. Kod zdravog voda smjer energije je isti na oba kraja voda. Kod bolesnog voda energija teče prema kratkom spoju, pa su smjerovi suprotni ili na jednom kraju uopće nema toka energije, i to je onda kriterij za iskapčanje.

Kako se to u principu provodi prikazano je na istoj slici. Na svakom kraju voda postoje releji osjetljivi na smjer, koji će u slučaju da je smjer energije od sabirnica prema vani držati svoj komandni kontakt zatvoren, a u protivnom će se taj kontakt otvoriti. Kontakti obaju releja spojeni su u jedan strujni krug u seriju sa elektromagnetima za iskapčanje sklopaka i priključeni na pomoćni izvor struje. Tako kad se oba kontakta zatvore, bit će vod iskopčan na obje strane.



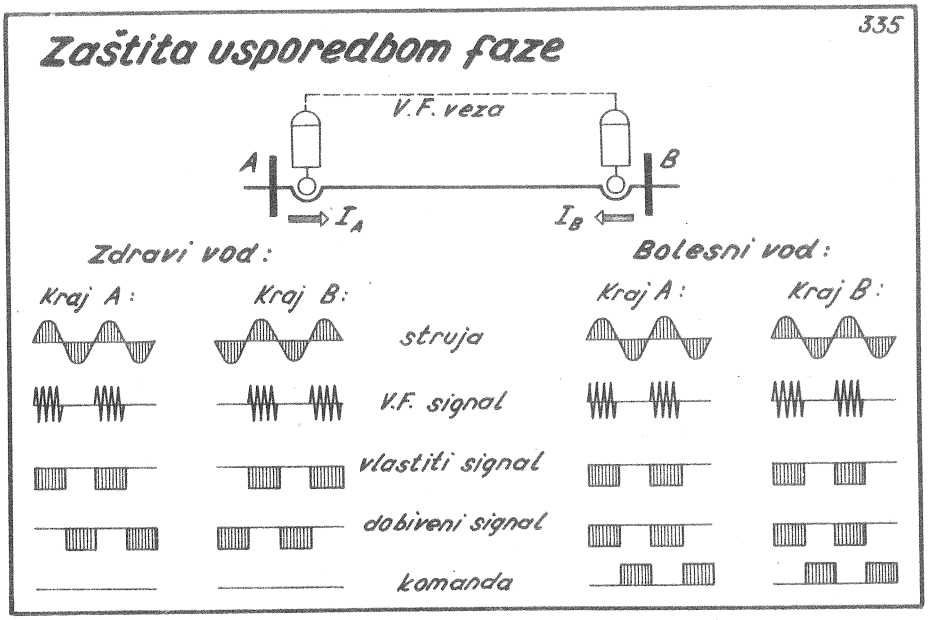
Sl. 28.3

Prednost je ove zaštite, što se putem pomoćnih vodiča ne prenosi nikakva električna veličina nego samo signal za iskapčanje, pa uzdužna veza može biti jednostavno izvedena. Mogu se u tu svrhu upotrijebiti i iznajmljeni poštanski vodovi ili visokofrekventna veza.

ZAŠTITA USPOREDBOM FAZE

Princip zaštite usporedbom faze prikazan je na slici 28.4. Na oba kraja štićenog voda mjeri se samo struja, pa tako nisu potrebni naponski mjerni transformatori, ali se u stvari ne mjeri efektivna vrijednost struje nego njezina momentalna vrijednost. Pri tome se kao pozitivni smjer struje uzima smjer od sabirnica prema vodu. Releji na oba kraja voda povezani su medjusobno visokofrekventnom vezom. Svaki relej šalje drugoj strani voda visokofrekventni signal za vrijeme trajanja pozitivne poluperiode struje, pa se taj signal usporedjuje s analognim lokalnim signalom.

Na lijevoj strani slike prikazane su prilike kod zdravog voda. Prikazani su oscilogrami struja na oba kraja, te visokofrekventni signal, koji svaki relej šalje na drugu stranu voda. Nadalje je prikazan signal proizveden lokalno, koji traje za vrijeme pozitivne poluperiode, te signal dobiven ispravljanjem dobivenog visokofrekventnog signala. Ta dva signala zajedno uzimlju se kao kriterij za blokiranje komande, koju bi relej dao sklopki radi iskapčanja. Kod zdravog voda se vremenski izmjenjuju lokalni i preneseni signal, tako da blokiranje neprekidno traje i nema komande za iskapčanje.



Sl. 28.4

Na desnoj strani slike su na analogni način prikazane prilike kod bolesnog voda, tj. kod voda u kojemu se nalazi kvar. Ovdje nastaje međusobni pomak faznog kuta struja za 180°, pa konačno lokalni i preneseni signal padaju istodobno. Blokiranje komande za iskapčanje nije više neprekinuto, nego ta komanda u odredjenim vremenskim intervalima postoji, pa tako dodje do iskapčanja sklopaka.

OSEBINE USPOREDBENE ZAŠTITE

Na slici 28.5 dan je pregled osebina usporedbene zaštite, prema onome što je o njoj bilo rečeno.

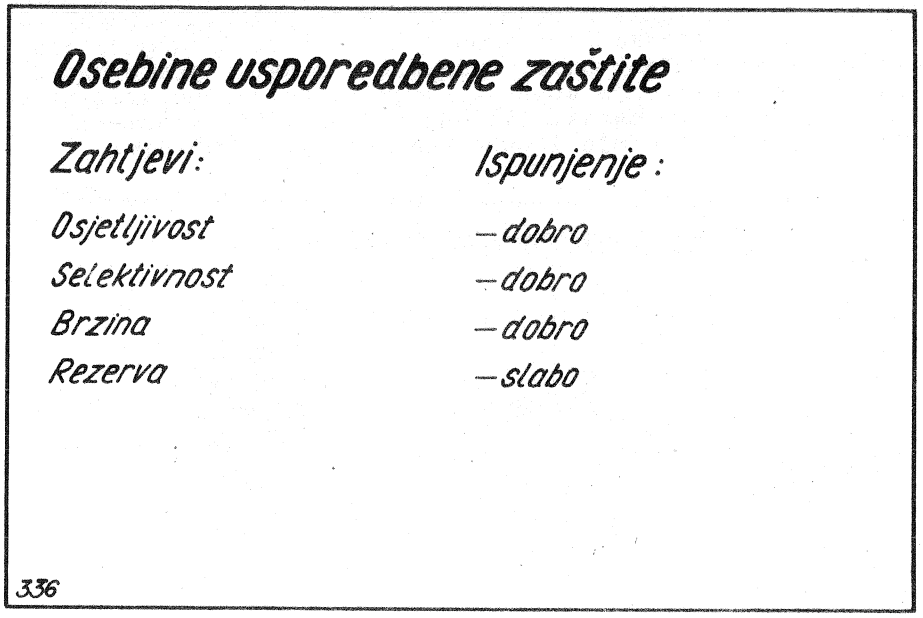
Zahtjev osjetljivosti ispunjen je dobro, dapače bolje nego kod ostalih zaštita, jer se ne radi o mjerenju električnih veličina, nego samo o utvrdjivanju da električna veličina uopće ima neku vrijednost.

Selektivnost je dobro ispunjena i opet bolje nego inače, jer uopće ne može doći do neselektivnog iskapčanja, budući da je zaštita potpuno neosjetljiva prema kvarovima izvan štićenog odsječka.

Zahtjev brzine je i opet vrlo dobro ispunjen, jer uopće nema nikakvog vremenskog zatezanja, a sama konstrukcija omogućuje vrlo brzi rad releja.

Jedino zahtjev rezerve nije uopće ispunjen, pa treba postavljati posebne releje (obično nadstrujne) za rezervno djelovanje.

Isto tako sabirnice postrojenja ovdje nisu obuhvaćene zaštitom (dok kod nadstrujne i distantne zaštite jesu) pa treba postavljati još i posebnu zaštitu za sabirnice.



Sl. 28.5

29. ZAKLJUČNO O RELEJNOJ ZAŠTITI

USPOREDBA RAZNIH VRSTA ZAŠTITE

Na slici 29.1 dana je tabela, gdje je za pojedine vrste zaštite označeno, kako ispunjavaju postavljene zahtjeve, te koje su im aparature potrebne. Tamo, gdje je zahtjev ispunjen, stavljen je znak (+), tamo gdje nije ispunjen znak minus (-), a tamo gdje je donekle ispunjen nula (0). Ako je navedena aparatura potrebna, upisano je "da" a inače "ne".

Sve vrste zaštite ispunjavaju zahtjev osjetljivosti za mreže do uključivo 3o kV, pa to nije niti uneseno u tabelu, nego samo za mreže iznad 3o kV, gdje taj zahtjev ne ispunjavaju nadstrujna zaštita i distantna s nadstrujnim poticajem.

Zahtjev selektivnosti ispunjavaju sve vrste zaštite kod jednostrukih vodova s jednostranim napajanjem, pa to nije ni unešeno u tabelu. Kod dvostrukog napajanja taj zahtjev ne ispunjava nadstrujna zaštita bez usmjernog člana, a kod višestrukog napajanja niti nadstrujna zaštita sa usmjernim članom.

Zahtjev brzine, kako se zahtijeva kod mreža za prijenos električne energije, nije ispunjen kod nadstrujne zaštite, a samo donekle je ispunjen kod obične distantne zaštite koja nije "brza" tj. koja nema medjusobnu vezu releja.

Zahtjev rezerve, u što je obuhvaćena i zaštita sabirnica, nije ispunjen kod usporedbene zaštite.

Strujne transformatore trebaju sve zaštite, pa to nije uneseno u tabelu. Naponske transformatore trebaju sve zaštite, koje imaju usmjerne članove.

Uzdužnu vezu s fizičkim vodičima treba zaštita usporedbom struja i to samo uzdužna, dok uzdužnu vezu koja može biti provedena visokofrekventnim kanalom treba brza distantna zaštita, te zaštita usporedbom smjera i zaštita usporedbom faze.

Usporedba raznih vrsta zaštite 337

	Vrsta zaštite	Osjet. >30kV	Selektivnost dvostr.	Selektivnost višest.	Brzina	Rezer.	Nap. trf.	Uzd. veza	V.F. veza
Nadstr.	Bez smjera	–	–	–	–	+	ne	ne	ne
	Sa smjerom	–	+	–	–	+	da	ne	ne
Distantna	>I poticaj	–	+	+	0	+	da	ne	ne
	<Z poticaj	+	+	+	0	+	da	ne	ne
	<Z, brza	+	+	+	+	+	da	ne	da
Usporedbena	Struja uzd.	+	+	+	+	–	ne	da	ne
	Struja popr.	+	+	+	+	–	da	ne	ne
	Smjer	+	+	+	+	–	da	ne	da
	Faza	+	+	+	+	–	ne	ne	da

Sl. 29.1

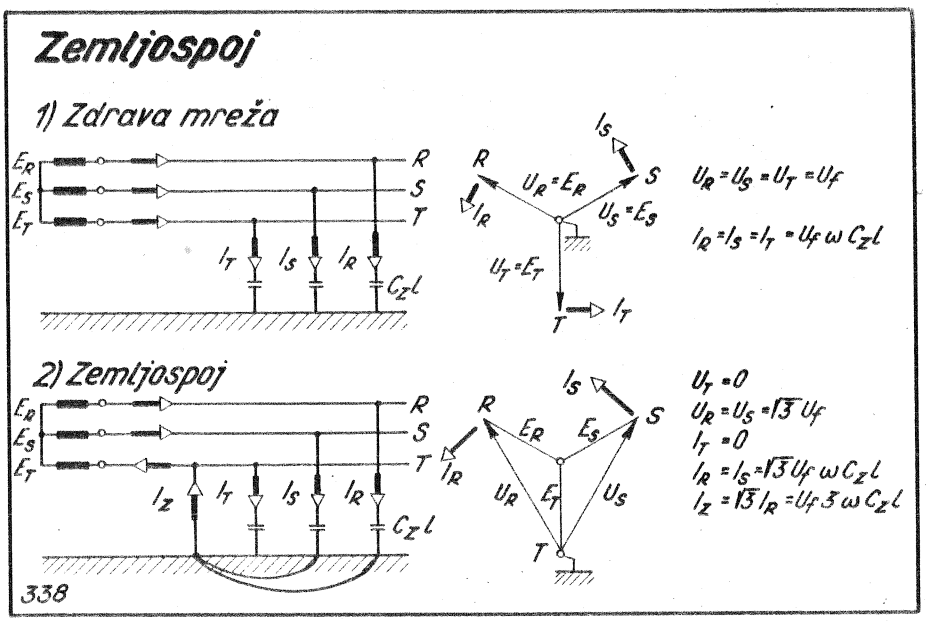
3o. ZEMLJOSPOJ

PRILIKE KOD ZEMLJOSPOJA

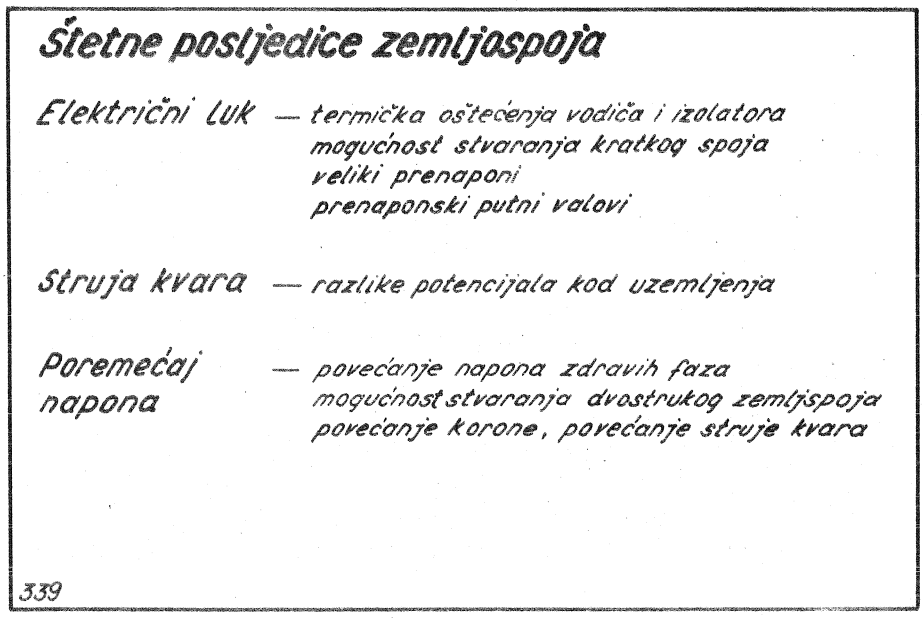
Prilike u mreži s izoliranim zvjezdištem, koje su u vezi sa zemljospojem, prikazane su na slici 3o.1. Kod promatranja zemljospoja važna je veza voda i zemlje, a nju sačinjavaju uglavnom dozemni kapaciteti, pa kao prvo približenje možemo samo njih uzeti u račun. To znači da zanemarujemo djelatni otpor, induktivitet i odvod, pa čak i medjusobne kapacitete vodova, te u potpunosti i uzdužne i poprečne grane generatora i transformatora. Nakon toga možemo dozemni kapacitet svake faze koncentrirati u jedan kapacitet.

1) Na skici 1 prikazane su prilike kod zdrave mreže. Jedinu vezu sa zemljom čine dozemni kapaciteti, koji stvaraju simetrično opterećenje u sve tri faze. Kapaciteti su u stvari spojeni u zvijezdu i njihovo zvjezdište jest zemlja. Zbog simetričnosti opterećenja zvjezdište kapaciteta i zvjezdište mreže imaju isti potencijal. To znači, da kod zdrave mreže zvjezdište sistema ima potencijal zemlje, kako je to naznačeno na vektorskoj skici. Odatle slijedi da svaki fazni vodič ima prema zemlji napon jednak faznom naponu "U_f". Zbog tih napona u svakom dozemnom kapacitetu teku jednake struje, koje svom naponu prethode za 9o°. Suma tih struja jednaka je nuli i kroz zemlju ne teče nikakva struja.

2) Na skici 2 prikazane su prilike za slučaj zemljospoja, tj. kad dodje do direktnog spoja jedne faze (u ovom primjeru faze "T") sa zemljom. Radi jednostavnosti zanemarit ćemo otpor zemlje, a isto tako i eventualni otpor samog zemljospoja. Sada bolesna faza nema nikakav napon prema zemlji, ali slika narinutih elektromotornih sila ostaje nepromijenjena, pa zato zdrave faze dobiju linijski napon prema zemlji. U vektorskoj slici napona potencijal zemlje premjestio se iz zvjezdišta mreže na vrh vektora elektromotorne sile u fazi "T". Struje u dozemnom kapacitetu bolesne faze nema (jer nema napona), ali su struje u kapacitetima zdravih faza dane linijskim naponom. Te struje teku kroz zemlju i zatvaraju se kroz mjesto zemljospoja. To je tzv. struja zemljospoja i ona je jednaka vektorskoj sumi struja iz zdravih faza. Na mjestu kvara, dakle, teče kapacitivna struja koja je jednaka umnošku faznog napona i kapacitivne susceptancije dozemnih kapaciteta svih triju faznih vodiča.



Sl. 3o.1



Sl. 3o.2

ŠTETNE POSLJEDICE ZEMLJOSPOJA

Na slici 3o.2 prikazane su pregledno štetne posljedice zemljospoja. Najgora štetna posljedica jest termičko opterećenje vodiča i izolatora uslijed električnog luka na mjestu kvara. Zbog toga treba električni luk zemljospoja čim prije eliminirati, inače će doći do težih oštećenja i ispada iz pogona. Električni luk se nadalje može proširiti (npr. uslijed vjetra) i do ostalih faza pa tako nastane kratki spoj (ovo se uvijek dogadja kod trožilnih kabela).

Električni luk se u svakoj poluperiodi pali i gasi. To može dovesti do velikih prenapona uslijed naboja, koji se gomilaju u kapacitetima, a nastaju i putni valovi, koji dovode prenapone do transformatorskih stanica.

Struja kvara obično nije tako velika da bi dovodila do oštećenja u postrojenjima kroz koja teče, ali može stvoriti znatne potencijalne razlike na mjestu, gdje odlazi u zemlju.

Uslijed poremećaja naponskih prilika dolazi do povećanja napona zdravih faza na vrijednost linijskog napona. Ako zemljospoj duže traje (a to može kod direktnog zemljospoja bez električnog luka), ovo predstavlja znatno naprezanje izolacije svih dijelova mreže (transformatori, kabeli, vodovi), koji su galvanski povezani. Zbog povećanja napona zdravih faza može mnogo lakše doći do zemljospoja na jednoj od tih faza, pa tako dobijemo dvostruki zemljospoj, a to je u stvari dvopolni kratki spoj preko zemlje. Konačno uslijed povišenja napona zdravih faza može doći do znatnog povećanja korone, a s time i do povećanja struje zemljospoja (jer se poveća kapacitet zbog vodljivog sloja oko vodiča).

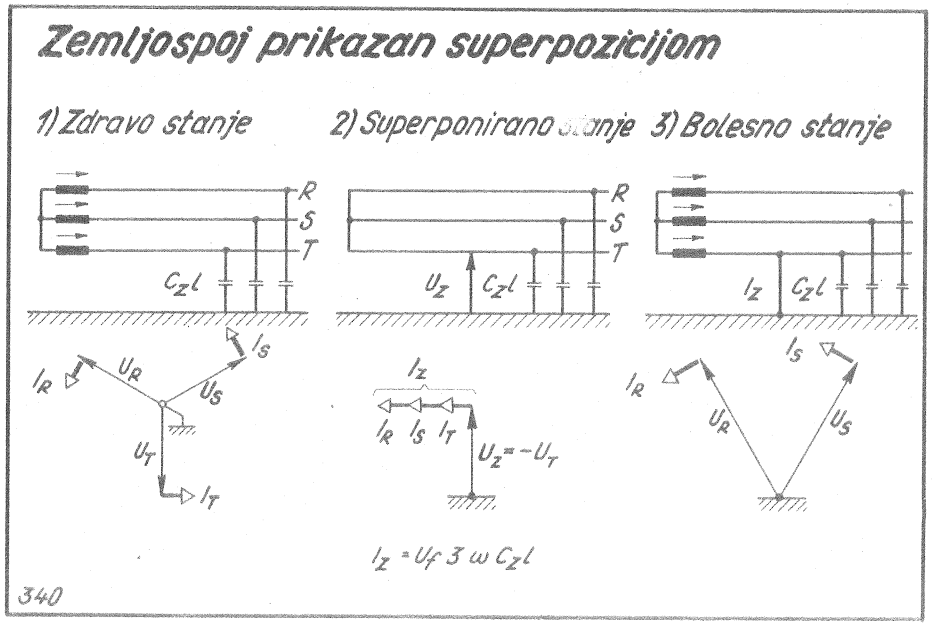
Treba napomenuti, da navedene štetne posljedice nastaju kod prilika, koje opravdavaju grubu pretpostavku o zanemarenju svega osim dozemnih kapaciteta. Kod većih dužina vodova i razgranatih mreža, medjutim, može uslijed kapacitivnih struja u reaktancijama vodova doći do znatnog povišenja napona, a uslijed toga opet do povećanja struja, tako da struje i naponi mogu poprimiti znatno veće vrijednosti od prije utvrdjenih, sa svim štetnim posljedicama koje iz toga slijede.

ZEMLJOSPOJ PRIKAZAN SUPERPOZICIJOM

Struje i napone u bolesnoj mreži za vrijeme zemljospoja možemo zamisliti kao rezultat dvaju superponiranih stanja, i to stanja zdrave mreže i superponiranog stanja, koje donosi postojanje zemljospoja, slika 3o.3. Kako na mjestu zemljospoja kod zdrave mreže nema nikakve struje, to je struja na mjestu zemljospoja u superponiranom stanju jednaka stvarnoj struji zemljospoja u bolesnom stanju.

Kako nas prvenstveno zanimaju prilike u vezi sa strujom, to ćemo dobiti pravilni rezultat uz jednostavniju sliku, ako promatramo samo superponirano stanje. Lako je uvidjeti, da za superponirano stanje moramo ukinuti sve elektromotorne sile i na mjestu zemljospoja dodati napon jednak i suprotan naponu, koji je tu postojao prije zemljospoja (vidimo da superponirano stanje u stvari predstavlja primjenu Théveninova teorema). Drugim riječima, treba uzeti samo pasivni dio mreže i podići sve na fazni napon iznad zemlje, i to tako da na mjestu kvara mrežu podupremo faznim naponom.

Lako je uvidjeti da superpozicija zdravog i superponiranog stanja daje bolesno stanje. Svakom naponu zdravog stanja treba dodati napon superponiranog stanja, pa se za napon faze "T" dobije nula, a za napone faza "R" i "S" linijski naponi. Svakoj struji kroz kapacitete kod zdravog stanja treba dodati struje u kapacitetima kod superponiranog stanja, koje su sve jednake po iznosu i po fazi. Tako se za struju faze "T" dobije nula, a za struje faza "R" i "S" dobije se $\sqrt{3}$ puta veća vrijednost.



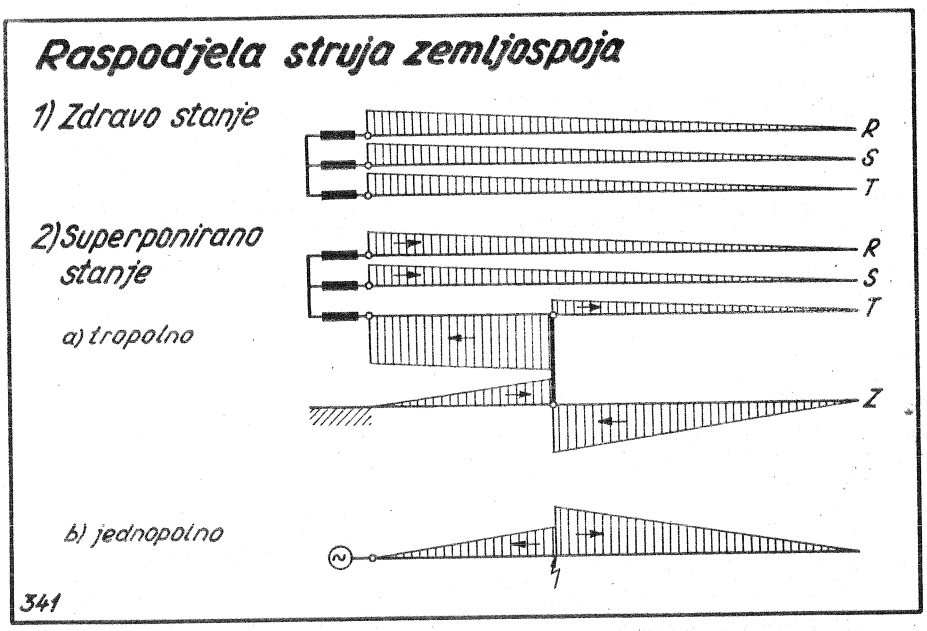
Sl. 3o.3

Struju zemljospoja vrlo je lako odrediti iz superponiranog stanja, jer napon "U_z" tjera struju kroz sve dozemne kapacitete spojene paralelno. Ako se radi o jednom vodu, treba uzeti u račun dozemne kapacitete svih triju faza (a kapacitet jedne faze jednak je umnošku jediničnog dozemnog kapaciteta i duži-ne voda). Ako se radi o mreži treba uzeti sumu dozemnih kapaciteta svih faznih vodiča svih galvanskih povezanih vodova, jer pomak napona nastane u čitavoj galvanski povezanoj mreži, ali se ne proteže kroz dvonamotne transformatore. Pomak napona jednak je iznosu faznog napona na mjestu zemljospoja. Struja zem-ljospoja ima, dakako, istu vrijednost, bez obzira na kojem mjestu u nekoj od-redjenoj mreži nastane zemljospoj.

RASPODJELA STRUJA ZEMLJOSPOJA

Dosada smo promatrali prilike u mreži, kojoj smo radi jednostavnosti koncentrirali dozemne kapacitete. U stvari su dozemni kapaciteti jednoliko ras-podijeljeni duž vodova, pa su prilike drukčije. To je prikazano na slici 3o.4.

Na skici 1 prikazano je zdravo stanje. U svakom faznom vodiču teku struje, koje su po iznosu medjusobno jednake, ali su pomaknute u fazi za 12o°. Na početku voda svaka struja ima iznos, koji odgovara ukupnom dozemnom kapa-citetu faze za čitavu dužinu voda, i taj se iznos postepeno smanjuje, te je na kraju jednak nuli. Kao što se vidi, raspodjela struja je takva, da izvor stru-je napaja kapacitivno opterećenje raspodijeljeno duž voda. Ovdje je radi jed-nostavnosti dan primjer samo jednog voda. Ako se radi o složenoj mreži, raspo-djela struja će biti takva, kakva odgovara konfiguraciji mreže, s tim da svi izvori napajaju dozemne kapacitete rasporedjene duž vodova.



Sl. 3o.4

Superponirano stanje, skica 2, prikazano je najprije tropolno, (a), s time da je zemljospoj u fazi "T" negdje prema sredini voda. Ako se podjetimo prijašnje slike, onda ćemo raspodjelu struja dobiti, ako uzmemo da ih tjera napon narinut na mjestu kvara. U fazi "T" desno od zemljospoja teći će struja, koja odgovara ukupnom kapacitetu desno od kvara pa do kraja voda. Ta će stru-ja postepeno duž voda padati do nule.

U zdravim fazama svi se kapaciteti napajaju strujom, koja dolazi s li-jeve strane (smjer struje od lijeva udesno crtan je kao pozitivan), tako da na početku svake faze imamo punu struju, po iznosu jednaku onoj u zdravom sta-nju, i ta struja postepeno duž voda pada na nulu. Desno od mjesta zemljospoja dijagram raspodjele struje na slici izgleda isto kao i kod zdravog stanja. U stvari prilike nisu iste, jer su ovdje sve tri struje medjusobno u fazi.

Struja za faze "R" i "S" dolazi iz faze "T", tako da na početku faze "T" imamo struju, koja je jednaka sumi struja u fazama "R" i "S". Samo što u fazi "T" struja teče ulijevo, pa je crtana s negativnim predznakom. Idući fazom

"T" udesno toj se struji dodaje još ona, koja odlazi u dozemne kapacitete, tako da iznos struje postepeno raste sve do mjesta zemljospoja.

Na istoj skici prikazana je i raspodjela struje u zemlji. Desno od zemljospoja skuplja se sva struja iz kapaciteta svih triju faza i teče ulijevo od mjesta zemljospoja. Lijevo od mjesta zemljospoja skuplja se takodjer sva struja iz dozemnih kapaciteta svih triju faza i teče udesno do mjesta zemljospoja.

Obično se, medjutim, raspodjela struja prikazuje jednopolno, (b) tako da se prikazuje suma struja u svim fazama. Pri jednopolnom prikazivanju često se kod crtanja ne vodi briga o predznaku struje, nego se to nadomještava strelicom, koja pokazuje njezin smjer (tako je učinjeno i na našoj slici). Takav prikaz raspodjele struje vrijedi ujedno i za struju kroz zemlju.

Kao što se vidi, raspodjela struja je takva, kao da je na mjestu zemljospoja smješten jednofazni izvor, koji napaja jednolično raspoređeni teret duž voda. Kod složene mreže struja se raspodijeli prema konfiguraciji mreže, ali i opet tako kao da imamo jedan jedini izvor u mjestu zemljospoja.

Treba naglasiti, da na ovaj način prikazujemo samo superponirano stanje, dakle ne struje koje stvarno teku u mreži, nego samo struje, koje sa sobom donosi zemljospoj. (Npr. u fazi "T" desno od zemljospoja stvarno ne teče nikakva struja, jer je napon te faze jednak nuli. Struje na tom mjestu prikazane za zdravo i za superponirano stanje su jednake po iznosu a suprotnog predznaka pa se poništavaju). No struje superponiranog stanja su istofazne u sve tri faze, pa ih možemo mjeriti, ako mjerimo sumu struja u svim fazama. Pri tome se struje zdrave mreže poništavaju, a ostaje ono što je prikazano na skici 2b.

ODREDJIVANJE STRUJE ZEMLJOSPOJA

Na slici 3o.5 prikazani su postupci za odredjivanje struje zemljospoja.

1) Najtačnije možemo odrediti struju zemljospoja mjerenjem u mreži, što se može provesti tako, da se neki manje važni odvojak isključi iz pogona, u njemu načini direktni zemljospoj i postave instrumenti za mjerenje. Na to se taj odvojak pomoću njegove sklopke ukopča i nakon očitanja instrumenta odmah [illegible]opča.

2) Drugi je način računom prema prije izvedenoj formuli. Ukupni dozemni kapacitet mreže treba računati tako, da se posebno računa za svaki vod i kabel njegov dozemni kapacitet, te množi s njegovom dužinom, i onda sve skupa sumira. Kod proračuna kapaciteta treba kod dvostrukih vodova na istim stupovima, ako je jedan trojka iskopčana, voditi računa o njezinu utjecaju na trojku u pogonu. Iskopčana trojka može povećati dozemni kapacitet trojke u pogonu i za 2o%, a ako je iskopčana trojka uzemljena onda i za 3o%. To sve dakako zah-

Odredivanje struje zemljospoja

1) Mjerenjem u stvarnoj mreži

2) Računom

$I_Z = U_f \cdot 3\omega \Sigma C_Z l$, L = dužina jednostr. vodova

3) Približno

a) nadzemni vodovi: $C_Z = (4{,}5 \text{ do } 5{,}5)\cdot 10^{-9}$ F/km, uzmimo $C_Z \cong 5{,}5\cdot 10^{-9}$ F/km

$$I_Z = U_f \omega C_Z l_{vodiča} = \frac{10^3 U_{lin.[kV]}}{\sqrt{3}} \cdot 314 \cdot 5{,}5 \cdot 10^{-9} \cdot l_{vodiča}$$

$$I_Z [A] \cong U_{lin.}[kV] \frac{l_{vodiča}[km]}{1000}$$

b) kabeli

Iz podataka tvornice, na pr: kabel 60 kV, 240 mm² → I_Z = 6,3 A/km

342

Sl. 3o.5

tijeva dugotrajan posao, a pitanje je, je li tolika tačnost i potrebna, budući da je formula izvedena uz gruba zanemarenja.

3) Za sasvim grubo odredjivanje struje zemljospoja izvedena je u tački 3 formula uz pretpostavku, da za dozemni kapacitet nadzemnih vodova uzmemo najveću vrijednost, koja se praktički pojavljuje. Iz izvedene formule se vidi, da svakih 1ooo km vodiča (ne voda!) daju struju zemljospoja u amperima, koliko iznosi linijski napon voda u kilovoltima.

Kod kabela obično raspolažemo podacima tvornice o veličini struje zemljospoja po kilometru dužine pa možemo s tim računati. Neka približna formula, analognu onoj za nadzemne vodove, ne može se dati, jer dozemni kapacitet kabela u znatnoj mjeri ovisi o naponu i presjeku vodiča.

31. ZAŠTITA OD ZEMLJOSPOJA

ZAŠTITA OD ZEMLJOSPOJA

Zaštita od zemljospoja može se izvesti na razne načine, koji su prikazani na slici 31.1.

1) Odvajanjem mreža, tako se smanji dužina galvansko povezanih vodova, smanjuje se iznos struje zemljospoja i sužuje područje, gdje nastaje poremećaj napona.

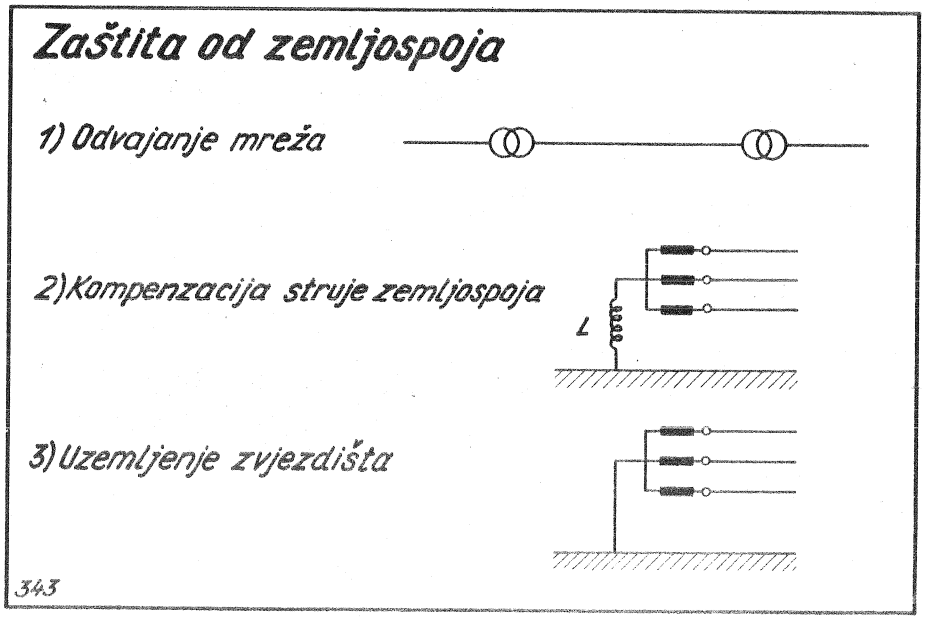
2) Kompenzacijom struje zemljospoja, koja se sastoji u tome, da se kapacitivnoj struji zemljospoja doda induktivna struja koja je kompenzira, pa se tako struja na mjestu kvara svede na minimum.

3) Uzemljenjem zvjezdišta zemljospoj se pretvara u kratki spoj, pa će relejna zaštita taj vod iskopčati.

O pojedinim načinima zaštite bit će potanje govora u daljnjem.

ODVAJANJE MREŽA

Ako su pojedini dijelovi mreže galvanski odvojeni (slika 31.2), onda se zemljospoj ograničuje samo na onaj dio u kojem je nastao. U dijelovima mreže, koji su galvanski odvojeni nema nikakvih posljedica. Naponski poremećaj, tj. povišenje napona zdravih faza, ograničen je samo na bolesni dio mreže. Ali i struja zemljospoja se time smanjuje, jer u račun ulaze samo one dužine vodova, koje su galvanski povezane. S time se ublažuju (iako ne otklanjaju) štetne posljedice zemljospoja s trajnim uzrokom, pa eventualno nije ni potrebno prekida-



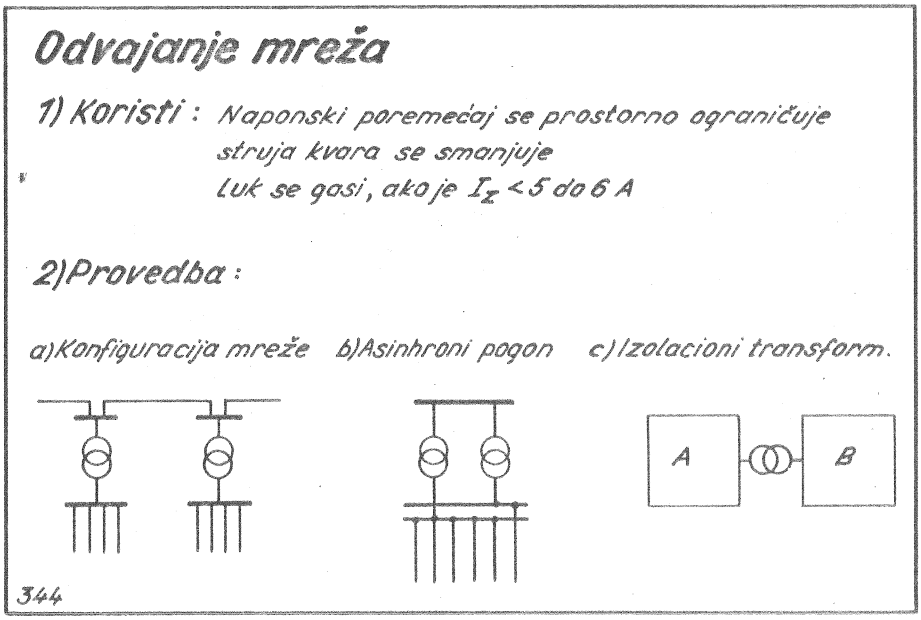
Sl. 31.1

ti pogon do prve zgodne prilike. Ako su pak odvojeni dijelovi mreže tako maleni, da struja zemljospoja bude manja od nekih 5-6 A, onda se električni luk neće moći održati, nego će se ugasiti, pa će time i kvar biti u potpunosti eliminiran.

Ovaj način zaštite sam po sebi dolazi u upotrebu kod mreža manjeg napona. Npr. 1o kV-mreža nadzemnih vodova neće normalno doseći ukupnu dužinu vodova od 15o km, što bi dalo struju zemljospoja ispod 5 A. Zbog toga se često takve mreže bez daljnjega ostavljaju u pogonu s izoliranim zvjezdištem. Ali npr. kod 11o kV mreže već dužina od 15 km daje struju zemljospoja od 5 A, tako da ovim načinom ne možemo postići gašenje luka.

Odvajanje mreža može se postići na razne načine, i to:

a) samom konfiguracijom mreže odvojeni su dijelovi s raznim naponskim nivoima, jer se izmedju njih nalaze transformatori s odvojenim namotima. Tako se zemljospoj iz mreže jednog napona ne prenosi u mrežu drugog napona (to bi bio jedino slučaj, ako su upotrijebljeni štedni transformatori, što i govori protiv njihove upotrebe za povezivanje mreža, koje se znatno razlikuju u naponu, ako nemamo direktno uzemljenje zvjezdišta). Osim toga pojedini dijelovi mreže istog napona mogu se odvojeno napajati iz različitih transformatorskih stanica, pa se time zemljospoj ograničava samo na taj dio mreže.



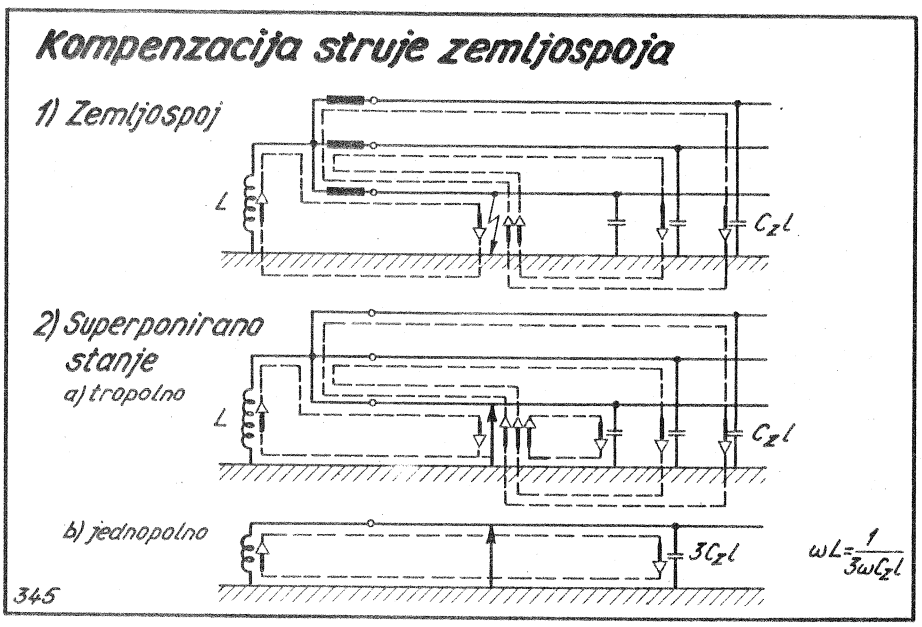
Sl. 31.2

b) asinhroni pogon se može provesti izmedju dva dijela mreže koristeći npr. dvostruke sabirnice neke stanice, pa se time dobiju dva odvojena dijela mreže. Ovo se rijetko koristi za normalni pogon, nego eventualno samo za odvajanje voda u zemljospoju, ako želimo da ga i dalje zadržimo u pogonu.

c) izolacioni transformatori se mogu upotrijebiti za medjusobno razdvajanje dvaju dijelova mreže istog napona, da se zemljospoj ograniči samo na jedan dio. Ovo dolazi u obzir kod povezivanja velikih mreža, npr. mreža dviju različitih država kao dodatna mjera osim kompenzacije struje zemljospoja. Ipak se zbog loših strana (investicija, povećanje impedancije medjuveze) rijetko upotrebljava.

KOMPENZACIJA STRUJE ZEMLJOSPOJA

Osnovna ideja ovog načina zaštite od zemljospoja jest, da se dozemni kapaciteti kompenziraju prigušnicama, čija je ukupna reaktancija brojčano jednaka reaktanciji svih dozemnih kapaciteta mreže. Pri tome prigušnice ne moraju biti rasporedjene duž vodova kao dozemni kapaciteti, pa čak niti u pojedinim fazama, nego reaktanciju prigušnica možemo koncentrirati i priključiti na zvjezdište mreže (na jednom ili više mjesta). Takvu prigušnicu nazivamo petersenkom, a bilo je i drugih izvedaba, koje se više ne upotrebljavaju, slika 31.3.



Sl. 31.3

1) Kod zemljospoja zvjezdište dobiva fazni napon prema zemlji, pa kroz prigušnicu teče induktivna struja u zemlju, koja se zatvara kroz mjesto zemljospoja. Tako na mjestu kvara teku kapacitivna i induktivna struja istog iznosa, pa se poništavaju. Na mjestu zemljospoja ne teče više struja, te se dozemni kapaciteti napajaju iz petersenki kao iz izvora.

2) To se još bolje vidi, ako se promatra samo superponirano stanje. Na slici je to najprije prikazano tropolno, a zatim i jednopolno. Kod jednopolnog prikaza postavljen je i uslov za dimenzioniranje petersenki, a struja na mjestu kvara uopće nije ni nacrtana. Kapaciteti se napajaju iz petersenke.

Budući da na mjestu kvara ne teče nikakva struja uzrokovana naponom, to će se eventualno nastali luk uslijed prolaznog uzroka (npr. atmosferski prenaponi) odmah ugasiti i kvar nestati. Smetnja se eliminira električnim putem. Ako je medjutim uzrok kvara trajan, zemljospoj će ostati, ali bez štetnih posljedica, koju bi proizvela struja na mjestu kvara, tako da ostaje samo poremećaj naponskih prilika. Nije potrebno da se bolesni vod iskopča, nego se može bez prekida nastaviti pogon do povoljne prilike za popravak, riskirajući štetne posljedice uslijed povišenja napona. Eventualno se može bolesni vod odvojiti u asinhroni pogon.

PREOSTALA STRUJA ZEMLJOSPOJA

Na mjestu zemljospoja u stvari ipak teče neka struja, koju zovemo preostala struja zemljospoja.

1) Na slici 31.4 su dane komponente te struje, a to su:

a) jalova komponenta, koja nastaje uslijed razlike kapacitivne struje u dozemnim kapacitetima i induktivne struje u petersenkama. Dozemni kapacitet se u pogonu neprekidno mijenja uslijed promjene visine vodiča, te uslijed ukapčanja i iskapčanja vodova, pa se petersenke ne mogu tačno udesiti, pogotovu ako se reguliraju samo u stepenima.

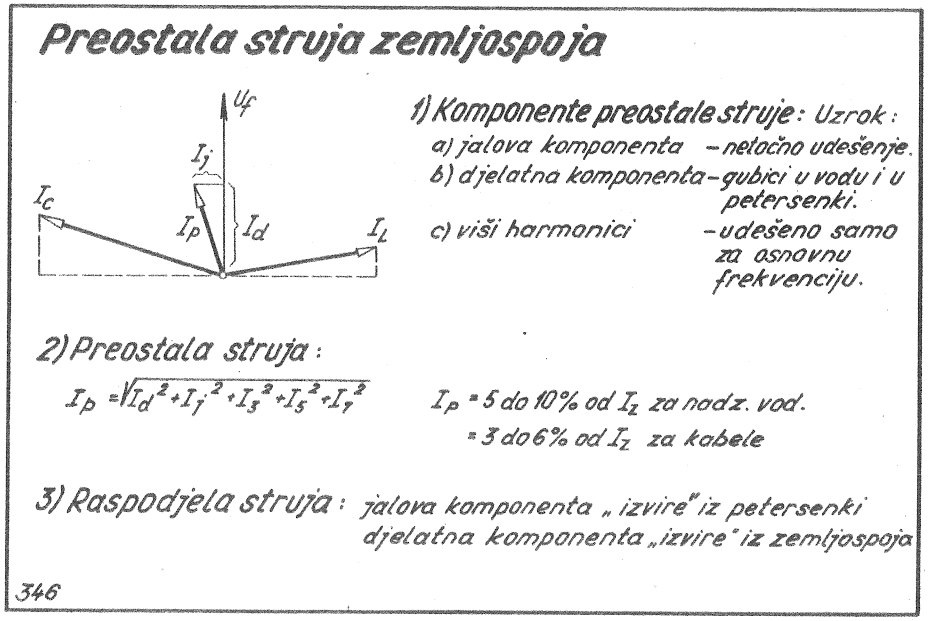
b) djelatna komponenta, koja nastaje uslijed djelatnih gubitaka u vodovima (korona može biti povećana), transformatorima i petersenkama.

c) komponenta uslijed viših harmoničnih nadvalova, jer napon nije potpuno sinusoidalan, a petersenke su udešene na rezonanciju samo obzirom na osnovnu frekvenciju.

2) Dalje je dan izraz za izračunavanje iznosa preostale struje zemljospoja iz njezinih komponenata, te je navedeno koliko obično iznosi preostala struja u postocima od struje zemljospoja. Tako će npr. u 110 kV-noj mreži s 1000 km

jednostrukih vodova struja zemljospoja iznositi oko 33o A, a preostala struja i do 3o A. Medjutim električni luk će se ipak gasiti, jer je preostala struja uglavnom djelatna (struja i napon istodobno prolaze kroz nulu), pa se luk lakše gasi nego kod kapacitivne struje. Prema iskustvu može se dopustiti preostala struja do loo A kod llo kV-ne mreže, odnosno 15o A kod 22o kV-ne mreže (kod vodova višeg napona dužina luka je veća!). Iz gornjega slijedi, da nije potrebno težiti za naročito tačnim udešenjem petersenki, jer će to malo utjecati na veličinu preostale struje. Preostalu struju možemo najtačnije odrediti mjerenjem (slično kao i struju zemljospoja). Ako vatmetarskim instrumentima odredimo jalovu i djelatnu komponentu, možemo izračunati koliki dio preostane na račun viših harmonika.

3) Što se tiče raspodjele struja uslijed zemljospoja, očito je da će izvori jalove komponente biti i sada petersenke, ali će se djelatna komponenta raspodijeliti u mreži kao da je izvor mjesto zemljospoja (isto kao struja zemljospoja kod nekompenzirane mreže).



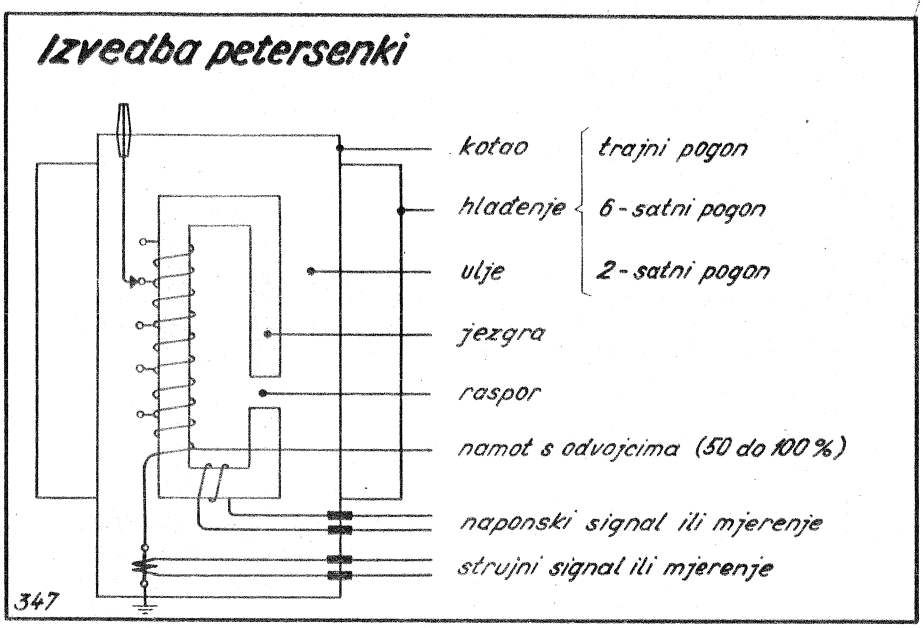
Sl. 31.4

IZVEDBA PETERSENKI

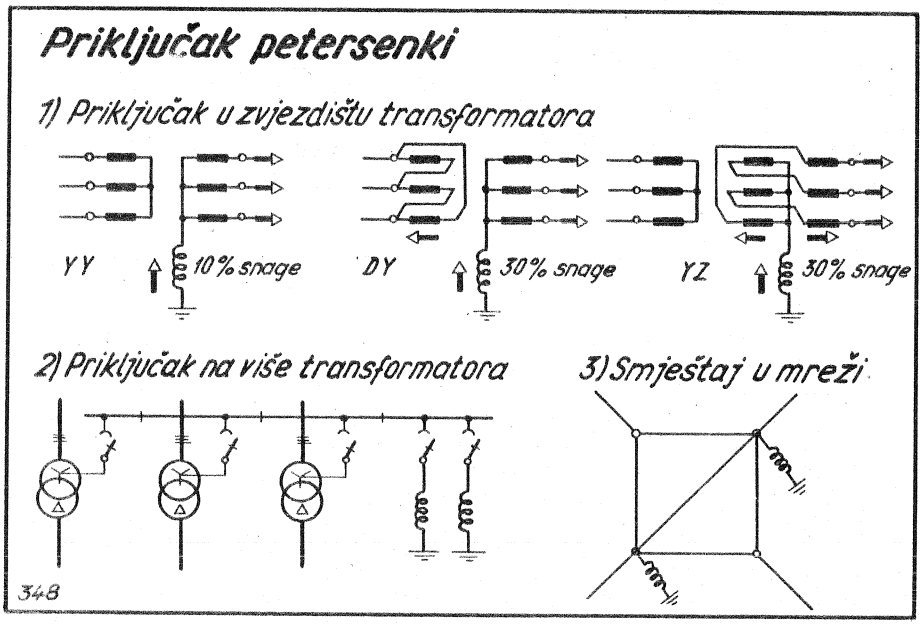
Na slici 31.5 je prikazana izvedba petersenki u glavnim crtama. U principu je petersenka izvedena slično kao transformator. U kotlu sa rebrima za hladjenje (petersenke se grade za trajni pogon ili za pogon od nekoliko sati) se u ulju nalazi jezgra od transformatorskih limova s namotom. Jezgra ima zračni raspor, da induktivitet petersenke ne bude ovisan o promjenama pogonskog napona. Namot ima odvojke za regulaciju u beznaponskom stanju, a regulacija obuhvaća 5o do loo% svih zavoja (neke izvedbe imaju kontinuiranu regulaciju pomoću promjene zračnog raspora). Petersenka obično ima ugradjeni svitak za mjerenje napona ili davanje naponskog signala, te strujni transformator za mjerenje struje odnosno davanje strujnog signala.

PRIKLJUČAK PETERSENKI

1) Petersenke se redovito priključuju na zvjezdište transformatora spojenih u zvijezdu (iznimno se može stvoriti i umjetna nultačka mreže, npr. pomoću trofaznog svitka), kao što je prikazano na slici 31.6. Spoj YY nije prikladan za priključak petersenke, jer istofazna struja ne može teći u drugom namotu, pa se iznimno upotrebljava s time da snaga petersenke ne prekorači lo% snage transformatora. Za priključak petersenke prikladni su spojevi s jednim namotom u trokut, ili čak cikcak spoj. Kod trokuta može teći istofazna struja, a kod namota u cikcak spoju se magnetski tok uslijed istofazne struje niti ne stvori. Ipak se ne priključuju petersenke s većom snagom od 3o% snage transformatora, jer struja petersenke dodatno opterećuje transformator.



Sl. 31.5

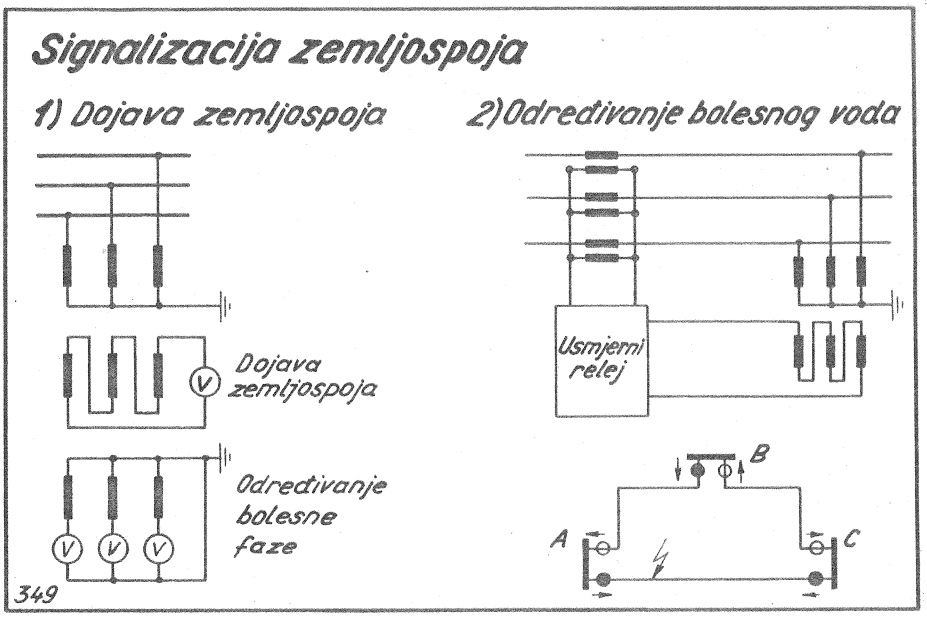


Sl. 31.6

2) Priključak petersenke na veći broj transformatora izvodi se tako da se povuče posebna nul-sabirnica (jednopolna!) i na nju preko jednopolnih rastavljača priključe zvjezdišta transformatora i petersenke (jedna ili više njih). Pomoću rastavljača može se bilo koja petersenka priključiti na transformatore, koji su u pogonu. Prekapčanje odvojaka petersenke vrši se dok je njezin rastavljač otvoren. Rastavljači se smiju iskapčati u zdravoj mreži, jer onda kroz njih ne teče struja, ali se ne smiju iskapčati za vrijeme dok traje zemljospoj.

3) Ukupna reaktancija petersenki može se podijeliti na bilo koji broj petersenki. Najjeftinije bi bilo postaviti samo jednu petersenku, ali bi za pogon bilo najbolje da svaki vod ima svoju petersenku, koja se ukapča i iskapča

s tim vodom. Stvarno će rješenje ležati izmedju toga. Broj petersenki mora biti tolik, da je moguće vršiti i eventualno potrebni pogon u nekoliko odvojenih dijelova mreže, i nadalje da kapacitivne struje ne teku kroz veoma duge poteze vodova (petersenke napajaju dozemne kapacitete!). Radi mogućnosti prilagodjivanja ukupna instalirana reaktancija petersenki mora biti nešto veća (do 2o%) od reaktancije dozemnih kapaciteta mreže. Isti zahtjevi utječu i na smještaj petersenki, koje treba da budu jednolično rasporedjene po mreži i smještene u čvorišta s većim brojem vodova, a ne na krajevima mreže.



Sl. 31.7

SIGNALIZACIJA ZEMLJOSPOJA

Pogonsko osoblje mora dobiti signal, ako nastane zemljospoj, te imati mogućnost da odredi gdje se zemljospoj nalazi, kako bi moglo poduzeti potrebne mjere. Sredstva koja to omogućuju prikazana su na slici 31.7.

Dojavu, da je nastao zemljospoj, vrlo je lako provesti. Dovoljno je mjeriti napon zvjezdišta mreže (tako da mjerimo sumu faznih napona i od toga uzmemo jednu trećinu). Dok je mreža zdrava taj napon je jednak nuli (ili približno jednak nuli, jer zbog nesimetrija ipak postoji neki napon izmedju zvjezdišta mreže i zemlje), pa prikljućeni instrument neće ništa pokazivati. Kod nastanka zemljospoja instrument će pokazati fazni napon (ili nešto manje ako imamo znatan otpor kvara), pa je to znak da je došlo do zemljospoja. Instrument će pokazivati otklon sve dok zemljospoj traje. Radi upozorenja osoblju može se tu prikljućiti i sijalica ili (češće) pomoćni relej koji ukapča zvučni signal.

Odredjivanje bolesne faze takodjer je vrlo jednostavno. Treba samo mjeriti napone pojedinih faza. Kod zdrave mreže sve faze imaju prema zemlji fazni napon. Kod zemljospoja bolesnoj fazi napon praktički padne na nulu, a zdravim fazama skoči na vrijednost linijskog napona. I ovdje se eventualno mogu postaviti signalne sijalice ili pokazni releji s padalicom.

Najteže se odredi položaj zemljospoja u mreži, tj. odrediti u kojem vodu se nalazi kvar. Gore opisane promjene naponskih prilika ne mogu se upotrijebiti u ovu svrhu, jer će se te promjene pokazati na svim mjestima u mreži gdje mjerimo napon, bez obzira gdje se nalazi kvar. Kod manje važnih mreža može se doći do rezultata pokušavanjem, tako da se redom iskapčaju pojedini vodovi (kad iskopčamo bolesni vod, naponske prilike će opet postati normalne), ali se to kod većih mreža ne radi.

Odredjivanje bolesnog voda može se postići pomoću usmjernih releja, koji su smješteni u svim vodovima u mreži i koji mjere snagu samog zemljospoja (relej mjeri u stvari nultu struju i nulti napon). Kod izolirane mreže mjeri se kapacitivna snaga, pa releji pokazujući smjer pokazuju prema mjestu zemljospoja, jer je razdioba struje u mreži takva, kao da je mjesto zemljospoja

izvor. Podaci pokazivanja releja dojave se (telefonski) na jedno mjesto (dispečerski centar), gdje se unesu u shemu mreže i tako ustanovi koji je vod bolestan. Kod kompenzirane mreže ne smijemo mjeriti kapacitivnu snagu (jer su za nju "izvori" petersenke) nego djelatnu snagu, jer djelatna komponenta struje ostatka "izvire" na mjestu zemljospoja. Ta je snaga razmjerno mala, pa se mora na neki način povećati osjetljivost releja.

UZEMLJENJE ZVJEZDIŠTA

Ako zvjezdište uzemljimo, onda ne može doći do štetnih naponskih posljedica uslijed zemljospoja, pa je tim jedan dio problema riješen. Ipak dodje do manjih poremećaja naponskih prilika zbog padova napona u impedancijama mreže, ali su ti poremećaji to manji što je mreža efikasnije uzemljena.

S druge strane se na taj način svaki zemljospoj pretvara u jednopolni kratki spoj (slika 31.8), pa je struja kvara znatno povećana. No taj jednopolni kratki spoj iskopča relejna zaštita u vrlo kratko vrijeme, pa je tim i strujni problem riješen (ovaj put na mehanički način). Jedina mana je u tome, što se bolesni vod iskapča iz pogona a ta se mana izbjegava višestrukim snabdjevanjem ili automatskim ponovnim uklapanjem (tropolnim ili jednopolnim).

Uzemljivši zvjezdište namjerno smo povećali struju kvara, što nije povoljno. Da struju jednopolnog kratkog spoja smanjimo možemo poduzeti razne mjere:

a) uzemljenje preko otpora, a ne direktno (ovo se upotrebljava u mrežama manjeg napona, a ne za najviše napone).

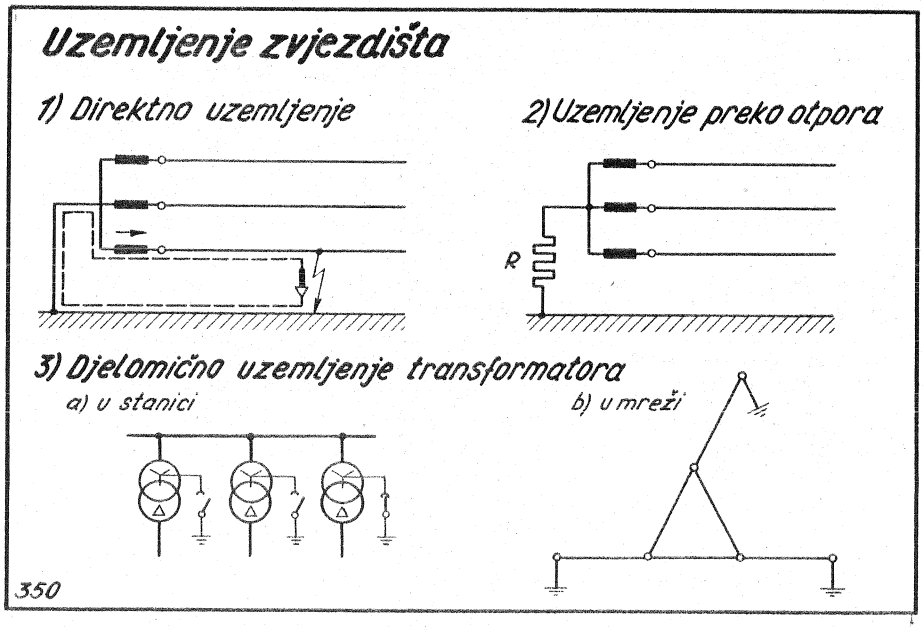
b) uzemljenje samo nekih transformatora u istoj stanici (transformatorska zvjezdišta su u tom slučaju snabdjevena rastavljačima, pa se transformatori mogu po volji uzemljiti ili ne).

c) uzemljenje transformatora samo u nekim čvorištima mreže (obično u krajnjim stanicama, gdje su prenaponski valovi najopasniji).

Sve ove mjere, dakako, smanjuju efikasnost uzemljenja, pa je na taj način i zaštita od naponskih smetnja slabija.

USPOREDBA ZAŠTITE OD ZEMLJOSPOJA

Usporedba zaštite od zemljospoja dana je na slici 31.9. Za spomenute tri vrste zaštite razmotrene su u prvom redu prednosti i mane kod raznih vrsti kvara i za razne smetnje. Kod prolaznih kvarova sve vrste zaštite imaju samo dobre strane (dakle prednost) za sve smetnje i uslijed električnog luka i uslijed velike struje i uslijed poremećaja naponskih prilika, pa je to sve obuhvaćeno zajedno u jednoj koloni. Kod trajnih kvarova odvajanje samo donekle



Sl. 31.8

Usporedba zaštite od zemljospoja

Vrsta zaštite	Prednost ili mana				Područje primjene
	Prolaz. kvar	Trajni kvar		Prekid pogona	
		Struja	Napon		
Odvojanje (izolir. zvjezd.)	+	0	0	+	do 20 kV
Kompenzacija (petersenke)	+	+	−	+	do 150 kV
Uzemljenje zvjezdišta	+	+	+	−	do 400 kV

\+ prednost , 0 indiferentno, − mana

351

Sl. 31.9

štiti od prevelike struje i prevelikih napona (suzuje područje poremećaja), kompenzacija ne štiti od prevelikih napona, a uzemljenje štiti od obojega. Što se tiče prekida pogona, do njega mora doći jedino kod uzemljenja zvjezdišta.

U ovisnosti od toga ovisi i područje primjene pojedinih vrsta zaštite odnosno tretiranje zvjezdišta.

a) izolirano zvjezdište se može primijeniti samo kod malih mreža malog napona, recimo do 2o kV, gdje se električni luk još sam po sebi gasi.

b) uzemljenje zvjezdišta preko petersenka se upotrebljava sve do napona od 15o kV, dok još efikasno uzemljenje zvjezdišta ne može doprinijeti veće uštede na izolaciji, a štetne posljedice ispadanja vodova iz pogona je teže izbjeći.

c) direktno uzemljenje zvjezdišta se upotrebljava sve do najviših napona, a za najviše napone se ovaj način zaštite i jedini primjenjuje. Tu se naime zaoštrava naponski problem, efikasnim uzemljenjem zvjezdišta mogu se postići znatne uštede na izolaciji, a štetne posljedice iskapčanja vodova iz pogona je lakše riješiti (višestrukim napajanjem ili automatskim ponovnim uklapanjem).

Primjer proračuna po Π - shemi

d)

$\underline{Z} = 23{,}1 + j40\ \Omega$, $\frac{\underline{Y}}{2} = j150\ 10^{-6}\ S$, $U_2 = 63500\ V$, $\underline{\mathcal{I}}_2 = 262{,}5\ \angle -36{,}8°$

$\underline{\mathcal{I}}_{20} = 63500 \cdot 150 \cdot 10^{-6} \angle 90° = 9{,}52\ \angle 90° = j9{,}52\ A$

$\underline{\mathcal{I}}_{12} = 262{,}5 \angle -36{,}8° + j9{,}52 = (210 - j157{,}5) + j9{,}52 = 210 - j148\ A$

$\underline{\mathcal{I}}_{12}\underline{Z} = (210 - j148)(23{,}1 + j40) = 4850 + 5920 + j8400 - j3420 = 10770 + j4980\ V$

$\underline{U}_1 = 63500 + (10770 + j4980) = 74270 + j4980 = 74400\ \angle 3{,}8°\ V$

$\left(U_1 = \sqrt{74270^2 + 4980^2} = 74400\ V,\ tg\delta = \frac{4980}{74270} = 0{,}067,\ \delta = 3{,}8°\right)$

$\underline{\mathcal{I}}_{10} = (74270 + j4980) \cdot j150 \cdot 10^{-6} = -1 + j11\ A$

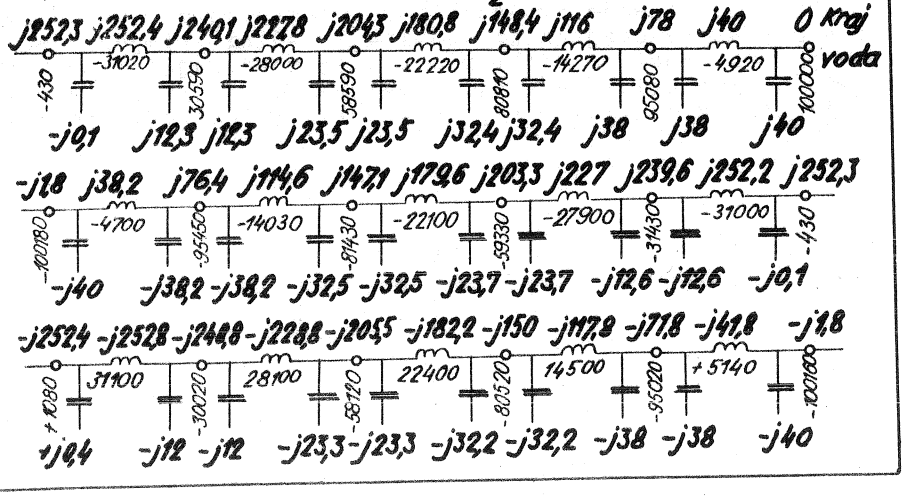
$\underline{\mathcal{I}}_1 = (210 - j148) + (-1 + j11) = 209 - j137 = 250\ \angle -33{,}2°\ A$

$\gamma_1 = -33{,}2 - 3{,}8 = -37°$

Sl. 9.6

Prazni hod idealnog dugog voda

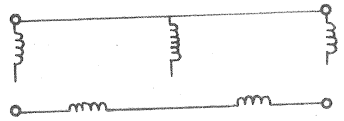
$l_1 = 300\ km$, $X = 123\ \Omega$, $\frac{B}{2} = 0{,}4 \cdot 10^{-3}\ S$



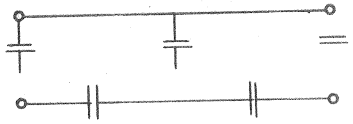
Sl. 10.2

PRILAGODENJE POGONA PRIJENOSU PRIRODNOM SNAGOM

1) Snaga manja od prirodne

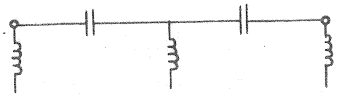


2) Snaga veća od prirodne

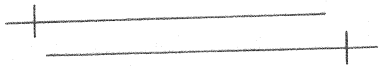


3) Primjena sinhz. kompenzatora

4) Potpuna kompenzacija voda



5) Razmaknuti vodiči



Sl. 12.16

Korekcioni faktori za točne ekvivalentne sheme

$$\gamma\ell = \theta = \sqrt{z_1 y_1}\cdot\ell = \sqrt{zy} \qquad \ldots(1)$$

$$z_c = \sqrt{\frac{z_1}{y_1}} = \frac{z_1}{\sqrt{z_1 y_1}} = \frac{z_1}{\gamma} = \frac{z_1\ell}{\gamma\ell} = \frac{z}{\theta} = \frac{z/2}{\theta/2} \qquad \ldots(2)$$

$$\frac{1}{z_c} = \sqrt{\frac{y_1}{z_1}} = \frac{y_1}{\sqrt{z_1 y_1}} = \frac{y_1}{\gamma} = \frac{y_1\ell}{\gamma\ell} = \frac{y}{\theta} = \frac{y/2}{\theta/2} \qquad \ldots(3)$$

$$\frac{ch\theta - 1}{sh\theta} = th\frac{\theta}{2} \qquad \ldots(4)$$

$$z_\pi = z_c\, sh\gamma\ell = z\,\frac{sh\theta}{\theta} \qquad \ldots(5)$$

$$\frac{y_\pi}{2} = \frac{1}{z_c}\,\frac{ch\gamma\ell - 1}{sh\gamma\ell} = \frac{y/2}{\theta/2}\cdot\frac{ch\theta - 1}{sh\theta} = \frac{y}{2}\,\frac{th\,\theta/2}{\theta/2} \qquad \ldots(6)$$

$$y_T = \frac{1}{z_c}\,sh\gamma\ell = y\,\frac{sh\theta}{\theta} \qquad \ldots(7)$$

$$\frac{z_T}{2} = z_c\,\frac{ch\gamma\ell - 1}{sh\gamma\ell} = \frac{z/2}{\theta/2}\cdot\frac{ch\theta - 1}{sh\theta} = \frac{z}{2}\,\frac{th\,\theta/2}{\theta/2} \qquad \ldots(8)$$

Sl. 14.4

MREŽNI ANALIZATORI (modeli mreže)

Princip:

Mreža se modelira

Električne veličine se mjere

Izvedbe:

Istosmjerni

Izmjenični – direktni
– obrnuti

Trofazni

Specijalni

Mikromreža

Karakteristike:

Brzina

Preglednost

Dovoljna točnost

Sl. 18.19

PRIJENOS ELEKTRIČNE ENERGIJE
Skripta - dodatak br. 1.

Zagreb, listopad 1960.

Božidar Stefanini:

PRELAZNE POJAVE U DUGIM VODOVIMA

OPĆENITO O PRELAZNIM POJAVAMA

Promjena od jednog stacionarnog stanja na drugo ne nastaje momentalno. Izmedju jednog i drugog stacionarnog stanja imamo uvijek postepeni prelaz,koji nazivamo prelaznom pojavom. Uzrok prelazne pojave je promjena situacije u strujnom krugu, koja zahtijeva drugačije stacionarno stanje. Kod vodova za prijenos električne energije uzroci mogu biti: munja, sklapanja, kratki spojevi i sl. Prelazne pojave redovito traju vrlo kratko, jer se njihova energija troši u otporima, pa se naglo prigušuju i brzo dobivamo novo stacionarno stanje koje ustvari predstavlja završetak prelazne pojave.

Kod dugih vodova prelazne pojave imaju oblik putnih valova, jer se promjene ne zbivaju istodobno u svim tačkama voda, već se naprotiv promjena stanja širi duž voda brzinom svjetlosti. Tako nastaju putni valovi, koji se u izvjesnim tačkama voda reflektiraju, pa tako superpozicijom polaznih i povratnih putnih valova dobivamo električne prilike za promatranu prelaznu pojavu.

Prigušenje prelaznih pojava nastaje zbog gubitaka u otporima. Kod putnih valova na dugim vodovima prigušenje nastaje zbog otpora i odvoda, koji se jako mijenjaju za vrijeme prelazne pojave i mogu doseći nekoliko puta veće vrijednosti nego kod stacionarnih stanja. Otpor se zbog skinefekta znatno poveća kod čela vala, jer se tu struja naglo mijenja, pa se zbog tih gubitaka strmina čela brzo ublaži. Odvod pak se jako poveća zbog korone, do koje dolazi uslijed visokih napona putnih valova, pa se time opet prigušuje amplituda putnih valova. Utjecaj otpora i odvoda je teško uzeti u račun i ako su konstantni, a kamo li kad se ovako mijenjaju i po prostoru i po vremenu.

Kod svih prelaznih pojava na dugim vodovima, koje imaju oblik putnih valova, ima mnogo zajedničkoga. Već smo prije vidjeli kod idealnog voda bez gubitaka, da je brzina putnih valova jednaka brzini svjetlosti i da je odnos napona i struje jednak valnom otporu. Nadalje već znamo da se na otvorenom kraju napon reflektira s istim a struja sa suprotnim predznakom, dok se na kratko spojenom kraju struja reflektira s istim, a napon sa suprotnim predznakom. Ove zajedničke osebine putnih valova možemo korisno primijeniti kod razmatranja pojedinih konkretnih slučajeva.

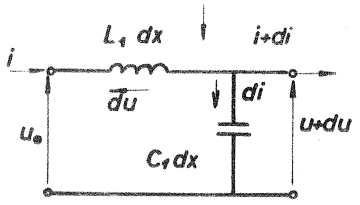
Razlike kod pojedinih slučajeva prelaznih pojava slijede s jedne strane zbog različite situacije na vodu (npr. vod je otvoren, ili kratko spojen itd.) i s druge strane zbog različitih uslova u vezi s uzrokom prelazne pojave. Što se potonjega tiče, posljedica će biti različiti oblik putnog vala. Kad je putnom valu uzrok atmosferski utjecaj, oblik vala imat će nepravilan izgled. Kod ukapčanja na istosmjerni napon dobijemo valove konstantne amplitude, a kod ukapčanja na izmjenični napon dobijemo valove u obliku sinusoide.

Mi ćemo u daljnjem promatrati neke karakteristične slučajeve prelaznih pojava, i to uslijed atmosferskih utjecaja, i uslijed ukapčanja na napon. Pri tome ćemo promatrati samo ukapčanje na istosmjerni napon. Ukapčanje na izmjenični napon nećemo posebno provoditi, jer pri tome imamo manje jasnu sliku, a ne dobijemo ništa bitno nova. Nas ionako prvenstveno interesiraju one pojave, kod kojih dobijemo putne valove s velikim amplitudama, a to će biti u slučaju ako se ukapčanje vrši u momentu kad je napon u blizini tjemene vrijednosti. U tom području napon se polako mijenja, pa čitava pojava sliči onoj s ukapčanjem na istosmjerni napon. Npr. promatrajmo napon tisućinku sekunde prije nego što postigne tjemenu vrijednost pa do tisućinke sekunde iza tjemene vrijednosti. Kroz to vrijeme putni val prodje 600 kilometara (mnogo!), a napon se mijenja unutar 95% i 100% tjemene vrijednosti (malo!).

PRELAZNE POJAVE U IDEALNOM VODU

Najjednostavnije možemo provesti razmatranja prelaznih pojava na idealnom vodu bez gubitaka. Tu doduše nećemo dobiti prigušenje, pa prelazna pojava nema kraja, ali nas ionako prvenstveno interesira prelazna pojava u njenom početku, pa ćemo ovako na jednostavan način dobiti prilično vjernu sliku. Matemat-

ski izvod za takve neprigušene putne valove dan je na slici 1, i on čini osnovu za razmatranje prelaznih pojava u dugim vodovima.



$$du = L_1\,dx\,\frac{di}{dt}\ (1),\quad -di = C_1\,dx\,\frac{du}{dt}\ (2)$$

$$\frac{du}{dx} = -L_1\,\frac{di}{dt}\ (3),\quad \frac{di}{dx} = -C_1\,\frac{du}{dt}\ (4)$$

$$\frac{d^2u}{dx} = -L_1\,\frac{di}{dx\,dt}\ (5),\quad \frac{di}{dx\,dt} = -C_1\,\frac{d^2u}{dt^2}\ (6)$$

(6) → (5): $\frac{d^2u}{dx^2} = L_1 C_1 \frac{d^2u}{dt^2}$ (7), Postavimo: $L_1 C_1 = \frac{1}{v^2}$ (8)

(8) → (7): $\frac{d^2u}{dx^2} = \frac{1}{v^2}\,\frac{d^2u}{dt^2}$ (9), Analogno: $\frac{d^2i}{dx^2}\quad\frac{1}{v}\quad\frac{d^2i}{dt^2}$ (10)

Rješenje: $u = f_1(x-vt) + f_2[x+vt)$ ...(11)

Analogno: $i = f_3(x-vt) + f_4(x+vt)$ ...(12)

Sl 1 Neprigušeni putni valovi-izvod

Na slici 1 je na crtežu dan elementarni dio voda s pripadnim induktivitetom, i kapacitetom (pri tome nije važno je li poprečna grana ispred ili iza uzdužne, jer se radi o elementarnom dijelu voda, čija dužina teži k nuli). U tom elementarnom dijelu voda promatramo napon "u" i struju "i", koji se mijenjaju s vremenom po bilo kojem zakonu. Promjene napona odnosno struje u tom elementarnom dijelu voda takodjer su upisane u crtež.

Iz uslova, da je napon na induktivitetu jednak promjeni magnetskog toka po vremenu, dobijemo izraz (1). A iz uslova, da je struja u kapacitetu jednaka promjeni električnog toka (odnosno naboja) po vremenu, dobijemo izraz (2). Preuredimo li izraz (1), dobijemo izraz (3), a analogno iz izraza (2) dobijemo izraz (4). Deriviranjem izraza (3) po "x" dobijemo izraz (5), a deriviranjem izraza (4) po "t" dobijemo izraz (6). Uvrstimo li izraz (6) u izraz (5), dobijemo izraz (7). Sad ćemo još postaviti izraz (8), gdje već od prije znamo da će biti v = brzina svjetlosti. Uvrštavanjem izraza (8) u izraz (7) dobivamo konačno diferencijalnu jednadžbu (9) za napon. Analognim postupkom dobije se i diferencijalna jednadžba (1o) za struju koja je potpuno jednako gradjena.

Rješenje diferencijalne jednadžbe (9) za napon dano je izrazom (11), gdje su "f_1" i "f_2" proizvoljne funkcije s podfunkcijama (x - vt) odnosno (x + vt) kao argumentima. Same funkcije "f_1" i "f_2" treba odrediti iz graničnih uslova. Da rješenje zaista zadovoljava, možemo dokazati, ako izraz (11) najprije dva puta deriviramo po "x", a zatim ga dva put deriviramo po "t", pa to usporedimo s izrazom (9). (Ovaj dokaz mije prikazan na slici 1, ali ga može svatko lako sam izvesti. Pri deriviranju treba derivaciju funkcije množiti s derivacijom podfunkcije!). Analogno, za rješenje diferencijalne jednadžbe (1o) za struju dano je izrazom (12), gdje su "f_3" i "f_4" opet proizvoljne funkcije kao gore.

Iz rješenja (11) za napon vidimo da imamo dva putna vala. Prvi član predstavlja prelazni val od početka prema kraju voda. Ako naime (uz kontinuirani porast vremena "t") i "x" raste kontinuirano, i to brzinom "v", ostat će vrijednost funkcije "f_1" nepromijenjena, a to znači da se raspodjela napona dana funkcijom $f_1(x)$ kreće brzinom "v" u smjeru većih vrijednosti "x". Analogno vidimo da drugi član predstavlja povratni val, jer ako "x" kontinuirano raste brzinom "v", raspodjela napona dana funkcijom $f_2(x)$ kreće se u smjeru manjih vrijednosti "x". Raspodjela napona duž voda u ovisnosti o vremenu daje se superpozicijom tih dvaju valova. Analogna razmatranja na temelju izraza (12) vrijede i za struju.

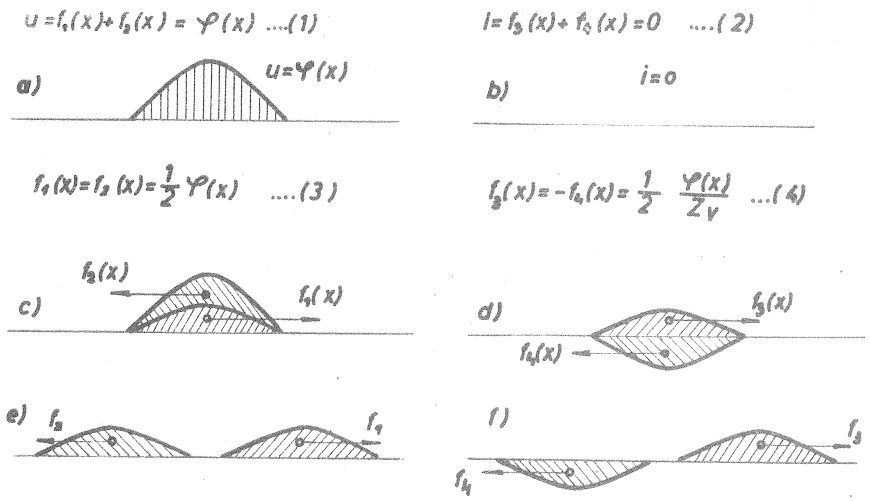
U daljnjem ćemo razmatrati neke konkretne slučajeve prelaznih pojava.

Izrazi (11) i (12) sa slike 1 pokazali su nam da se radi o superpoziciji dvaju putnih valova, a njihov oblik "f1" do "f4" možemo dobiti postavljajući granične uslove. No često se može pojednostavniti postupak koristeći izvjesne evidentne činjenice, pa ćemo u daljnjim razmatranjima prvenstveno tako i postupiti.

UDARAC MUNJE U VOD

Kao prvu promatrat ćemo prelaznu pojavu nakon udarca munje u vod. Smatrat ćemo da munja momentalno unese u vod naboj rasporedjen duž voda na odredjeni način i da od tog stanja prelazna pojava počinje. Isto takvu prelaznu pojavu samo s manjim amplitudama dobijemo kod udarca munje u blizinu voda, a ne direktno u vod. U potonjem će slučaju prije udarca munje postojati električno polje oblaka, koje će u vodu navući naboj u blizinu oblaka. Prilikom izbijanja oblaka oslobodit će se naboj u vodu i podići će potencijal pojedinih tačaka voda. U oba slučaja, dakle, prelazna pojava počinje s odredjenom raspodjelom napona u vodu, dok struje u vodu još nema. Potrebni crteži i izrazi za objašnjenje ove prelazne pojave dani su na slici 2.

U momentu t = 0, tj. na početku prelazne pojave napon je dan izrazom (1) i prikazan crtežom (a), dok je struja dana izrazom (2) i prikazana crtežom (b). Izraze (1) i (2) dobijemo iz izraza (11) i (12) na slici 1, ako uvrstimo t = 0. Napon mora biti jednak funkciji kojom je dana raspodjela duž voda u tom momentu, dok je struja na početku prelazne pojave duž čitavog voda jednaka nuli.



Sl. 2 Udarac munje u vod

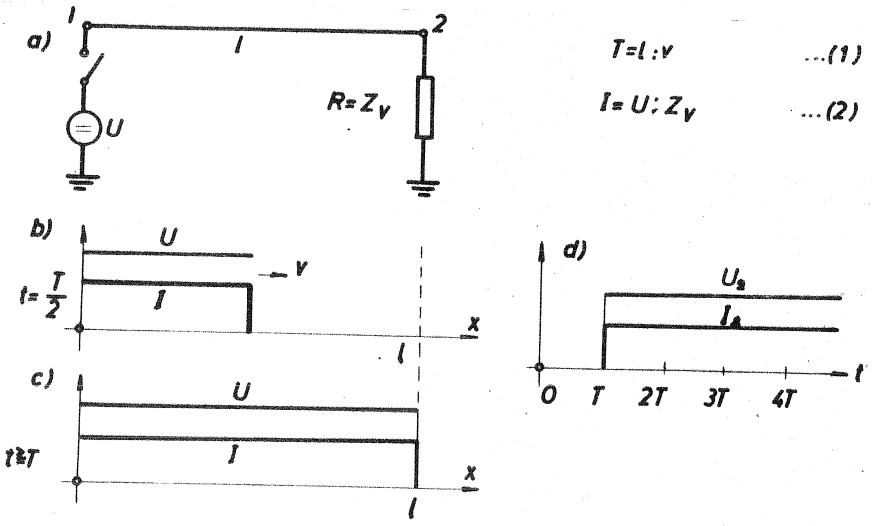
Kad prelazna pojava počne teći, tj. kad se vrijeme "t" kontinuirano povećava dobit ćemo za napon dva vala, i to polazni val s raspodjelom napona prema funkciji "f_1" i povratni val definiran funkcijom "f_2". Iz razloga simetrije ta će dva vala biti jednaka, jer nema nikakvog razloga da jedan od njih bude veći od drugoga. Tako za te valove dobijemo izraz (3), te se oni mogu prikazati crtežom (c). Nakon nekog vremena raspodjela napona duž voda izgledat će kao na crtežu (e), jer su putni valovi već prešli odredjeni put. Tako nastali putni valovi mogu doći do kraja voda (gdje će se reflektirati) ili ući u neku transformatorsku stanicu, gdje će izazvati prenapone.

Struja je u početku prelazne pojave dana izrazom (2) i prikazana crtežom (b). I ona je dana s dva putna vala s raspodjelom "f_3" i "f_4", no iz izraza (2) slijedi, da su ta dva vala jednaka i suprotnog predznaka. Iz već poznate činjenice da je odnos napona i struje kod putnih valova jednak valnom otporu voda "Z_v" možemo konačno za putne valove struje pisati izraz (4). To je prikazano na crtežu (d). Nakon nekog vremena raspodjela struje izgleda kao na crtežu (f).

UKAPČANJE VODA OPTEREĆENOG PRIRODNOM SNAGOM

Kao najjednostavniju prelaznu pojavu kod ukapčanja voda prikazat ćemo ukapčanje voda opterećenog prirodnom snagom, tj. voda koji na kraju ima djelatni otpor po iznosu jednak valnom otporu. Ta prelazna pojava prikazana je na slici 3.

Na crtežu (a) prikazana je shema spoja. Na početku (1) je sklopka za ukapčanje istosmjernog napona "U", a na kraju voda (2) je otpor "R" jednak valnom otporu. Dužina voda označena je sa "l", pa je vrijeme "T" potrebno da val prodje duž voda dano izrazom (1). Na crtežu (b) dana je raspodjela napona i struje duž voda u momentu kad je čelo vala stiglo do polovine voda, a na crtežu (c) u momentu kad je čelo vala stiglo do kraja voda. Iznos struje "I" dan je izrazom (2). Sve je to jasno iz onoga što je već prije rečeno za putne valove.



Sl. 3 Vod opterećen valnim otporom

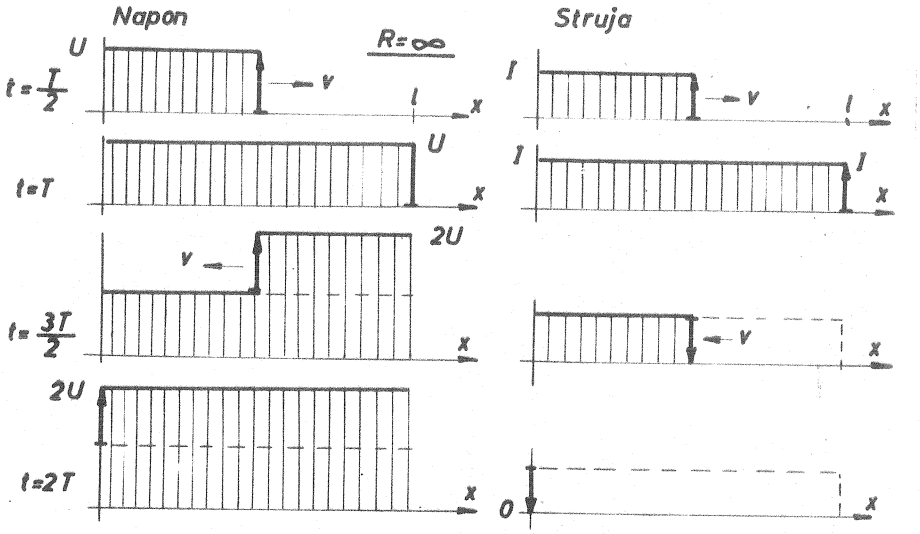
Kad čelo naponskog vala stigne do kraja voda, otpor "R" dobije napon "U", pa kroz njega poteče struja "I", koja je upravo jednaka amplitudi strujnog vala, koji je takodjer upravo stigao do kraja voda. Struja dakle nepromijenjeno teče kroz otpor "R", koji uzima upravo onoliku energiju, koju putni val donosi do kraja voda. Zbog toga nema nikakve refleksije valova na kraju. Raspodjela napona i struje duž voda ostaje i nadalje kao što je prikazana na crtežu (c). Prelazna pojava tako prelazi u stacionarno stanje, jer nema više razloga da bi postojali putni valovi.

Oscilogram napona i struje na kraju voda, tj. kako se napon i struja na kraju voda mijenjaju s vremenom, može se lako konstruirati na temelju crteža (b) i (c). Taj je oscilogram prikazan na crtežu (d). Od momenta ukapčanja (t = 0) pa sve do momenta t = T, napon i struja na kraju voda jednaki su nuli, jer putni valovi još nisu stigli do kraja voda. U momentu t = T, kad čelo vala stigne do kraja voda napon skoči na vrijednosti "I". Tolika vrijednost napona i struje na kraju voda ostane i dalje.

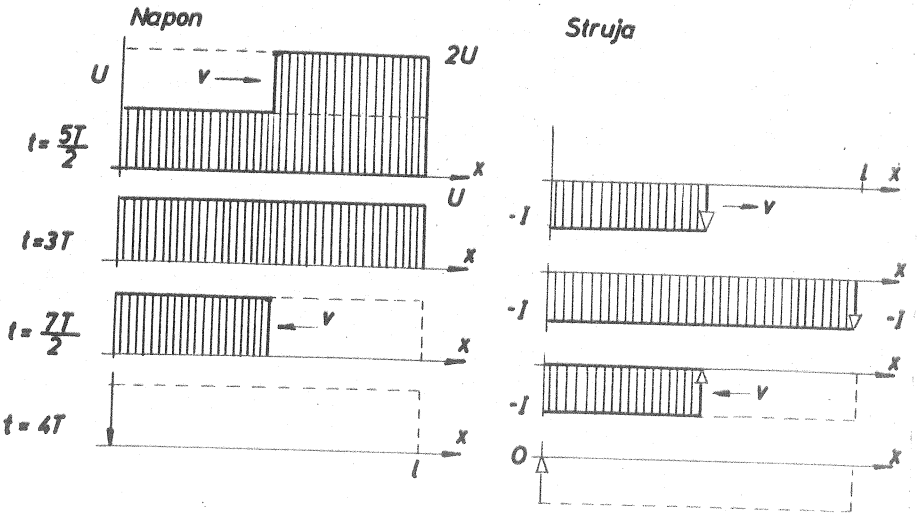
Slični oscilogram dobio bi se za napon i struju i na bilo kojoj drugoj tački voda, samo što bi skok na punu vrijednost napona odnosno struje nastupio u odgovarajućem ranijem momentu.

UKAPČANJE OTVORENOG VODA

Čim na kraju voda nemamo teret jednak prirodnoj snazi, nastupit će refleksija vala na kraju. Od svih mogućih slučajeva mi ćemo razmotriti dva krajnja slučaja, i to najprije vod otvoren na kraju, a kasnije vod koji je na kraju kratko spojen. Raspodjela napona i struje duž otvorenog voda u raznim momentima nakon ukapčanja na istosmjerni napon prikazana je na slikama 4 i 5.



Sl. 4 Ukopčanje otvorenog voda



Sl. 5 Ukopčanje otvorenog voda (nast)

Na slici 4 prikazan je početak prelazne pojave, te je raspodjela napona prikazana s lijeve a raspodjela struje s desne strane. U početku, sve dok val ne stigne do kraja voda, prilike su iste kao i prije, jer val ne zna što ga na kraju voda očekuje. Kad val stigne na kraj voda nastaje refleksija, te se napon reflektira s istim predznakom a struja sa suprotnim. Reflektirani val širi se ulijevo, te se na vodu uspostavlja dvostruki napon, dok se na istom dijelu voda struja poništava. Struja nužno mora pasti na nulu, jer je kraj voda otvoren pa struja nema kamo teći. Situaciju, kad reflektirani val stigne do polovice voda vidimo na trećem crtežu (računajući odozgo) i to kako za napon tako i za struju. Četvrti crtež prikazuje stanje, kad reflektirani val stigne do početka voda. U tom momentu duž čitavog voda imamo dvostruki napon, a struja

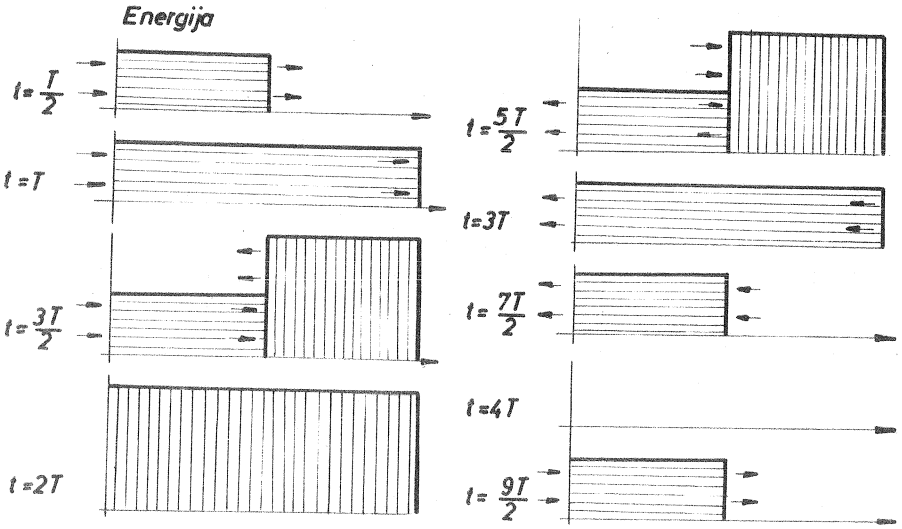
ne teče ni na jednoj tački voda. Čitava energija u vodu sadržana je u obliku energije električnog polja.

Na slici 5 prikazan je nastavak prelazne pojave. Reflektirani naponski val stigao je na početak voda s punim iznosom "U" i s pozitivnim predznakom. Početak voda možemo smatrati kratko spojenim (uz pretpostavku beskonačno jakog izvora bez unutrašnjeg otpora), pa će se napon reflektirati s punim iznosom ali sa suprotnim predznakom. Taj će val sada opet putovati udesno i brisati napon od dvostrukog iznosa na jednostruki iznos. Što se tiče struje, ona će se na kratko spojenom početku voda reflektirati s istim negativnim predznakom, kao što je putni val i stigao na početak voda. Duž voda će se dakle uspostavljati negativna struja, tj. iz voda prema izvoru. Situacija u momentu kad taj val stigne do polovice voda prikazana je na prvom crtežu. Kao što se vidi, u toj fazi se električno polje razgradjuje i struja teče natrag u izvor, te se energija iz voda vraća izvoru.

Refleksiju vala u početku voda možemo tumačiti i na drugačiji način. Izvor (ako je beskonačno velik) drži napon na početku čvrsto na iznosu "U". Drugi iznos napona na početku ne može ni postojati. Prema tome, čim se u momentu $t = 2T$ uspostavi duž čitavog voda dvostruki napon, on istog momenta mora na početku voda opet pasti na jednostruki iznos "U". Tome je udovoljeno jedino ako naponski val reflektiran na početku voda ima negativni dakle suprotni predznak. Budući da se sada električno polje razgradjuje i energija vraća izvoru, mora se u vodu uspostavljati struja prema izvoru, tj. s negativnim predznakom, a tome je udovoljeno jedino ako strujni val reflektiran na početku voda ima negativni predznak, tj. isti s kojim je val došao do početka voda. Uostalom već smo uočili, ako se napon reflektira sa suprotnim predznakom, da se struja (iz energetskih razloga) reflektira s istim predznakom, i obrnuto. U momentu $t = 3T$, tj. kad val opet stigne do kraja voda, duž čitavog voda je napon opet jednak "U" a struja "-I", kao što je prikazano na drugom crtežu. Nakon toga opet dolazi do refleksije na otvorenom kraju. Napon je stigao s negativnim predznakom pa se isto tako reflektira i povratni val razgradjuje napon koji od kraja prema početku voda pada na nulu. Struja stiže do kraja voda s negativnim predznakom pa se reflektira obrnuto, tj. s pozitivnim i struja se opet poništava. Kad val opet stigne do početka nema duž voda ni napona ni struje. Ali sad opet cijela igra počinje ispočetka, jer opet kao i na početku prelazne pojave imamo vod bez napona i struje priključen na istosmjerni izvor. Do istog zaključka dodjemo ako opet promatramo refleksiju valova na početku voda.

Tako, ponavljajući se, prelazna pojava traje bez prestanka, jer se radi o idealnom vodu bez gubitaka. U stvari će zbog prigušenja amplitude naponskog i strujnog vala brzo pasti na nulu i tim prelazna pojava prestaje.

Na slici 6 prikazane su energetske prilike duž idealnog voda u raznim momentima nakon ukapčanja na istosmjerni napon. Te se energetske prilike mogu bez daljnjega izvesti iz prikaza na slikama 4 i 5. Najprije energija iz izvora ulazi u vod gradeći električno i magnetsko polje, i prodire sve dalje duž voda dok val ne dodje do kraja. Sad se sva energija pretvara u energiju električ-



Sl. 6 Ukopčanje otvorenog voda

nog polja, koje se stanje širi prema početku voda, a energija iz izvora prodire u vod samo do tog mjesta i tu povećava energiju voda. U desnom dijelu voda nema toka energije. To stanje se proširi na čitav vod u momentu t = 2T.

Sad se električno polje razgradjuje i energija se vraća u izvor, a to se stanje širi prema kraju voda, te u momentu t = 3T imamo duž čitavog voda vraćanje energije prema izvoru. To se vraćanje energije izvoru i dalje nastavlja na račun električnog i magnetskog polja u vodu, koja se razgradjuju i u momentu t = 4T nema u vodu više nikakve energije. Nakon toga se čitava igra ponavlja u nedogled.

Iz slike 4 i 5 mogu se konstruirati oscilogrami napona i struje, tj. njihova promjena po vremenu, na raznim tačkama voda. Primjera radi dani su na slici 7 takvi oscilogrami za početak, sredinu i kraj voda.

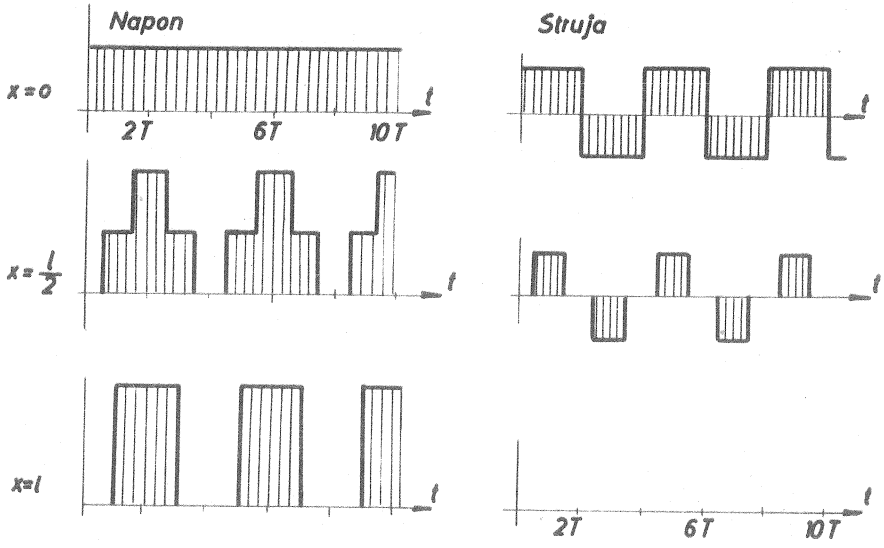
UKAPČANJE KRATKO SPOJENOG VODA

Sada ćemo promatrati prelazne pojave kod ukapčanja voda koji je na kraju kratko spojen. Kao shemu spoja možemo opet uzeti onu na slici 3 uz pretpostavku da je otpor na kraju "R" jednak nuli. Raspodjela napona i struje duž voda u raznim momentima nakon ukapčanja na istosmjerni napon prikazana je na slici 8, i to na analogni način kao i prije.

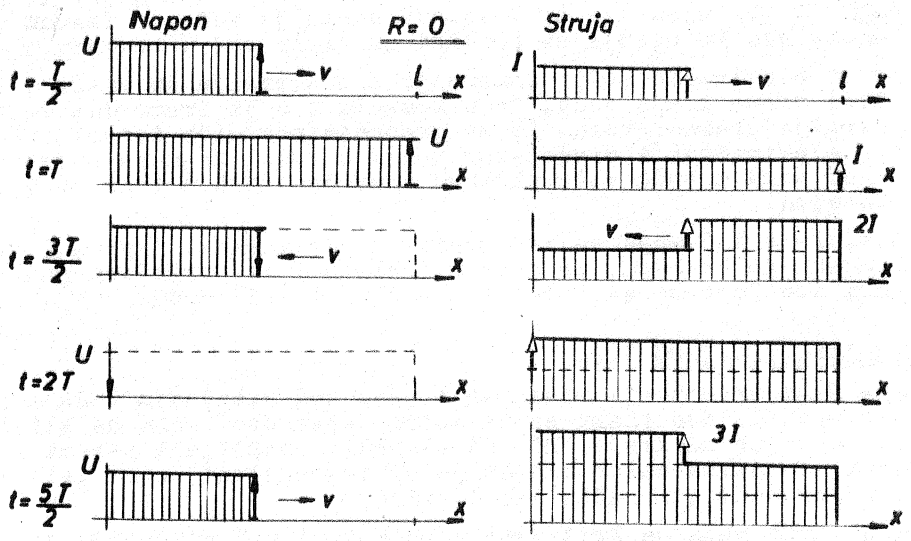
Do dolaska vala na kraj voda u momentu t = T situacija je opet ista kao i prije. No sad se val na kraju voda drugačije reflektira. Napon se reflektira sa suprotnim predznakom i taj val se širi ulijevo, tako da se na tom dijelu voda poništava. To je nužno, jer na kraju kratko spojenog voda mora napon pasti na nulu. Struja pak se reflektira s istim predznakom te se na tom dijelu voda uspostavlja dvostruka struja. Stanje, kad reflektirani val stigne do pola voda prikazan je na trećem crtežu. U momentu dolaska vala na početak voda, u vodu je poništen sav napon i duž čitavog voda teče dvostruka struja. Sad se opet refleksija vrši na isti način. Napon se reflektira sa suprotnim predznakom te se opet uspostavlja napon duž voda. To se mora dogoditi, jer izvor čvrsto drži napon na iznosu "U". Struja se reflektira s istim predznakom te poraste na trostruku vrijednost.

Naponske prilike u vodu se dalje periodički ponavljaju bez prestanka. Što se tiče struje, ona se kod svake refleksije povećava za iznos "I" i njena vrijednost u skokovima raste u beskonačnost. Konačno stanje za struju daje beskonačno veliku struju, a to je i u redu, jer se radi o idealnom vodu bez otpora na koji je narinut istosmjerni napon. U stvari će zbog prigušenja svaki porast struje biti sve manji i struja će se ustaliti na konačnoj vrijednosti.

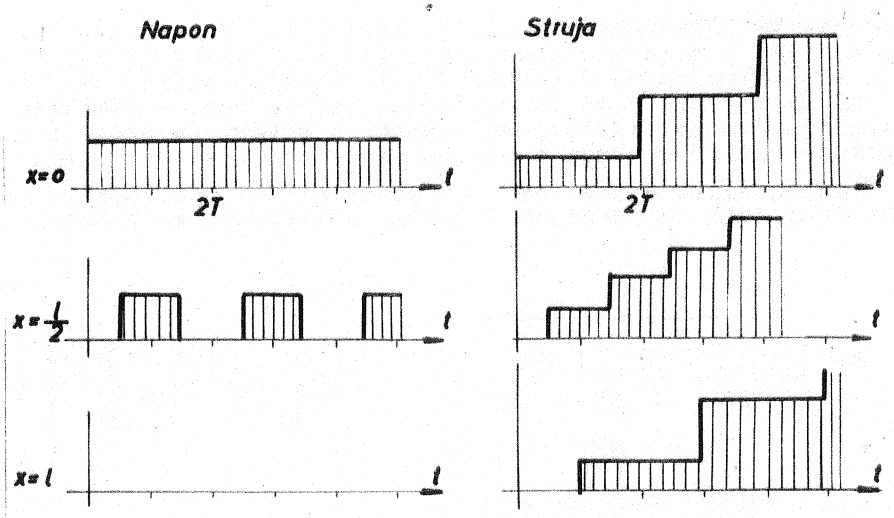
Na temelju slike 8 mogu se opet konstruirati oscilogrami napona i struje. Primjera radi dani su na slici 9 takvi oscilogrami za početak, sredinu i kraj voda.



Sl. 7 Otvoreni vod - oscilogrami



Sl. 8 Ukopčanje kratko spojenog voda



Sl. 9 Kratko spojeni vod - oscilogrami

PRELAZNE POJAVE U VODU BEZ IZOBLIČENJA

Sad ćemo prići razmatranju prelaznih pojava u vodu s gubicima. Tu ćemo dakako morati dobiti prigušene putne valove. Izvod diferencijalnih jednadžbi za opći slučaj možemo započeti na temelju sheme kao na slici 1, samo uz pretpostavku da u seriju s induktivitetom imamo i otpor, a paralelno s kapacitetom da imamo i odvod. Taj je izraz dan na slici 1o.

Iz uslova, da je napon u uzdužnoj grani jednak padu napona u otporu plus promjeni magnetskog toka po vremenu dobijemo izraz (1). A iz uslova, da je struja u poprečnoj grani jednaka struji u odvodu plus promjeni električnog toka po vremenu, dobijemo izraz (2). Preuredimo li izraz (1), dobijemo izraz (3).

a analogno iz izraza (2) dobijemo izraz (4). Deriviranjem izraza (3) po "x" dobijemo izraz (5), a deriviranjem izraza (4) po "t" dobijemo izraz (6). Uvrstimo li izraz (4) i (6) u izraz (5) dobijemo izraz (7) te konačno sredjivanjem izraz (8). Izraz (8) daje nam diferencijalnu jednadžbu za napon "u" u ovisnosti o "x" i "t". Analognim postupkom dobijemo diferencijalnu jednadžbu za struju, izraz (9). Rješenja ovih diferencijalnih jednadžbi nisu jednostavna, pa ćemo u daljnjem promatrati jedan specijalni slučaj voda sa gubicima, gdje dobijemo jednostavno rješenje.

$$-du = R_1 dx\, i + L_1 dx \frac{di}{dt} \quad \ldots (1) \qquad -di = G_1 dx\, u + C_1 dx \frac{du}{dt} \quad \ldots (2)$$

$$-\frac{du}{dx} = R_1 i + L_1 \frac{di}{dt} \quad \ldots (3) \qquad -\frac{di}{dx} = G_1 u + C_1 \frac{du}{dt} \quad \ldots (4)$$

$$-\frac{d^2u}{dx^2} = R_1 \frac{di}{dx} + L_1 \frac{di}{dx.dt} \quad (5) \qquad -\frac{di}{dx.dt} = G_1 \frac{du}{dt} + C_1 \frac{d^2u}{dt^2} \quad \ldots (6)$$

$$(4)\text{i}(6)\text{---}(5)\text{:}\ \frac{d^2u}{dx^2} = R_1 G_1 u + R_1 C_1 \frac{du}{dt} + L_1 G_1 \frac{du}{dt} + L_1 C_1 \frac{d^2u}{dt^2} \quad (7)$$

$$\text{Sredimo:}\ \frac{d^2u}{dx^2} = L_1 C_1 \frac{d^2u}{dt^2} + (R_1 C_1 + L_1 G_1) \frac{du}{dt} + R_1 G_1 u \quad \ldots (8)$$

$$\text{Analogno:}\ \frac{d^2i}{dx^2} = L_1 C_1 \frac{d^2i}{dt^2} + (R_1 C_1 + L_1 G_1) \frac{di}{dt} + R_1 G_1 i \quad \ldots (9)$$

Sl.1o. Vod sa gubicima - izvod

Ako postavimo uslov da je udio otpora u uzdužnoj grani jednak udjelu odvoda u poprečnoj grani, onda dobijemo rješenje s putnim valovima koji se samo prigušuju, ali se njihov oblik inače ne mijenja, pa se takav vod zove vod bez izobličenja. Makar da ovaj uslov u praksi redovito nije ispunjen, ipak su ovako dobivena rješenja znatno bliža stvarnosti nego rješenja za idealni vod.

Matematski izvod za vod bez izobličenja dan je na slici 11. Postavljeni uslov za udio otpora odnosno odvoda obuhvaćen je izrazom (1). Nadalje ćemo postaviti izraz (2) kao i prije. Množenjem izraza (1) i (2) dobijemo izraz (3) a množenjem izraza (1) i (3) dobijemo izraz (4). Ako sada izraze (3) i (4) uvrstimo u izraz (8) sa slike 1o, dobit ćemo izraz (5) a sredjivanjem konačnu diferencijalnu jednadžbu (6) za napon. Rješenje te jednadžbe dano je izrazom (7), a dokaz za to može se provesti slično kao što je bilo rečeno za idealni vod. Analognim postupkom dobijemo rješenje za struju, izraz (8).

Kao što vidimo, dobili smo ista rješenja kao kod idealnog voda samo što se putni valovi s vremenom prigušuju po eksponencijalnom zakonu. Kako pak valovi putuju duž voda jednoličnom brzinom, to će oni ujedno biti to više prigušeni, što su dalje prodrli u vod, i to opet po eksponencijalnom zakonu.

$$\frac{R_1}{L_1} = \frac{G_1}{C_1} = a \quad \ldots (1) \qquad L_1 C_1 = \frac{1}{v^2} \quad \ldots (2)$$

$$(1)\text{x}(2)\text{:}\ R_1 C_1 = G_1 L_1 = \frac{a}{v^2} \ (3) \qquad (1)\text{x}(3)\text{:}\ R_1 G_1 = \frac{a^2}{v^2} \quad \ldots (4)$$

$$\frac{d^2u}{dx^2} = \frac{1}{v^2} \frac{d^2u}{dt^2} + \left(\frac{a}{v^2} + \frac{a}{v^2}\right) \frac{du}{dt} + \frac{a^2}{v^2} u \quad \ldots (5)$$

$$\text{Sredimo:}\ \frac{d^2u}{dx^2} = \frac{1}{v^2} \left(\frac{d^2u}{dt^2} + 2a \frac{du}{dt} + a^2 u\right) \quad \ldots (6)$$

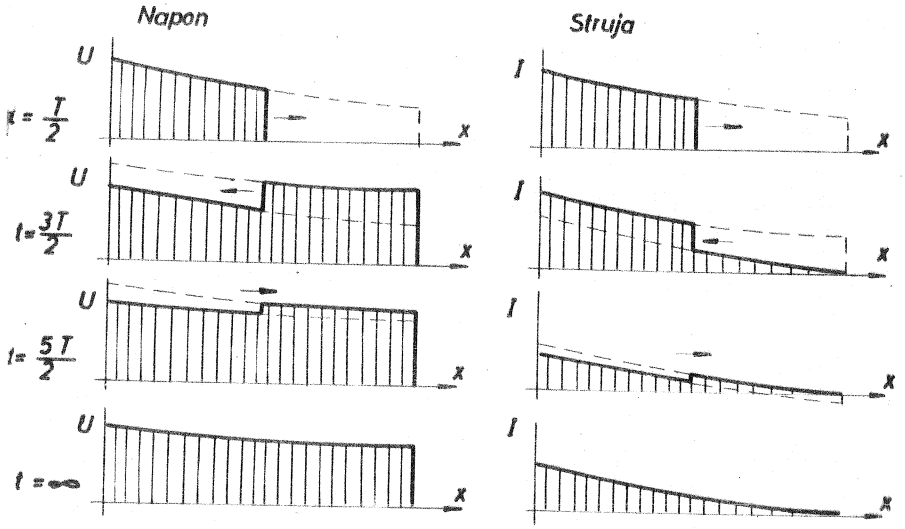
$$\text{Rješenje:}\ u = e^{-at} \left[f_1(x - vt) + f_2(x + vt)\right] \quad \ldots (7)$$

$$\text{Analogno:}\ i = e^{-at} \left[f_3(x - vt) + f_4(x + vt)\right] \quad \ldots (8)$$

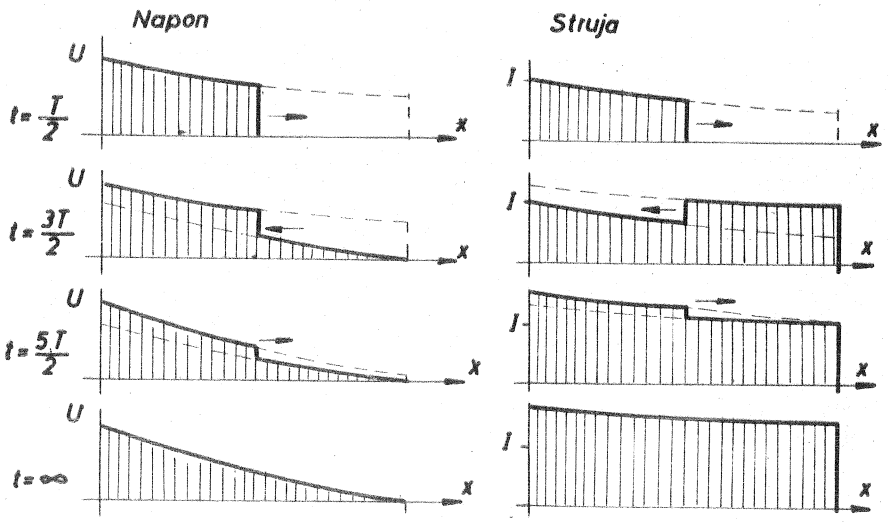
Sl.11. Vod bez izobličenja - izvod

UKAPČANJE VODA BEZ IZOBLIČENJA

Promotrit ćemo prelazne pojave kod ukapčanja voda bez izobličenja na istosmjerni napon. Ukapčanje voda, koji je otvoren na kraju, prikazano je na slici 12, na isti način kao i prije. Posebno objašnjenje slike nije potrebno, jer je postupak isti kao kod idealnog voda, samo umjesto putnih valova s konstantnom amplitudom moramo amplitude smanjivati po eksponencijalnom zakonu.



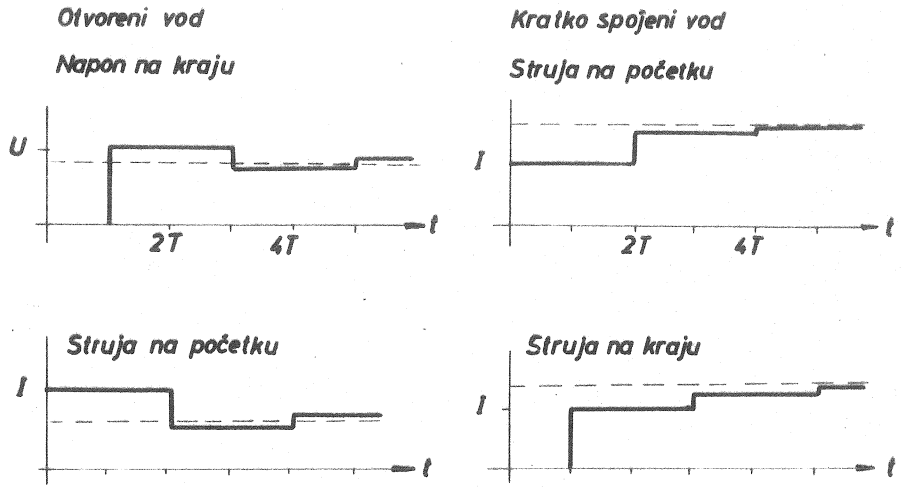
Sl. 12 Ukapčanje otvorenog voda



Sl. 13 Ukopčanje kratko spojenog voda

Vidimo da se postiže konačno stanje, prikazano na najdonjim crtežima, i to tim prije što je prigušenje jače. U konačnom stanju napon pada duž voda zbog pada napona u otporu i to uslijed struje koja teče u vodu. Struja u vodu postoji zbog struje koja teče kroz odvod voda, a kako je odvod jednolično raspodijeljen duž voda, to je i struja u vodu sve manja što smo bliže kraju voda.

Ukapčanje voda bez izobličenja, koji je na kraju kratko spojen, prikazano je na slici 13. Postupak je analogan kao i prije. Konačno stanje za struju i napon prikazano je najdonjim crtežima. Struja u vodu postoji i na kraju, jer se napaja kratki spoj. Struja na početku je veća, jer se napaja odvod voda. Napon pada od početka voda sve do kraja, gdje je jednak nuli, jer je tu kratki spoj.



Sl.14 Vod bez izobličenja oscilogrami

Oscilogrami karakterističnih napona i struja kod ukapčanja voda bez izobličenja prikazani su na slici 14. Vidimo da i napon i struja postepeno postižu konačnu vrijednost, koja je prikazana crtkanom linijom.

Kraj

S V E U Č I L I Š T E U Z A G R E B U

Dr ing. BOŽIDAR STEFANINI

PRIJENOS ELEKTRIČNE ENERGIJE II

I DIO

KRUŽNI DIJAGRAMI PRIJENOSA

ZAGREB 1964

Odobreno rješenjem Komisije za udžbenike i skripta Sveučilišta u Zagrebu
broj 08-46812 od 30. III 1967.

Cijena za studente Sveučilišta u Zagrebu
N. din 5,50

Umnoženo u tiskari izdavačkog odjela Sveučilišta u Zagrebu Trg Maršala Tita 14.
Broj 822

S a d r ž a j

		Strana
OPĆENITO		
1.	Uvod	3
2.	Opće prijenosnog sistema	4
3.	Osnov konstrukcije kružnog dijagrama	7
DIJAGRAM ZA KONSTANTNI NAPON NA OBA KRAJA		
4.	Dijagram za U_2 = konst. i U_1 = konst	11
5.	Dijagram primarne snage S_1	13
6.	Dijagram za vod bez poprečne admitancije	16
7.	Kružnica djelatne primarne snage P_1	18
8.	Kružnica jalove primarne snage Q_1	20
9.	Pravac gubitaka djelatne snage ΔP	22
10.	Pravac gubitaka jalove snage ΔQ	24
11.	Primjer	25
12.	Konstrukcija dijagrama u koordinatnom sistemu snaga	30
DIJAGRAM ZA NAPON NA POČETKU		
13.	Dijagram za U_2 = konst. i $U_1 \neq$ konst.	32
14.	Geometrijska konstrukcija kružnica S_1	35
15.	Kružnice gubitaka djelatne snage ΔP	39
16.	Kružnice gubitaka jalove snage ΔQ	43
17.	Geometrijska konstrukcija kružnice Q_1	50
18.	Geometrijska konstrukcija pravaca Δ	[illegible]
19.	Primjer	[illegible]
20.	Upotreba dijagrama za obrnuti smjer prijenosa	56
21.	Kružnice stepena korisnosti η	58
DIJAGRAM ZA OBA NAPONA PROMJENLJIVA		
22.	Dijagram za $U_2 \neq$ konst. i $U_1 \neq$ konst.	[illegible]
23.	Kružnice relativnih djelatnih gubitaka $\varkappa$	[illegible]
24.	Kružnice relativnih jalovih gubitaka λ	68
25.	Geometrijska konstrukcija kružnice $\varkappa$	[illegible]
26.	Primjer	[illegible]
27.	Geometrijska konstrukcija kružnica ΔP i ΔQ	77
ZAKLJUČNA RAZMATRANJA		
28.	Zaključak	79
OZNAKE U FORMULAMA		80
LITERATURA		82

OPĆENITO

1. Uvod

U brzoj i opsežnoj elektrifikaciji naše zemlje izgradjena je već velika mreža vodova od 110 kV, a studije mreža od 220 kV i projekti 220 kV-nih vodova već su odavno u toku, tako da je izgradnja 220 kV-nih vodova već započela. Kao jedan od zadataka, pri razradi planova naše elektrifikacije, a u vezi s izgradjenim i planiranim mrežama najvišeg napona, nameće se i studij električnih prilika u tim mrežama.

Studij električnih prilika vrši se na temelju odredjivanja stanja na početku i kraju pojedinih vodova, pri čemu se odredjuju osnovne i najvažnije električne veličine (naponi, struje, snage, fazni kutevi i sl.). Osim računskog postupka, koji se zbog dugotrajnosti može primijeniti samo na sasvim jednostavne slučajeve, i postupka pomoću mrežnog analizatora (modela mreže) koji zahtijeva raspolaganje skupocjenom aparaturom analizatora, postoji i postupak pomoću kružnih pogonskih dijagrama. Taj postupak, uz razmjerno jednostavnu pripremu samih kružnih dijagrama za pojedine vodove, omogućuje da se brzo i bez poteškoća odrede potrebne veličine, pogotovo kod razmjerno jednostavnih oblika mreže, kao što je to u današnjem stadiju razvoja slučaj i kod nas.

Kružni dijagram konstruira se posebno za svaki konkretni slučaj prijenosnog sistema, a iz njega se brzo i udobno mogu za razna zadana stanja prijenosa očitati tražene veličine. Prednost ove metode je u tome što se dijagram crta samo jedamput za konkretni prijenosni sistem, jer je on definiran svojstvima sistema, a konstrukcija i crtanje je olakšano time što su linije u dijagramu samo krugovi i pravci. Razna stanja prijenosa električne energije definirana su u dijagramu pripadnim točkama koje omogućuju bez daljnjega očitanje traženih veličina.

Zbog toga je u našim prilikama od velikog interesa da se pitanje konstrukcije i upotrebe kružnih pogonskih dijagrama za električne prijenosne sisteme temeljito razmotri i da se na taj način pripremi alat, koji će sa svoje strane doprinijeti u daljnjem razvoju naše elektrifikacije.

Tom razmatranju je cilj, da postojeći materijal iz literature o kružnim pogonskim dijagramima za vodove odnosno za električne prijenosne sisteme sredi, da matematske izvode potrebne za razumjevanje, konstrukciju i upotrebu dijagrama što više pojednostavi, da kružne dijagrame dopuni i proširi dajući im nove mogućnosti upotrebe, te konačno da dade što jednostavnije metode za konstrukciju kružnih dijagrama za konkretne slučajeve izbjegavajući što je moguće više računske operacije (koje su dugotrajne i mogu lakše dovesti do pogreške) a oslanjajući se što više na geometrijske konstrukcije (koje su brže i manje podložne slučajnim pogreškama).

2. Opće konstante prijenosnog sistema

Poznato je da se prijenosni sistem sa dva kraja (početak i svršetak) može definirati sa t.zv. općim konstantama, koje su kompleksne veličine, /+/ te se mogu označiti na slijedeći način

$$\bar{A} = A/\underline{a} = a' + ja'' \tag{2.1}$$

$$\bar{B} = B/\underline{b} = b' + jb'' \ [\Omega] \tag{2.2}$$

$$\bar{C} = C/\underline{c} = c' + jc'' \ [S] \tag{2.3}$$

$$\bar{D} = D/\underline{d} = d' + jd'' \tag{2.4}$$

Ako veličine na jednom kraju označimo indeksom (1) a na drugom kraju indeksom (2), onda su naponi i struje povezani slijedećim izrazima:

$$\bar{U}_1 = \bar{A}\cdot\bar{U}_2 + \bar{B}\cdot\bar{I}_2 \tag{2.5}$$

$$\bar{I}_1 = \bar{D}\cdot\bar{I}_2 + \bar{C}\cdot\bar{U}_2 \tag{2.6}$$

Ovdje znači: U = napon [V],
I = struja [A].

Kod trofaznih prijenosnih sistema, koji se danas gotovo isključivo upotrebljavaju u tehnici prijenosa električne energije, računat ćemo sa veličinama svedenima na jednu fazu, tj. s faznim naponom, strujom u jednom vodiču i općim konstantama po fazi. Također ćemo pretpostaviti simetrične prilike u sve tri faze, kao što je to redovno slučaj kod normalnih prilika u trofaznom prijenosnom sistemu.

Izraze (2.5) i (2.6) možemo, kao što je poznato, pisati u drugom obliku, i to:

$$\bar{U}_2 = \bar{D}\cdot\bar{U}_1 - \bar{B}\cdot\bar{I}_1 \tag{2.7}$$

$$\bar{I}_2 = \bar{A}\cdot\bar{I}_1 - \bar{C}\cdot\bar{U}_1 \tag{2.8}$$

Izrazi (2.5) do (2.8) služit će nam kao osnova za izradu kružnih dijagrama, pa je za svaki konkretni slučaj potrebno izračunati opće konstante.

Opće konstante za dugi vod mogu se izračunati prema poznatim izrazima

$$\bar{A} = \operatorname{ch}\sqrt{\bar{Z}\cdot\bar{Y}} \tag{2.9}$$

$$\bar{B} = \sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}}\operatorname{sh}\sqrt{\bar{Z}\cdot\bar{Y}}, \tag{2.10}$$

$$\bar{C} = \sqrt{\frac{\bar{Y}}{\bar{Z}}}\operatorname{sh}\sqrt{\bar{Z}\cdot\bar{Y}}, \tag{2.11}$$

$$\bar{D} = \bar{A} = \operatorname{ch}\sqrt{\bar{Z}\cdot\bar{Y}}, \tag{2.12}$$

/+/ Kompleksne veličine bit će označene crticom s gornje strane.

Tu je : $\bar{Z}$ = ukupna uzdužna impedancija voda

$\bar{Y}$ = ukupna poprečna admitancija voda

Odnosno:

$$\bar{Z} = \ell_v(R_o + j\omega L_o) \quad [\Omega] \tag{2.13}$$

$$\bar{Y} = \ell_v(G_o + j\omega C_o) \quad [S] \tag{2.14}$$

gdje je: ℓ_v = dužina voda [km]
R_o = linearni otpor voda [Ω/km]
L_o = linearni induktivitet voda [H/km]
G_o = linearni odvod voda [S/km]
C_o = linearni kapacitet voda [F/km]
ω = kružna frekvencija
$j = \sqrt{-1}$

Za ostale dijelove prijenosnog sistema mogu se takodjer odrediti opće konstante, te iz njih izračunati zajedničke opće konstante za čitav prijenosni sistem. Tako na pr. za prijenosni sistem, sastavljen od dalekovoda s općim konstantama A_V, B_V, C_V i D_V i transformatorima s uzdužnom impedancijom Z_T i poprečnom admitacijom Y_T, koji se nalaze na oba kraja voda, dobijemo slijedeće opće konstante čitavog prijenosnog sistema:

$$\bar{A} = \bar{A}_V + \bar{B}\,\bar{Y}_T + \bar{C}_V\,\bar{Z}_T \tag{2.15}$$

$$\bar{B} = \bar{B}_V + 2\,\bar{A}_V\,\bar{Z}_T + \bar{C}_V\bar{Z}_T^2 \tag{2.16}$$

$$\bar{C} = \bar{C}_V + 2\,\bar{A}\,\bar{Y}_T - \bar{B}\,\bar{Y}_T^2 \tag{2.17}$$

$$\bar{D} = \bar{A}_V + \bar{B}\,\bar{Y}_T + \bar{C}_V\bar{Z}_T \tag{2.18}$$

Izrazi za proračun općih konstanata, kao i za pojedine dijelove prijenosnog sistema, mogu se izračunati odnosno naći već izračunati u literaturi. U to nije potrebno ovdje potanje ulaziti; nama je važno to, da se svaki prijenosni sistem može u zadnjoj liniji definirati sa 4 opće konstante i te moramo u konkretnom slučaju izračunati, jer one čine osnovu za konstrukciju kružnog dijagrama. Postupak za izradu kružnog dijagrama bit će dakle uvijek isti, bez obzira radi li se o jednostavnom ili složenom (i to bez obzira kako složenom) prijenosnom sistemu.

Ovdje treba napomenuti takodjer i poznatu činjenicu da navedene 4 opće konstante nisu medjusobno neovisne, nego da je uvijek ispunjen uslov:

$$\bar{A} \cdot \bar{D} - \bar{B} \cdot \bar{C} = 1 \tag{2.19}$$

Na taj način prijenosni sistem definiran je već sa tri opće konstante, jer četvrta slijedi sama od sebe prema navedenom uslovu. Ako na taj način eliminiramo konstantu $\bar{C}$, ostaje prijenosni sistem definiran konstantama $\bar{A}$, $\bar{B}$ i $\bar{D}$.

Za razliku od konstrukcija kružnih dijagrama, koje se mogu naći u literaturi, a koje sve uvode u svoje formule za proračun potrebnih veličina sve četiri opće konstante, mi ćemo u našim daljnjim izvodima konsekventno raditi samo sa tri opće konstante $\bar{A}$, $\bar{B}$ i $\bar{D}$. To doprinosi jednostavnosti izvoda i konstrukcije, te većoj točnosti i manjoj mogućnosti griješke, pa to pretstavlja već jednu od

prednosti ovdje predloženih izvoda i konstrukcija.

Osim toga postoji još jedna pravilnost izmedju općih konstanata, i to, da kod simetričnih sistema t.j. onih koji su jednaki bez obzira s kojeg se kraja gledaju, vrijedi izraz

$$\bar{A} = \bar{D} \qquad (2.20)$$

Na taj način kod simetričnog sistema možemo eliminirati i konstantu $\bar{D}$, te sistem definirati pomoću same dvije konstante $\bar{A}$ i $\bar{B}$. Takav slučaj imamo na pr. kod dalekovoda, koji je prema tome definiran već pomoću samih izraza (2.9) i (2.10), ali to može biti slučaj i kod složenih prijenosnih sistema, na pr. kod dalekovoda s jednakim transformatorima na oba kraja i sl.

Primjer

Uzmimo prijenosni sistem od 220 kV, koji se sastoji od dalekovoda i transformatora po 120 MVA na oba kraja. Podaci voda : $\ell_v = 250$ km,

$R_o = 0{,}083\ \Omega/\text{km}$, $\omega L_o = 0{,}42\ \Omega/\text{km}$, $\omega C_o = 2{,}7 \cdot 10^{-6}$ S/km,

$G_o = 0{,}1 \cdot 10^{-6}$ S/km. Podaci transformatora: $\bar{Z}_T = 48\underline{/87^\circ}$,

$\bar{Y} = 40 \cdot 10^{-6}\underline{/-82^\circ}$ S.

Opće konstante dalekovoda:

$\bar{Z} = 250\ (0{,}083 + j0{,}42) = 20{,}7 + j\ 105 = 107{,}2\underline{/78{,}8^\circ}$

$\bar{Y} = 250 \cdot 10^{-6}(0{,}1 + j\ 2{,}7) = (25 + j\ 675)\ 10^{-6} = 675 \cdot 10^{-6}\underline{/87{,}9^\circ}$ S

$\bar{Z} \cdot \bar{Y} = 0{,}0722\underline{/166{,}7^\circ}$

Prema izrazima (2.9) do (2.12) dobijemo:

$\bar{A}_v = 0{,}965\underline{/0{,}50^\circ}$

$\bar{B}_v = 106\underline{/78{,}96^\circ}\ \Omega$

$\bar{C}_v = 666 \cdot 10^{-6}\underline{/88{,}06^\circ}$ S

$\bar{D}_v = \bar{A}_v = 0{,}965\underline{/0{,}50^\circ}$

Opće konstante čitavog prijenosnog sistema dobijemo prema izrazima (2.15) do (2.18), i to:

$\bar{A} = 0{,}9406\underline{/0{,}68^\circ} = 0{,}9406 + j\ 0{,}01114$

$\bar{B} = 198{,}0\underline{/83{,}11^\circ} = 23{,}73 + j\ 196{,}4\ \Omega$

$\bar{C} = 594 \cdot 10^{-6}\underline{/86{,}73^\circ} = 33{,}8 \cdot 10^{-6} + j\ 592{,}8 \cdot 10^{-6}$ S

$\bar{D} = \bar{A}$

3. Osnov konstrukcije kružnog dijagrama

Konstrukcija kružnih dijagrama može se provesti na dva načina : ili na bazi napona (dakle u koordinatnom sistemu napona) ili na bazi snaga (dakle u koordinatnom sistemu snaga). Mi ćemo ovdje poći od koordinatnog sistema napona iz razloga što su u tom slučaju izvod i konstrukcija dijagrama jednostavniji i pregledniji, a baš na to polažemo ovdje važnost. Uostalom prelaz od ovako konstruiranog dijagrama na dijagram u koordinatnom sistemu snaga je vrlo jednostavan: dijagram treba samo zarotirati i promijeniti mu mjerilo dužina, što u stvari na samom dijagramu ništa ne mijenja.

Poći ćemo dakle od izraza (2.5), koji glasi

$$\bar{U}_1 = \bar{A}\cdot\bar{U}_2 + \bar{B}\cdot\bar{I}_2 \qquad (3.1)$$

Za sada ćemo konstrukciju dijagrama bazirati na pretpostavki (koja je uostalom u praksi uglavnom ispunjena), t.j. da je napon na kraju voda konstantan. Zbog toga ćemo radi jednostavnosti konstrukcije vektor toga napona položiti u realnu os, pa možemo pisati

$$\bar{U}_2 = U_2 = \text{konst.} \qquad (3.2)$$

Kod konstrukcije kružnih dijagrama prikladno je raditi s relativnim naponima (odnosno s naponima u postocima), a i kod praktičnih zadataka redovito se traže varijacije napona u postocima (dakle relativne vrijednosti). Poći ćemo dakle tim putem i kao osnovu uzeti napon U_2, koji će nam prema tome predstavljati jedinicu odnosno 100 %.

Ako izraz (3.1) podijelimo sa U_2, dobit ćemo

$$\frac{\bar{U}_1}{U_2} = \bar{A} + \frac{\bar{B}}{U_2}\bar{I}_2 \qquad (3.3)$$

Drugi član možemo u brojniku i nazivniku pomnožiti sa U_2, pa dobijemo

$$\frac{\bar{B}}{U_2}\bar{I}_2 = \frac{\bar{B}}{U_2}\bar{I}_2 U_2 = \frac{\bar{B}}{U_2^2}\bar{S}_2,$$ ako je $\bar{S}_2 = \bar{I}_2 U_2$ = prividna snaga na kraju

Izraz (3.3) možemo prema tome pisati

$$\frac{\bar{U}_1}{U_2} = \bar{A} + \frac{\bar{B}}{U_2^2}\bar{S}_2 \qquad (3.4)$$

U taj izraz, prema prije rečenomu, treba uvrstiti fazne napone i snagu koja otpada na jednu fazu. Ako medjutim, predjemo na linijske napone i trofaznu snagu, izraz (3.4) će opet vrijediti, jer na lijevoj strani znaka jednakosti množimo i brojnik i nazivnik sa $\sqrt{3}$, a u drugom članu s desne strane množimo brojnik sa 3, a nazivnik sa $(\sqrt{3})^2 = 3$. Nadalje umjesto s naponima u [V] možemo računati s [kV], ako istodobno snagu ne računamo u [VA] nego u [MVA], što se može analogno dokazati.

Na taj način baratamo s veličinama i mjernim jedinicama, koje su uo-

bičajene kod prijenosa električne energije, što ponovno doprinosi jednostavnosti rada i smanjenju mogućnosti griješke, a ujedno se time izbjegavaju inače potrebna preračunavanja.

Prema tome će nam ubuduće u izrazu (3.4) značiti:

$\bar{U}_1$ = linijski napon na početku [kV],

U_2 = linijski napon na kraju [kV],

$\bar{S}_2$ = prividna snaga na kraju [MVA],

dok će $\bar{B}$, kao i prije, biti izraženo u [Ω].

Prividnu snagu možemo prikazati pomoću djelatne snage P_2 i jalove snage Q_2 pomoću izraza

$$\bar{S}_2 = P_2 + j\,Q_2, \qquad (3.5)$$

pri čemu će nam $+Q_2$ značiti kapacitivnu, a $-Q_2$ induktivnu snagu. Ako na kraju voda imamo čistu djelatnu snagu P_2, t.j. $Q_2 = 0$, onda izraz (3.4) prelazi u

$$\frac{\bar{U}_1}{U_2} = \bar{A} + \frac{\bar{B}}{U_2^2} P_2 \qquad (3.6)$$

Taj izraz prikazan je vektorski na slici 3.1, u kojoj jedinična dužina na realnom pravcu predstavlja ujedno napon na kraju voda. Vektor O_2M predstavlja napon u početku voda po veličini i fazi, a dužina ^2OM predstavlja djelatnu snagu P_2 u nekom drugom mjerilu.

Ako djelatnu snagu P_2 mijenjamo po veličini, to će točka M putovati duž pravca OM, pa taj pravac predstavlja os djelatnih snaga, odnosno pravac definiran izrazom $Q = 0$.

Imamo li naprotiv samo jalovu snagu na kraju voda, t.j. $P_2 = 0$, dobit ćemo izraz

$$\frac{\bar{U}_1}{U_2} = \bar{A} + \frac{\bar{B}}{U_2^2} jQ_2, \qquad (3.7)$$

koji je prikazan na slici 3.2.

Pravac OM na toj slici predstavlja os jalovih snaga, i to lijevo za kapacitivne snage (+Q) a desno za induktivne snage (-Q). Taj je pravac definiran izrazom $P_2 = 0$. Sjedinimo li slike 3.1 i 3.2, kao što je to učinjeno na slici 3.3, imat ćemo u stvari prikazan izraz (3.4), i time smo dobili osnov za crtanje dijagrama.

Osim koordinatnog sistema za napone sa središtem O_2, realnom osi prema desno (ta je os na slici prikazana jediničnom dužinom koja predstavlja napon U_2) i jalovom osi prema gore (ta os nije ucrtana), dobili smo i pomoćni koordinatni sistem za snage s ishodištem O, realnom osi (označenom sa +MW) i jalovom osi (označenom sa +MVar). Svaka točka M u tom drugom koordinatnom sistemu definira odredjenu snagu na kraju prijenosnog sistema, pri čemu je prividna snaga $\bar{S}_2$ dana vektorom OM, djelatna i jalova snaga odsječcima na pripadnim osima, a fazni pomak kutem φ_2 izmedju djelatne osi i vektora OM.

Vektor O_2M opet kao i prije odredjuje napon $\bar{U}_1$ po veličini i fazi, pri čemu je kut izmedju napona $\bar{U}_1$ i $\bar{U}_2$ označen u slici sa δ .

Mjerilo za snage možemo odrediti iz izraza (3.4), (3.6), odnosno (3.7) ako za snage uvrstimo 1 MVA, 1 MW odnosno 1 MVar. Drugi član s desne strane svodi se tada po iznosu na veličinu $\frac{B}{U_2^2}$, i ta duži-

na crtana u mjerilu odabrane jedinice za U_2, predstavlja 1 MVA, 1 MW odnosno 1 MVar.

Konstrukcija kružnog dijagrama, prema do sada rečenome, ide dakle ovim tokom (vidi sliku 3.4)

a) odrede se opće konstante $\bar{A}$, $\bar{B}$ i $\bar{D}$,

b) usvoji se napon U_2 po iznosu,

c) odabere se jedinica, koja prikazuje napon U_2, i nacrta se polazeći iz točke O_2,

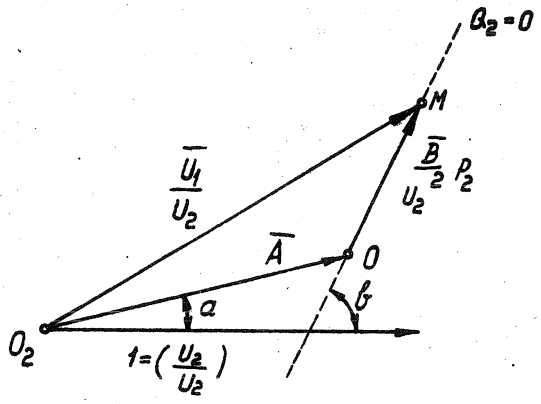
d) nacrta se vektor $\bar{A}$ polazeći iz točke O_2 (i to najjednostavnije pomoću komponenata a' i a'') i time odredi točka O.

e) nacrta se os jalovih snaga pod kutem b i to kroz točku O (najjednostavnije pomoću b' i b'')

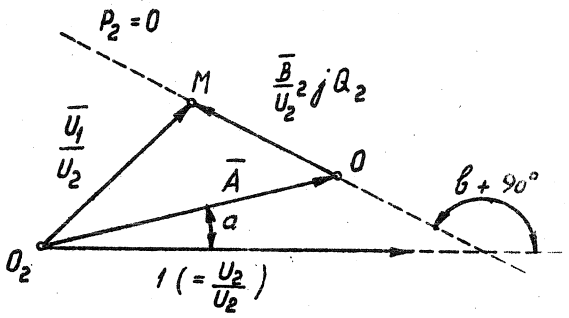
f) nacrta se os djelatnih snaga kroz točku O, i to okomito na jalovu os.

g) izračuna se mjerilo snaga iz izraza $\frac{B}{U_2^2}$, te se skale za snagu unesu za djelatnu i jalovu os.

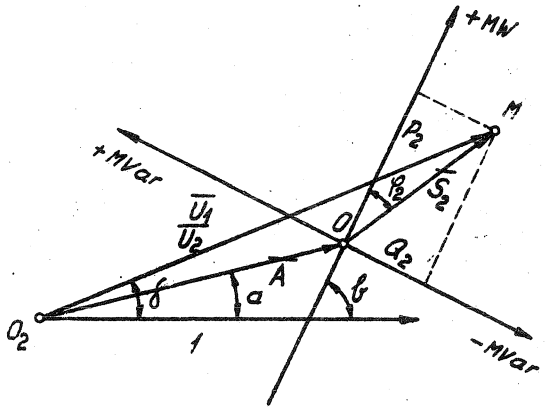
3. I.



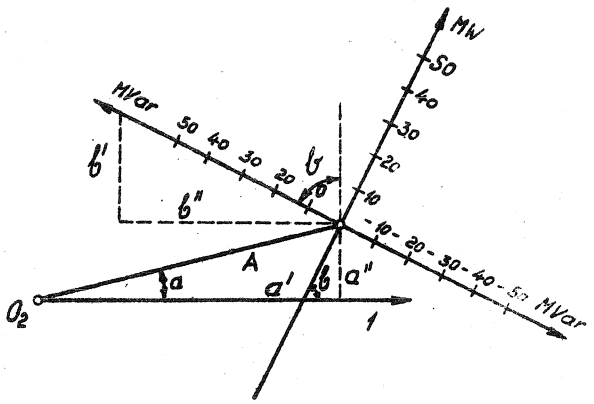
Sl. 3.1. Vektorski prikaz izraza (3.6.)



Sl. 3.2. Vektorski prikaz izraza (3.7)



Sl. 3.3. Osnov kružnog dijagrama.



Sl. 3.4. Prikaz konstrukcije

DIJAGRAM ZA KONSTANTNI NAPON NA OBA KRAJA

4. Dijagram za U_2 = konst. i U_1 = konst.

Do sada smo radili uz pretpostavku, da je U_2 = konst. Ako još pretpostavimo, da je i primarni napon konstantan po iznosu, t.j. da je U_1 = konst. (takav se slučaj prijenosa može tražiti kod voda za međusobno povezivanje dvaju odvojenih sistema), onda će se točka M kretati po kružnici sa središtem u O_2 (vidi slika 4.1). Dijagram daje mogućnost da se za zadane djelatne snage prijenosa P_2 odrede pripadne jalove snage Q_2 uz uslov konstantnih napona na oba kraja.

Radi udobnije upotrebe dijagrama, možemo ga proširiti tako da uvedemo pomoćne linije i to:

pravce P_2 = konst, koji će biti paralelni s jalovom osi,

pravce Q_2 = konst, koji će biti paralelni s djelatnom osi,

pravce cos φ_2 = konst, koji će prolaziti kroz točku O,

krugove S_2 = konst, koji će svi imati središte u O,

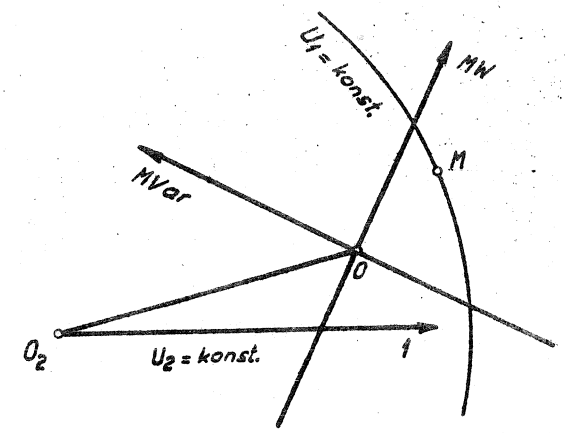
pravce δ = konst, koji će prolaziti kroz točku O_2.

To je prikazano u slikama 4.2 do 4.4.

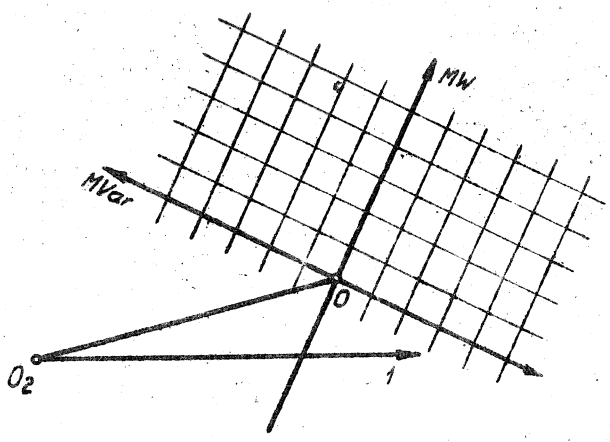
U konkretnom slučaju ucrtat će se samo one pomoćne linije, koje su zaista potrebne, da se dijagram nepotrebno ne učini nepreglednim.

Konstrukcija pomoćnih linija jasna je sama po sebi, i tu ne treba ništa reći. Jedino se za linije cos φ_2 = konst, može preporučiti ova konstrukcija. Nacrta se kružnica sa središtem u O (vidi sliku 4.5), a odsječak, koji ona čini na djelatnoj osi podijeli na 10 dijelova. Odatle se vuku paralele sa jalovom osi do kružnice i kroz dobivena sjecišta vuku pravci iz točke O. Ispravnost ove konstrukcije vidljiva je iz slike. Ova konstrukcija najjednostavnije je provesti pomoću već ucrtanog kruga S_2 = konst, i pravaca P_2 = konst.

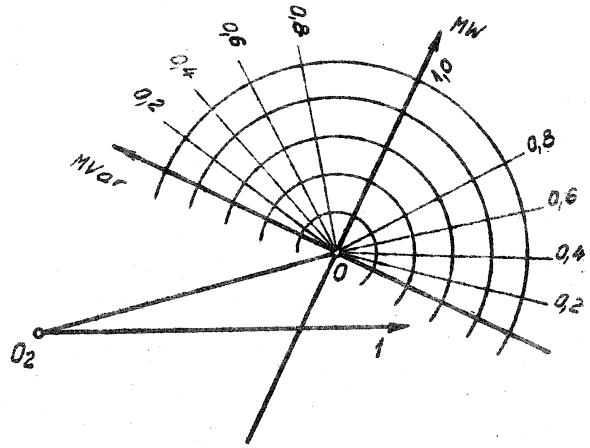
4. I.



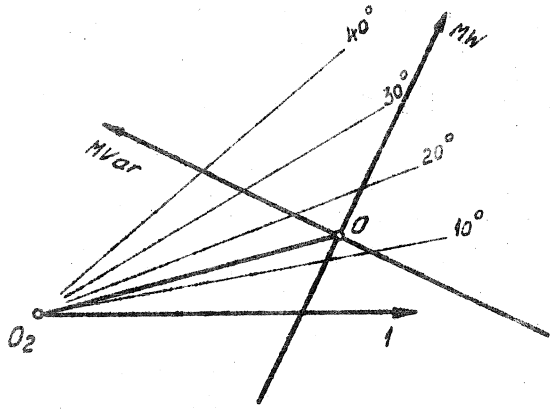
Sl. 4.1. Kružni dijagram za U_2 = konst., U_1 = konst.



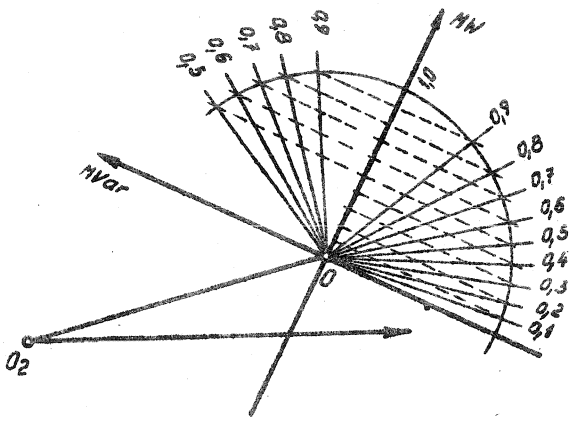
Sl. 4.2. Pravci P_2 = konst i Q_2 = konst.



Sl. 4.3. Pravci cos φ_2 = konst. i krugovi S_2 = konst.



Sl. 4.4. Pravci δ = konst.



Sl. 4.5 Konstrukcija pravaca cos φ_2 = konst.

5. Dijagram primarne snage S_1

Točka M u koordinatnom sistemu snaga definira snagu na kraju prijenosa $\bar{S}_2$. Od interesa je medjutim znati i snagu na početku $\bar{S}_1$, odnosno tu snagu inati na neki način fiksiranu u dijagramu. Najprikladnije će biti, da tu snagu prikažemo nekom točkom u istom koordinatnom sistemu snaga, tako da nije potrebno posebno crtanje linija za konstantne vrijednosti P_1, Q_1, S_1 i $\cos\varphi_1$, nego da se iste linije mogu koristiti i za očitanja u vezi snage na početku.

U tu svrhu poći ćemo od izraza (2.7)

$$\underline{U}_2 = \bar{D}.\,\underline{U}_1 - \bar{B}.\bar{I}_1 \qquad (5.1)$$

Odatle slijedi

$$\bar{B}.\bar{I}_1 = \bar{D}.\underline{U}_1 - \underline{U}_2 \qquad (5.2)$$

Da dobijemo snagu, moramo struju množiti s konjugirano kompleksnim izrazom napona na početku, t.j. sa $\underline{U}_1$. Najbolje je da izraz (5.2) odmah množimo sa $\dfrac{\underline{U}_1}{U_2^2}$, pa dobijemo

$$\frac{\bar{B}}{U_2^2}\cdot\bar{I}_1.\underline{U}_1 = \bar{D}\,\frac{\bar{U}_1.\underline{U}_1}{U_2^2} - \frac{\underline{U}_1}{U_2} \qquad (5.3)$$

Budući da je $\bar{I}_1.\underline{U}_1 = \bar{S}_1$,

a $\bar{U}_1.\underline{U}_1 = U_1^2$, to slijedi

$$\frac{\bar{B}}{U_2^2}\,\bar{S}_1 = \bar{D}\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 - \frac{\underline{U}_1}{U_2} \qquad (5.4)$$

Jednoj odredjenoj vrijednosti za $\bar{S}_2$, definiranoj na dijagramu točkom M, a kojoj pripada napon $\bar{U}_1$, možemo naći pripadnu točku N, koja u istom koordinatnom sistemu definira snagu $\bar{S}_1$, crtajući desnu stranu izraza (5.4), kao što je načinjeno na slici 5.1. Treba dakle od točke O nacrtati vektor $\bar{D}\left(\dfrac{U_1}{U_2}\right)^2$, čime je odredjena točka O_1. Odatle,

treba nacrtati vektor $\left(-\dfrac{\underline{U}_1}{U_2}\right)$, t.j. pod istim kutem δ istu dužinu kao O_2M samo u lijevu stranu. Time se dobije točka N, koja definira snagu $\bar{S}_1$.

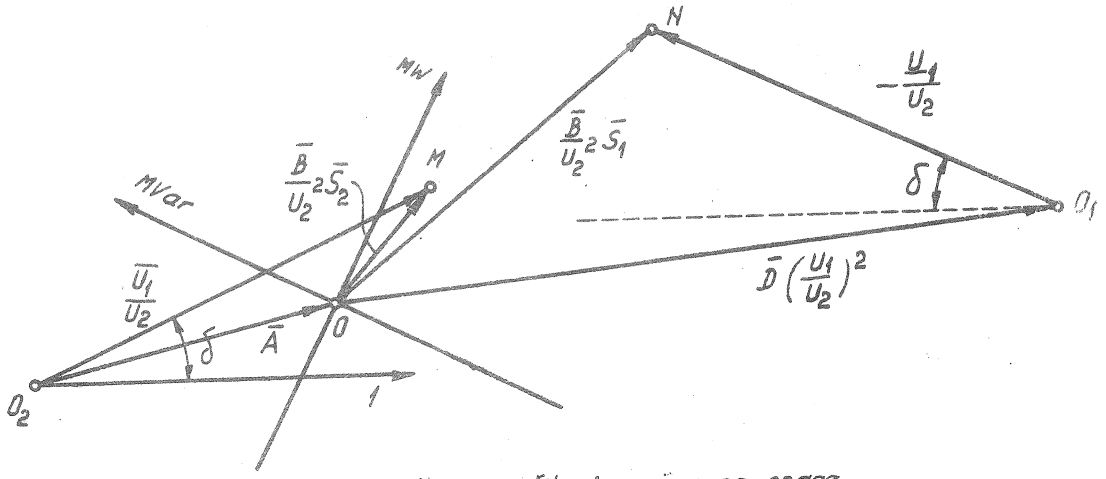
Ako kroz točku M nacrtamo krug snage $\bar{S}_2$ uz $\bar{U}_1$ = konst, kao što smo imali prije, onda će za snagu S_1 pripadne točke ležati na krugu

kroz točku N sa središtem O_1, kao što je nacrtano na slici 5.2. Medjusobno pripadne točke na oba kruga možemo naći pomoću kuteva, koje čine spojnice O_2M, i O_1N sa horizontalom, a koji kutevi moraju biti medju se jednaki. Zbog toga je najbolje vrijednost kuteva δ označiti na samim krugovima, kao što je na slici i učinjeno.

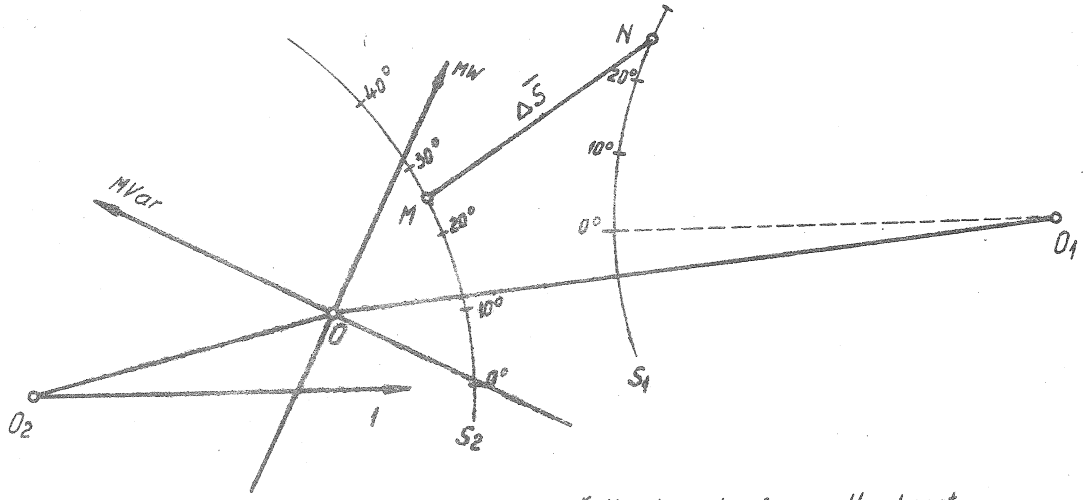
Kod konstrukcije kruga primarne snage pojavljuje se i opća konstanta $\overline{D}$, koja do sada nije dolazila do izražaja. Ako je medjutim prijenosni sistem simetričan, što je definirano sa $\overline{A} = \overline{D}$, onda će točke O_2, O i O_1, ležati na istom pravcu.

Spojnica točaka M i N daje ujedno gubitke prividne snage $\Delta\overline{S}$ u prijenosnom sistemu i to po veličini i po fazi. Projekcija te dužine na djelatnu os daje gubitke djelatne snage ΔP, a projekcija na jalovu os daje gubitke jalove snage ΔQ.

5. I.



Sl. 5. 1. Konstrukcija točke za očitanje primarne snage



Sl. 5. 2. Kružni dijagram snage na početku i na kraju uz U_1 = konst.

6. Dijagram za vod bez poprečne admitancije

Kod vodova manjega napona i manje dužine može se zanemariti poprečna odmitancija, t.j. pretpostaviti da je

$$\bar{Y} = l_v (G_o + j\omega C_o) = 0 \qquad (6.1)$$

U tom slučaju opće konstante prema izrazima (2.9) do (2.12) prelaze u:

$$\bar{A} = 1 \qquad (6.2)$$

$$\bar{B} = \bar{Z} = l_v(R_o + j\omega L_o) \ [\Omega] \qquad (6.3)$$

$$\bar{C} = 0 \qquad (6.4)$$

$$\bar{D} = 1 \qquad (6.5)$$

Kružni dijagram se naravno takodjer pojednostavnjuje, jer točka O pada u vrh jediničnog vektora, a točka O_1 takodjer leži u realnoj osovini (vidi slika 6.1).

Udaljenost OO_1 svodi se na izraz $\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2$, jer je $\bar{D} = 1$ [vidi izraz (5.4)].

Medjusobno pripadne točke M i N na krugovima S_2 i S_1 u ovom slučaju je lako naći, jer je njihova spojnica uvijek paralelna s realnim pravcem O_2O.

U ostalim pojedinostima konstrukcija je ista kao i prije.

Primjer.

Zadan je 60 kV-ni vod, dužine 50 km s vodičima 3x95 mm^2 Cu. Tome odgovara $R_o = 0{,}192\ \Omega/km$, a induktivni otpor pročijenimo na $\omega L_o = 0{,}4\ \Omega/km$,

$$\bar{B} = \bar{Z} = l_v(R_o + j\omega L_o) = 50(0{,}192 + j\ 0{,}4) = 9{,}6 + j\ 20{,}0\ \Omega$$

$$B = \sqrt{9{,}6^2 + 20{,}0^2} = 22{,}2\ \Omega$$

Neka bude $U_2 = 60$ kV, i to predstavljeno jedinicom dužine od 100 mm. Mjerilo snage:

$$\frac{B}{U_2^2} = \frac{22{,}2}{60^2} = 0{,}00617 \text{ jedinica, t.j. } 0{,}617 \text{ mm znači 1 MVA.}$$

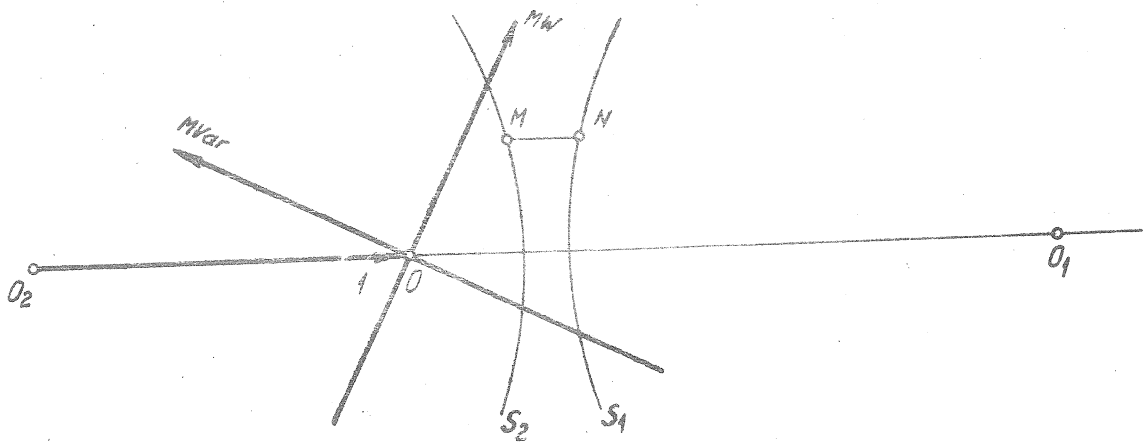
Neka bude $U_1 = 66$ kV, t.j. 110 mm.

Udaljenost središta kruga primarne snage:

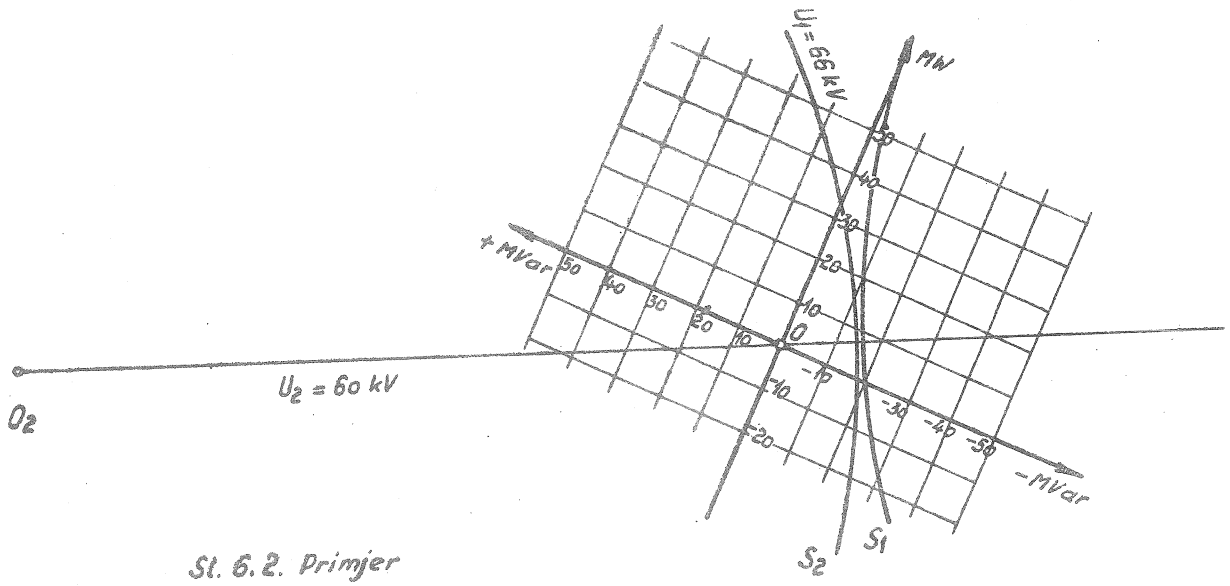
$$\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 = \left(\frac{66}{60}\right)^2 = 1{,}21 \text{ ; tome odgovara dužina 121 mm.}$$

Dijagram je prikazan na slici 6.2.

6.I.



Sl. 6.1. Kružni dijagram za vod bez poprečne admitancije



St. 6.2. Primjer

7. Kružnica djelatne primarne snage P_1

U točki 6, kod voda bez poprečne admitancije, vidjeli smo da kružni dijagram u izvjesnoj mjeri degenerira, a medjusobno pripadne točke M i N na krugovima sekundarne i primarne snage je lako naći, jer im je spojnica paralelna s realnim pravcem. Na taj način otpada potreba crtanja skale za kut δ na krugu S_1, a i sam postupak je jednostavniji i pregledniji.

Kod općenitog voda, gdje je $\bar{Y} \neq 0$, ne možemo postići takvu jednostavnost, ali je moguće postići djelomično pojednostavljenje. Ako se kod dijagrama primarne snage ograničimo na očitanje same djelatne ne snage P_1, onda možemo postići jednostavnost očitavanja na slijedeći način.

Svakoj točki N na krugu S_1 (vidi sliku 7.1) pripada odredjena djelatna snaga P_1, dobivena odsječkom na djelatnoj osi, koji dobijemo kad točku N projiciramo na tu os. Ako točku N, odnosno cijelu kružnicu S_1, pomičemo paralelno sa jalovom osi t.j. sa pravcima P = konst., ne će se na očitanju djelatne snage ništa promijeniti. Možemo ga dakle pomaknuti sve dotle dok točka N ne padne u položaj N' tako da spojnica MN' bude paralelna s realnim pravcem. Tako dobivamo novu kružnicu P_1 sa središtem O_1' na realnom pravcu..

Ta nam kružnica omogućuje lako očitanje primarne djelatne snage P_1 i to tako da od točke M povučemo horizontalu do kruga P_1, gdje dobijemo točku N'. Točka N' nam na familiju pravaca P = konst omogućuje direktno očitanje. Ako imamo samo skalu na djelatnoj osi, onda od N' spustimo okomicu na djelatnu os i dobijemo očitanje.

Konstrukcija kružnice P_1 slijedi iz onoga što je dosada rečeno i to:

Iz točke O_1 povučemo paralelu s pravcima P = konst. do realnog pravca. Sjecište nam daje točku O_1', koja predstavlja središte kružnice P_1, a radius joj je isti kao za kružnicu S_1, t.j. $\frac{U_1}{U_2}$.

Odredjivanje točke O_1' računom.

U sliku 7.2. preneseni su potrebni podaci iz slike 7.1, te slijedi

(uz $\operatorname{tg} b = \frac{b''}{b'}$):

$$O_2O_1' = a' + d' \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 + \left[a'' + d'' \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 \frac{b''}{b'}\right]$$

$$= \frac{a'b' + a''b''}{b'} + \frac{b'd' + b''d''}{b'} \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2$$

Označimo li sa:

$$f = b'd' + b''d'' \qquad (7.1)$$

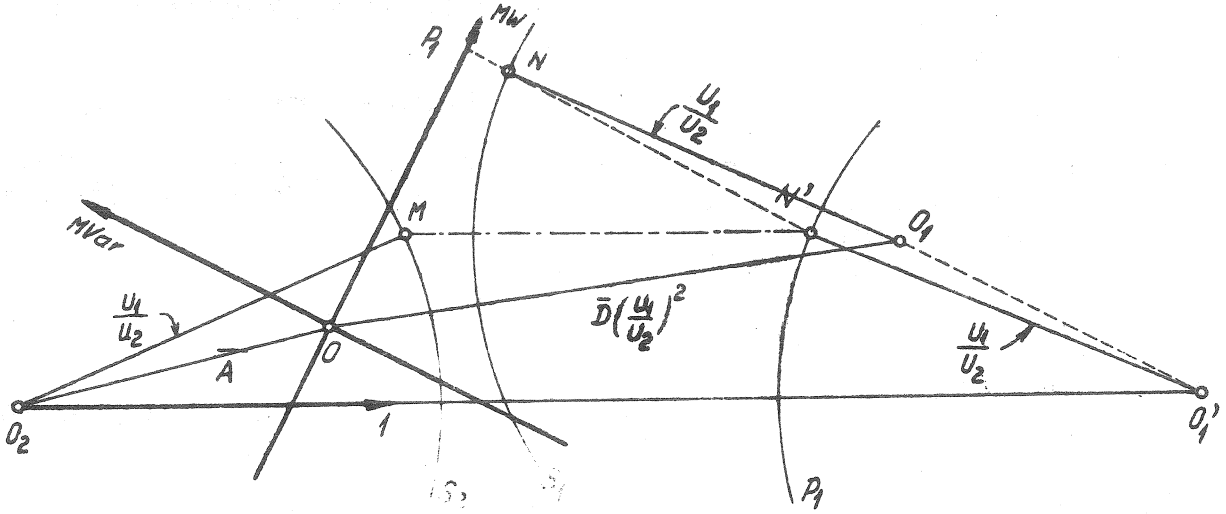
$$g = a'b' + a''b'' \qquad (7.2)$$

dobijemo:

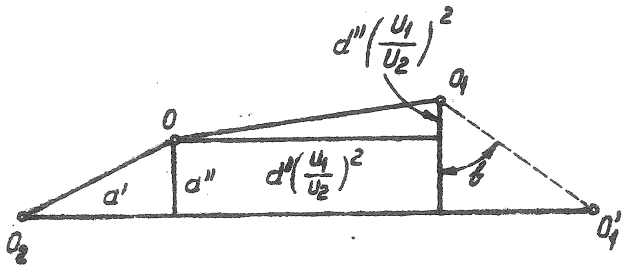
$$O_2O_1' = \frac{g}{b'} + \frac{f}{b'} \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 . \qquad (7.3)$$

Ako je $\bar{A} = \bar{D}$, imamo f=g i dalje $O_2O_1' = \frac{f}{b'} \left[1 + \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2\right]$ (7.4)

7.I.



Sl. 7.1 Konstrukcija kružnice djelatne snage P_1



Sl. 7.2. K određivanja točke O_1'.

8. Kružnica jalove primarne snage Q_1

Analogno kao kružnicu P_1 možemo dobiti i kružnicu Q_1 za očitavanje jalove primarne snage. Korištenje te kružnice će biti opet analogno t.j. od točke M na kružnici S_1 povući ćemo horizontalu do kružnice Q_1, gdje ćemo tako dobiti točku N", koja omogućuje očitanje jalove primarne snage Q_1 (vidi sliku 8.1).

Konstrukcija kružnice Q_1 je potpuno analogna kao za kružnicu P_1, i to:
Iz točke O_1 povučemo paralelu s pravcima Q = konst do realnog pravca. Sjecište nam daje točku O_1'', koja predstavlja središte kružnice Q_1, a radius je opet $\left(\frac{U_1}{U_2}\right)$.

Odredjivanje točke O_1'' računom

U sliku 8.2. preneseni su potrebni podaci iz slike 7.1, te uz $\operatorname{tg} b = \frac{b'}{b''}$ slijedi:

$$O_2O_1'' = a' + d' \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 - \left[a'' + d'' \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2\right] \frac{b'}{b''}$$

$$= \frac{a'b''-a''b'}{b''} + \frac{d'b'' - d''b'}{b''} \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2$$

Označimo li sa

$$h = d'b'' - d''b' \qquad (8.1)$$

$$j = a'b'' - a''b' \qquad (8.2)$$

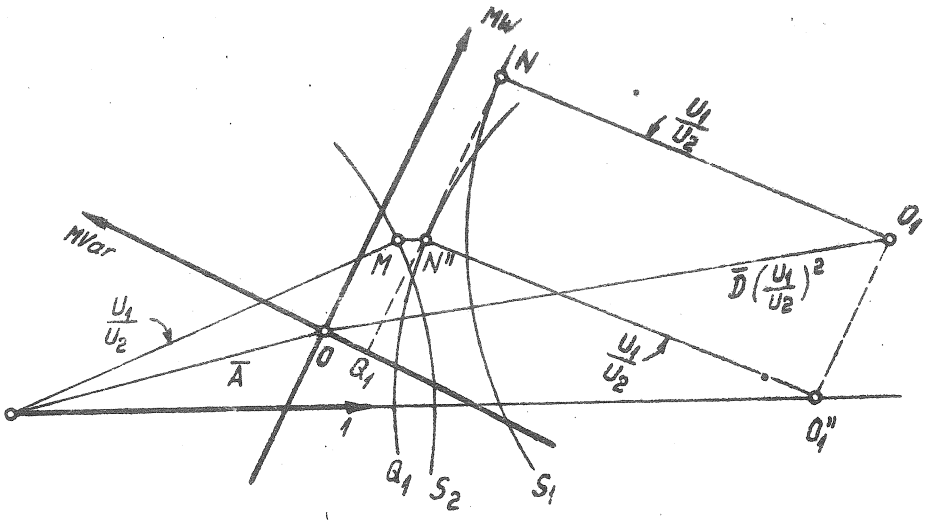
dobijemo

$$O_2O_1'' = \frac{j}{b''} + \frac{h}{b''} \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2. \qquad (8.3)$$

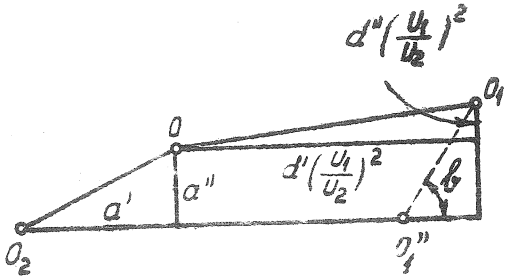
Ako je $\overline{A} = \overline{D}$, imamo h = j i dalje:

$$O_2O_1'' = \frac{h}{b''} \quad 1 + \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 \qquad (8.4)$$

8.I.



Sl. 8. 1. Konstrukcija krušnice jalove snage Q_1



Sl. 8.2. K odredivanje točke O_1''

9. Pravac gubitaka djelatne snage ΔP

Kao što smo vidjeli, spojnica medjusobno pripadnih točaka M i N na krugovima i primarne snage daje gubitke prividne snage $\Delta \bar{S}$ i to po veličini i fazi. Projekcije te spojnice na djelatnu i jalovu os daju djelatne odnosno jalove gubitke.

Spojnica izmedju točke M na kružnici S_2 i točke N' na kružnici P_1 ne daje sama po sebi neke gubitke, ali njezina projekcija na djelatnu os daje djelatne gubitke ΔP. Kako je medjutim spojnica MN' uvijek horizontalna to prema slici 9.1 slijedi

$$MN' = \frac{\Delta P}{\cos b} \qquad (9.1)$$

Ta dužina daje nam u nekom mjerilu gubitke ΔP, a da nju odredimo nije potrebno crtati kružnicu P_1. Dovoljno je nacrtati simetralu dužine MN' (a to je ujedno simetrala dužine O_2O_1'), što nam omogućuje da odredimo udaljenost od točke M do te simetrale, koja prema izrazu (9.1) iznosi:

$$\frac{\Delta P}{2 \cos b} = \frac{\Delta P}{2} \cdot \frac{B}{b'} . \qquad (9.2)$$

Simetrala dužine O_2O_1' predstavlja pravac gubitaka djelatne snage ΔP i udaljenost točke M do njega daje nam gubitke ΔP u promijenjenom mjerilu, gdje za 1MW odgovara dužina:

$$1 \text{ MW} \rightarrow \frac{B}{U_2^2} \cdot \frac{1}{2 \cos b} = \frac{B}{U_2^2} \cdot \frac{B}{2 b'} \qquad (9.3)$$

Pravac ΔP omogućuje nam točnije očitanje gubitaka djelatne snage, jer se redovito dobije povećano mjerilo.

Konstrukcija je jednostavna, jer treba odrediti točku O_1' prema prije rečenome, a onda samo konstruirati simetralu O_2O_1' i izračunati novo mjerilo. To se mjerilo radi lakšeg očitanja može nacrtati na realni pravac ili paralelno s njim (slika 9.2), a može se eventualno i prenijeti na kružnicu S_1, tako da točka M direktno na toj skali daje djelatne gubitke.

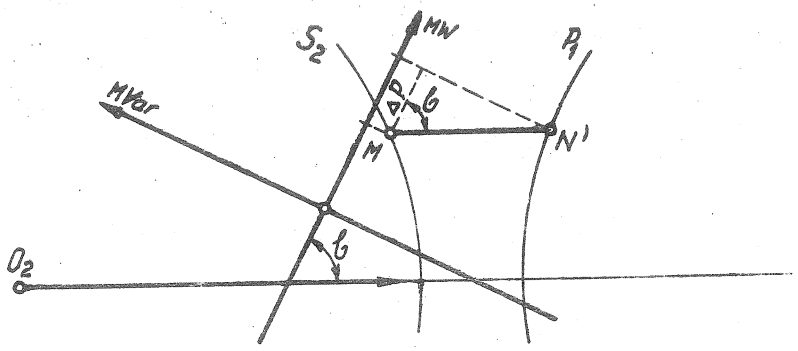
Ako točka O_1' pada izvan papira, može se iz točke O_2 nacrtati vektor $\bar{D}(\frac{U_1}{U_2})^2$, raspoloviti dužina od točke O do njegova vrha i odatle vući paralelu s pravcima P = konst do realnog pravca, te tako dobiti položaj pravca ΔP (slika 9.3).

Odredjivanje pravca ΔP računom slijedi prema izrazu (7.3), jer je njegova udaljenost od točke O_2 jednaka

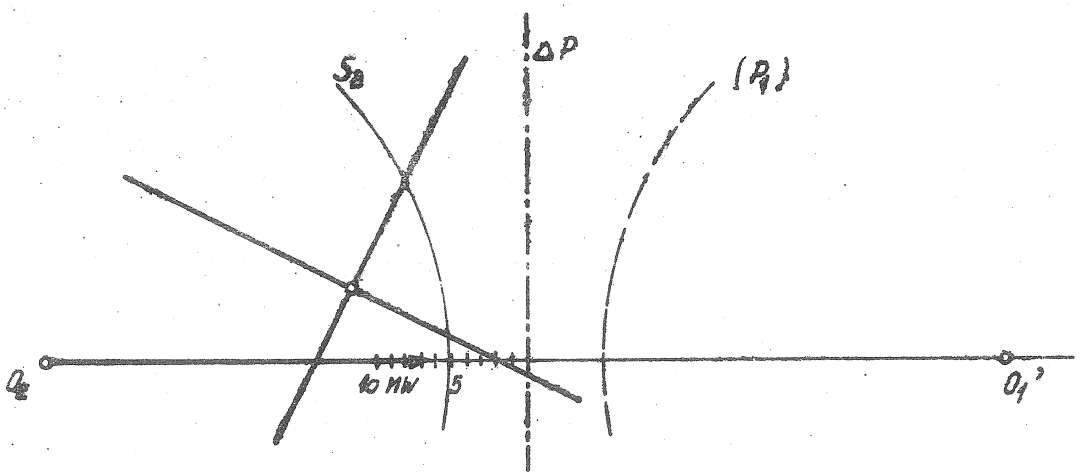
$$\frac{1}{2} O_2O_1' = \frac{1}{2} \left[\frac{g}{b'} + \frac{f}{b'} \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2 \right] \qquad (9.4)$$

U slučaju da je $\bar{A} = \bar{D}$, a $U_1 = U_2$, prolazit će pravac ΔP kroz sjecište realnog pravca sa pravcem $P = 0$. To slijedi direktno iz prijašnje konstrukcije.

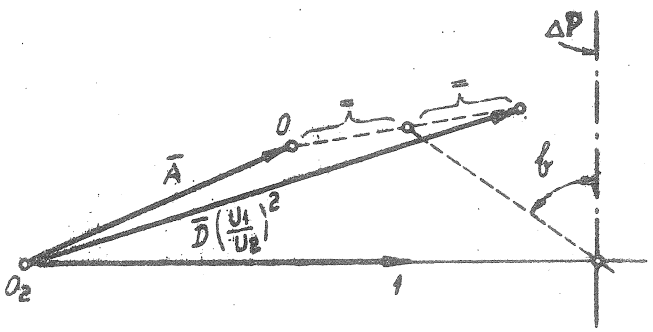
9. I.



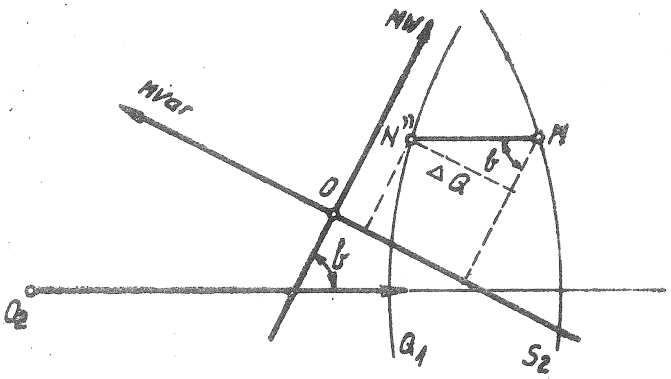
Sl. 9.1. K određivanje pravca ΔP.



Sl. 9.2. Pravac ΔP i mjerilo za ΔP.



Sl. 9.3. Konstrukcija pravca ΔP.



Sl. 10.1. K određivanje mjerila za ΔQ.

10. Pravac gubitaka jalove snage ΔQ

Analogno kao u točki 9. možemo nacrtati pravac gubitaka jalove snage ΔQ, koji se dobije kao simetrala dužine $0_2 0_1''$. Ako se postupi analogno kao na slici 9.3. treba dakako vući paralelu sa pravcima Q = konst.

Kod odredjivanja položaja pravca ΔQ računom, njegova udaljenost od točke 0_2 slijedi prema izrazu (8.3):

$$\frac{1}{2} 0_2 0_1'' = \frac{1}{2} \left[\frac{j}{b''} + \frac{h}{b''} \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2 \right] \qquad (10.1)$$

Mjerilo možemo odrediti prema slici 10.1, jer je

$$\frac{1}{2} MN'' = \frac{\Delta Q}{2 \sin b} = \frac{\Delta Q}{U_2^2} \frac{B}{2 b''} \qquad (10.2)$$

Prema tome za 1 MVar odgovara dužina:

$$1 \text{ MVar } \frac{B}{U_2^2} \frac{1}{2 \sin b} = \frac{B}{U_2^2} \cdot \frac{B}{2 b''} \qquad (10.3)$$

Što se tiče ucrtavanja mjerila, možemo postupiti kao i prije.

Nepovoljna strana upotrebe pravca ΔQ jest, što je mjerilo za gubitke sitnije nego za same snage, i to zato što je obično sin b dosta veliko.

Ako je $\overline{A} = \overline{D}$, a $U_1 = U_2$, prolazit će pravac ΔQ kroz sjecište realnog pravca sa pravcem Q=0.

11. Primjer

Uzmimo isti prijenosni sistem od prije, s općim konstantama:

$\bar{A} = 0,9406 \angle 0,68^{\circ} = 0,9406 + j\,0,01114$

$\bar{B} = 198,0 \angle 83,11^{\circ} = 23,73 + j\,196,4 \ \Omega$

$\bar{D} = \bar{A}$

Usvojimo napon U_2 = 220 kV i jedinicu dužine 100 mm.

Mjerilo snage:

$$\frac{B}{U_2^2} = \frac{198}{220^2} = 0,00409, \text{ t.j. } 100 \cdot 0,00409 = 0,409 \text{ mm za 1 MVA.}$$

Odaberimo napon U_1 = 242 kV, čemu odgovara dužina:

$$100 \frac{U_1}{U_2} = 100 \frac{242}{220} = 100 \cdot 1,1 = 110 \text{ mm}$$

Udaljenost središta kružnice primarne snage

$$D \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 = 0,9406 \cdot 1,1^2 = 1,14, \text{ t.j. } 100 \cdot 1,14 = 114 \text{ mm}$$

Dijagram s ucrtanom kružnicom S_1 prikazan je na slici 11.1.

Konstrukcijom dobijemo točke O_1' i O_2'', a isto možemo dobiti i računom:

$f = b'd' + b''d'' = 23,73 \cdot 0,9406 + 196,4 \cdot 0,01114 = 24,49$

$$O_2O_1' = \frac{f}{b'}\left[1 + \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2\right] = \frac{24,49}{23,73}\left[1+1,1^2\right] = 2,28, \text{ t.j. } 228 \text{ mm}$$

$h = d'b'' - d''b' = 0,9406 \cdot 196,4 - 0,01114 \cdot 23,73 = 184,5$

$$O_2O_1'' = \frac{h}{b''}\left[1+\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2\right] = \frac{184,5}{196,4}\left[1+1,1^2\right] = 2,075, \text{ t.j. } 207,5 \text{ mm}$$

Dijagram s ucrtanim kružnicama P_1 i Q_1 prikazan je na slici 11.2.

Konstrukcijom možemo odrediti položaj pravaca ΔP i ΔQ ili to dobiti računom:

$$\frac{1}{2} O_2O_1' = 1,14, \text{ t.j. } 114 \text{ mm}$$

$$\frac{1}{2} O_2O_1'' = 1,037, \text{ t.j. } 103,7 \text{ mm}$$

Mjerilo za gubitke djelatne snage

$$1 \text{ MW} \rightarrow \frac{B}{U_2^2} \frac{B}{2b'} = 0,00409 \frac{198}{2 \cdot 23,73} = 0,0171, \text{ t.j. } 1,71 \text{ mm}$$

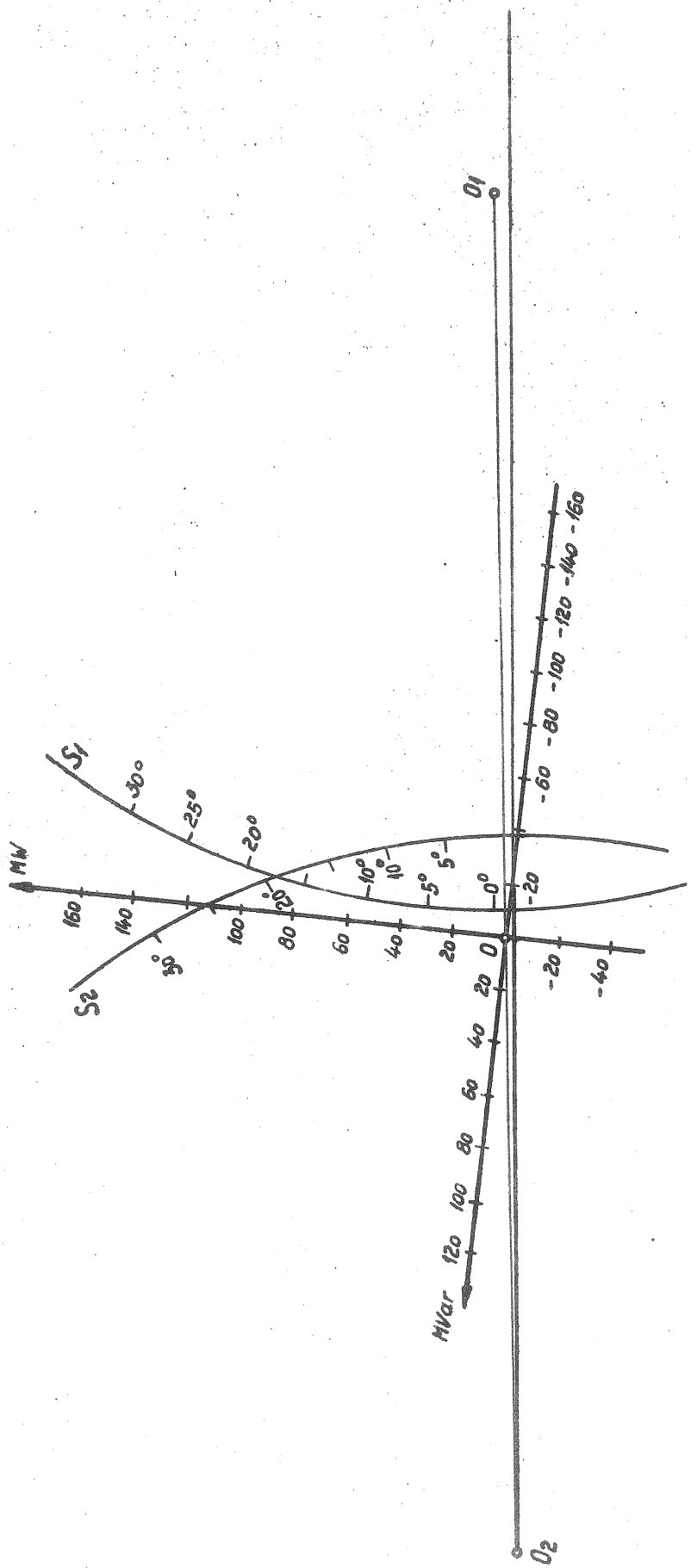
Mjerilo za gubitke jalove snage

$$1\ \text{MVar} \rightarrow \frac{B}{U_2^2} \quad \frac{B}{2\ b''} = 0{,}00409 \quad \frac{198}{2.196{,}4} = 0{,}00207, \text{ t.j. } 0{,}207 \text{ mm}$$

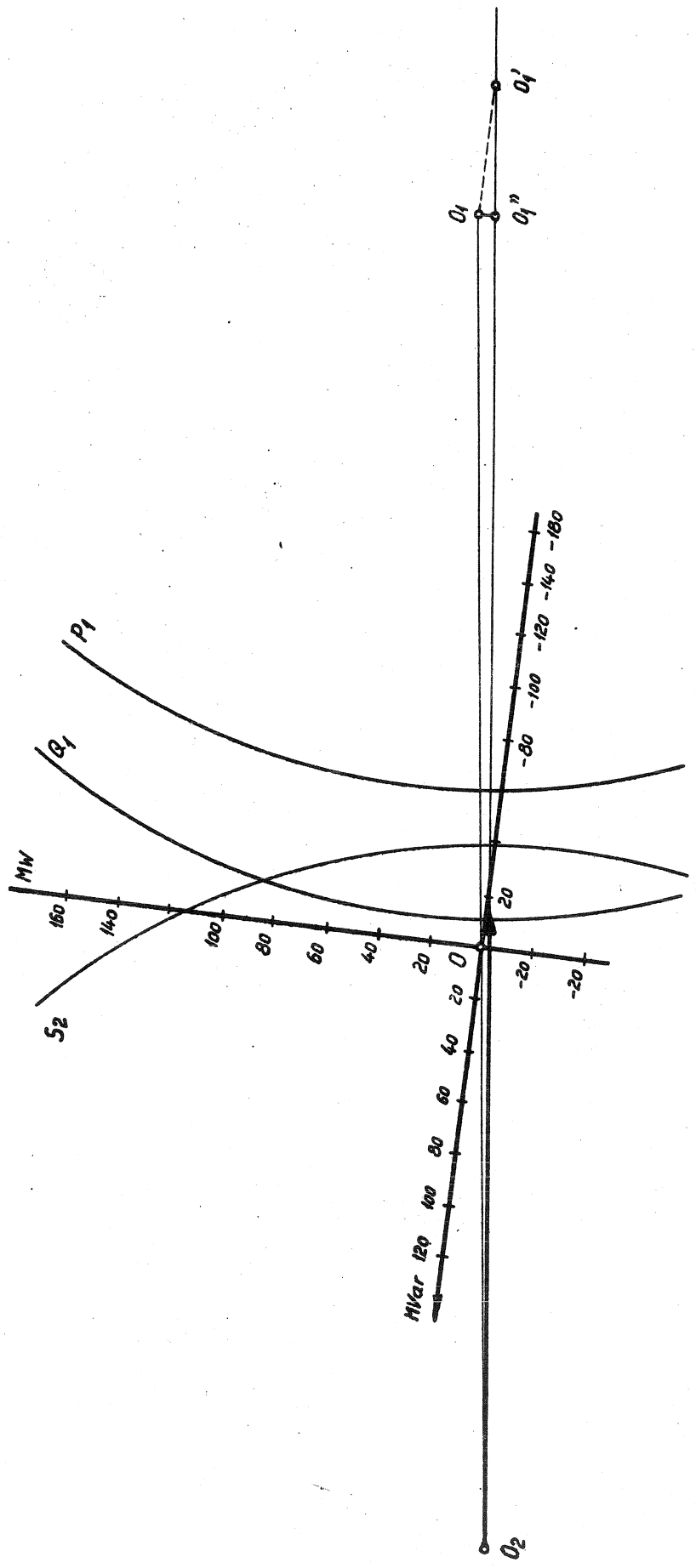
Dijagram s ucrtanim pravcima ΔP i ΔQ prikazan je na slici 11.3.

Da li ćemo u dijagram ucrtati kružnicu S_1, ili kružnice P_1 i Q_1, ili pak ΔP i ΔQ, ovisi u svakom konkretnom slučaju o tome, što će nam biti zgodnije za rad s dijagramom.

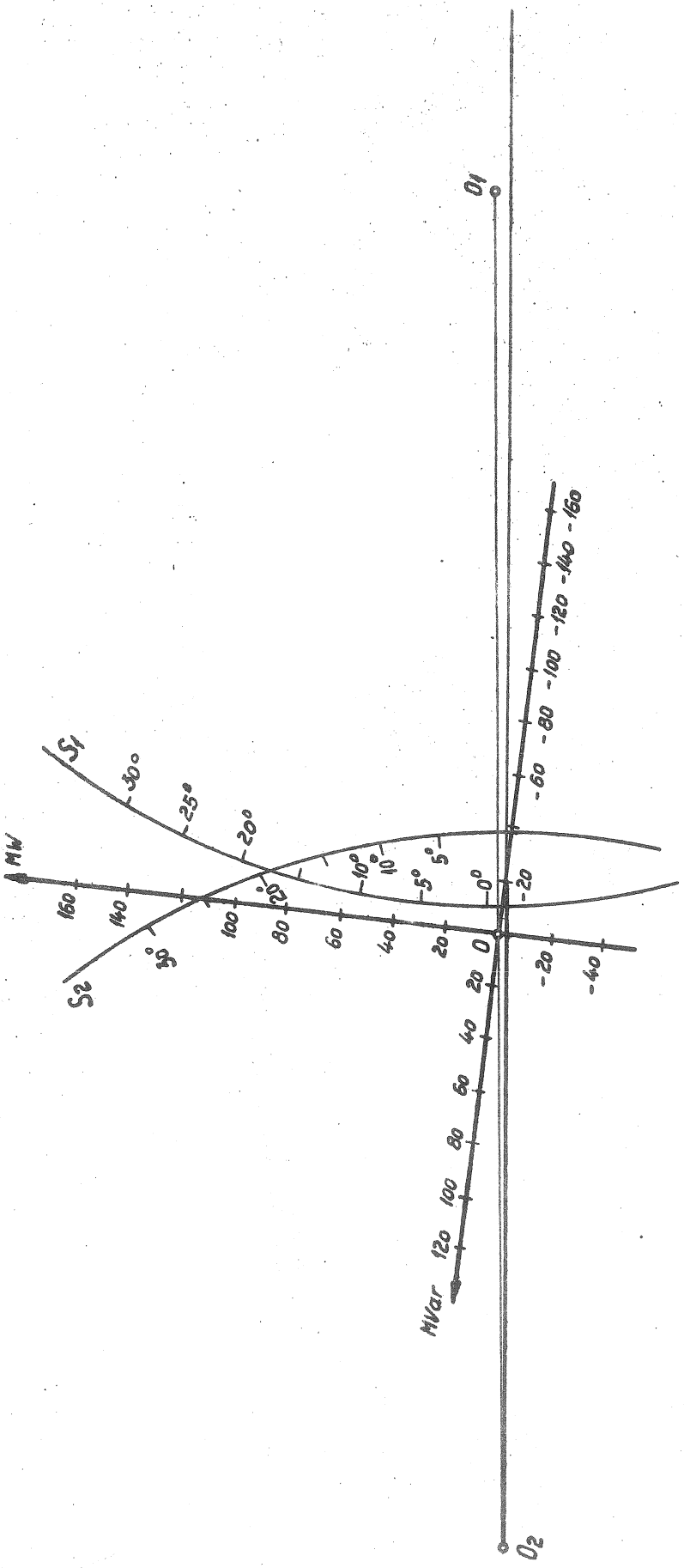
11. I.



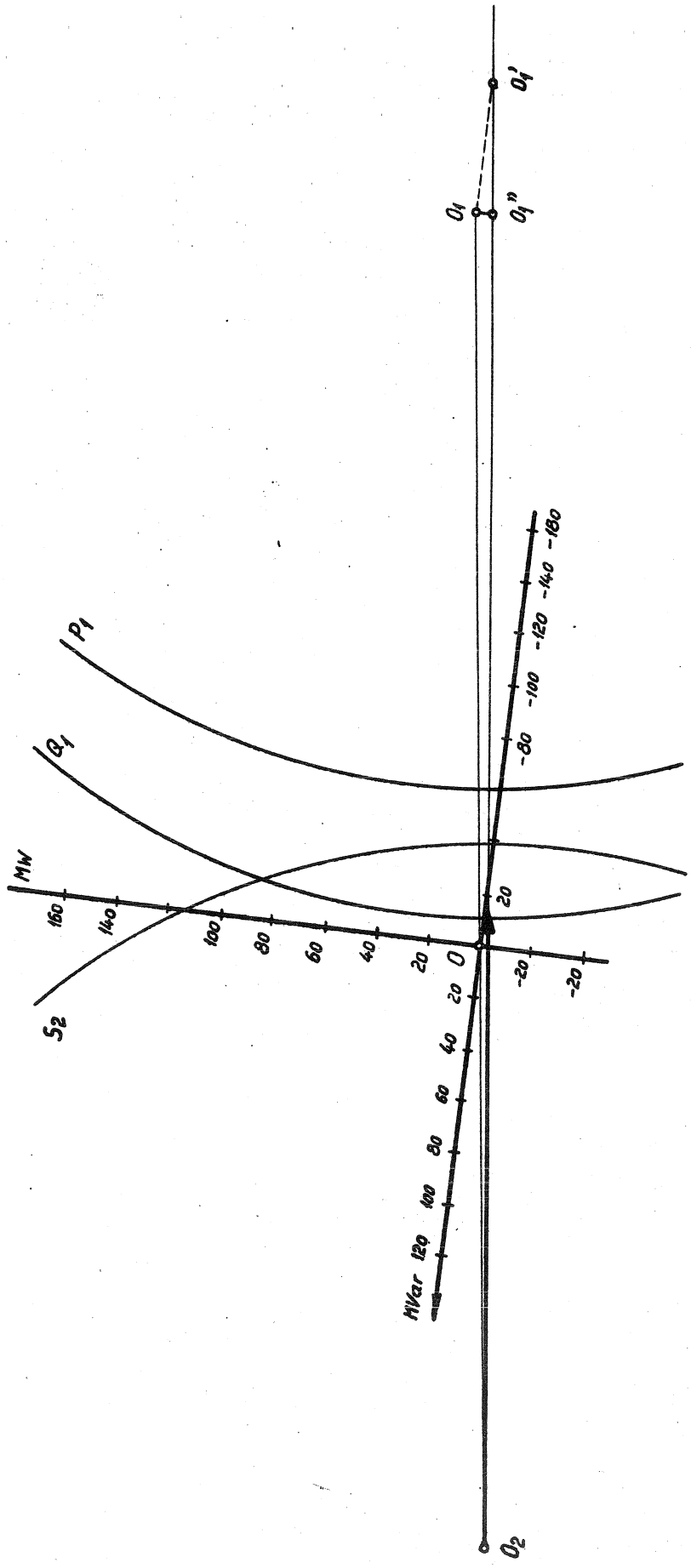
Sl. 11. 1. Primjer



Sl. 11.2. Primjer

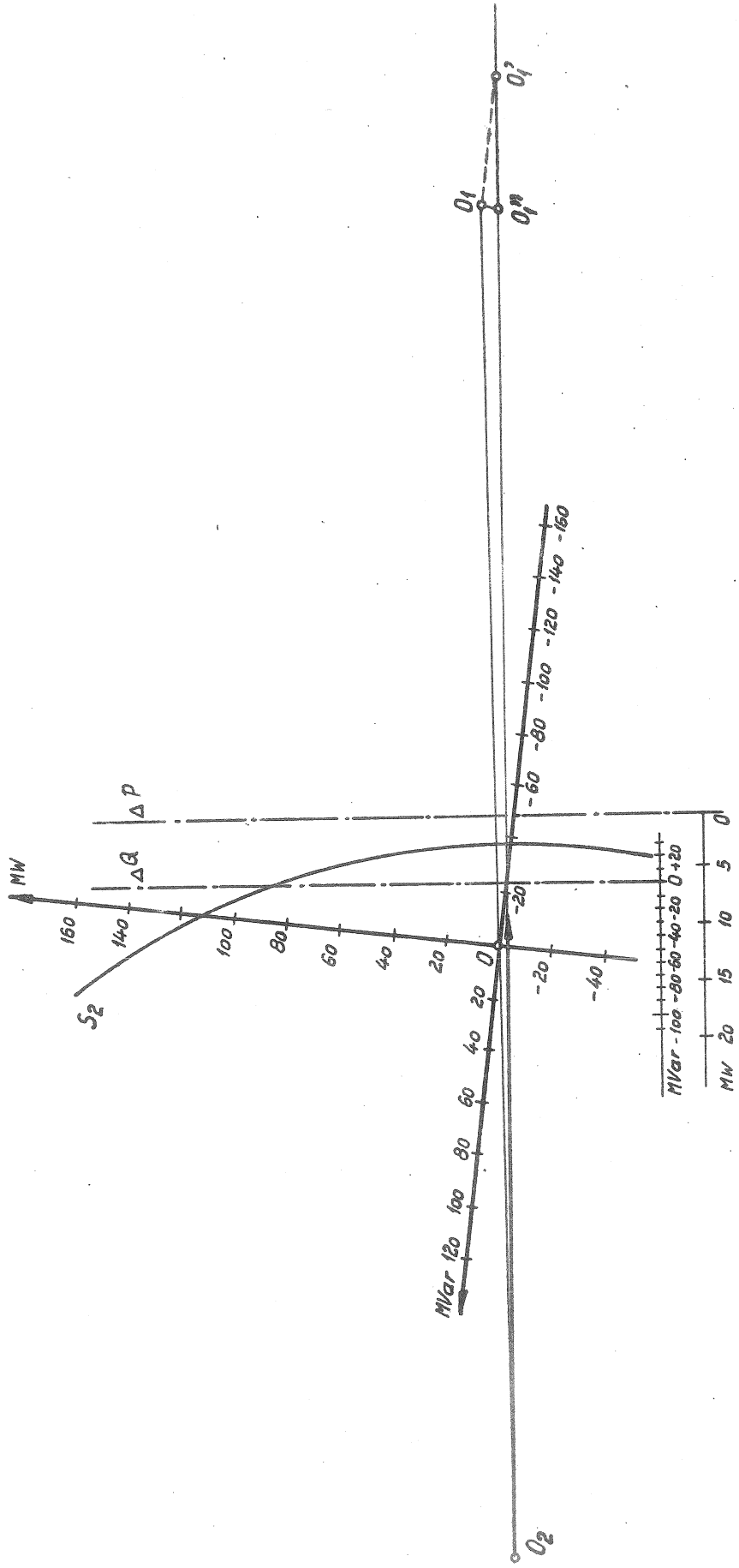


Sl. 11.1. Primjer



Sl. 11. 2. Primjer

11. III.



Sl. 11. 3. Primjer

12. Konstrukcija dijagrama u koordinatnom sistemu snaga

Kao što je rečeno u točki 3., može se dijagram konstruirati i u koordinatnom sistemu snaga, što ima tu prednost da se za koordinatni sistem snaga može upotrebiti milimetarski papir ili slično. Želimo li iskoristiti jednostavni izvod i konstrukciju, koji su prije izvedeni, za crtanje dijagrama direktno u koordinatnom sistemu snaga, to možemo postupiti ovako:

Postavimo koordinatni sistem za snage i odaberemo mjerilo, te ucrtamo skale snaga odnosno pravce P = konst i Q = konst. Dalje postupamo u smislu konstrukcije na slici 3.4, i to (slika 12.1):

a) iz ishodišta O nacrtamo pravac pod kutem b (najlakše pomoću b' i b").

b) na taj pravac nanesemo dužinu a', a okomito na nju a". Ako te dužine nanosimo u mjerilu snaga, onda ih moramo preračunati na:

$$a' \frac{U_2^2}{B} \text{ odnosno } a'' \frac{U_2^2}{B} \text{ MVA},$$

kako bismo uvažili različita mjerila.
Na taj način dobijemo točku O_2, t.j. središte kružnica S_2.

c) nadalje povučemo pravac iz točke O_2 paralelno s dužinom $^2a'$, i nanesemo dužinu $\frac{U_2^2}{B}$. To odgovara prijašnjem jediničnom pravcu.

Time je stvorena podloga za daljnju konstrukciju, koja dalje teče isto kao i prije.

Primjer

Uzmemo iste polazne podatke kao prije.

Neka 1 MVA predstavlja dužina 0,5 mm.

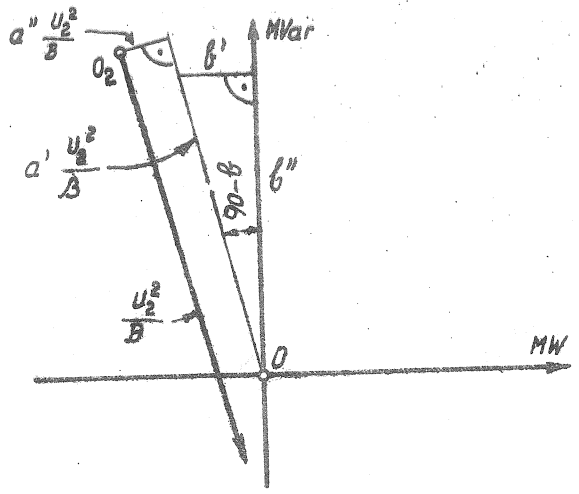
Nadalje neda bude U_2 = 220 kV, dakle

$$\frac{U_2^2}{B} = \frac{220^2}{198} = 244 \text{ MVA, t.j. } 122 \text{ mm}$$

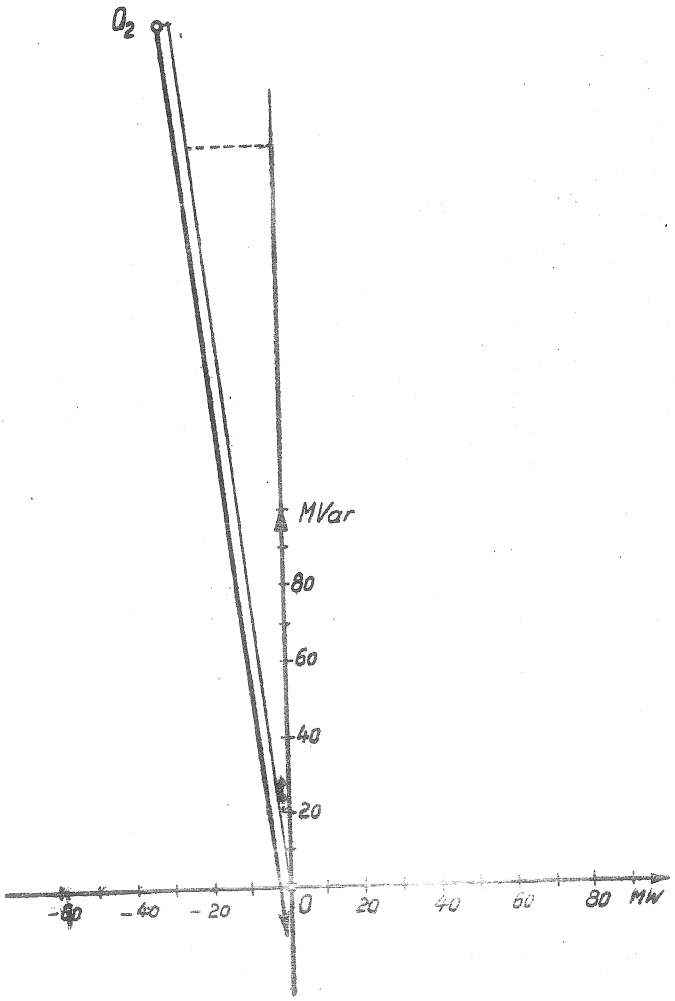
$$a'' \frac{U_2^2}{B} = 0{,}01114.244 = 2{,}7 \text{ MVA, t.j. } 1{,}35 \text{ mm}$$

To je prikazano na slici 12.2.

12. I.



Sl. 12.1. Konstrukcija u koord. sistemu snaga



Sl. 12.2. Primjer

DIJAGRAM ZA PROMJENLJIVI NAPON NA POČETKU

13. Dijagram za U_2 = konst i $U_1 \neq$ konst.

Ako primarni napon U_1 nije konstantan, onda se točka M koja karakterizira pogonsko stanje voda i daje očitanje snage $\bar{S}_2$ ne kreće samo po jednoj kružnici, nego može zauzeti općenito bilo koji položaj u dijagramu.

Spojnica O_2M dat će, medjutim, opet napon U_1 po veličini i fazi, pa radi lakšeg očitanja te vrijednosti možemo nacrtati u dijagramu familiju kružnica za različite U_1 = konst. (slika 13.1). Te se kružnice obično ucrtaju i označe u postotcima od napona U_2. Radi očitavanja kuta δ možemo narisati pramen pravaca kao na slici 4.4, ili na pojedinim kružnicama U_1 = konst. možemo ucrtati skale za kut δ.

Analogno prijašnjemu možemo crtati i familiju kružnica U_1 = konst. za primarnu snagu $\bar{S}_1$. Radiusi će biti isti kao kod kružnica za $\bar{S}_2$, a središta će ležati na pravcu, definiranom putem vektora $\bar{D}$ crtanog iz točke O. Udaljenost središta od točke O dobijemo kao i prije iz izraza

$$\bar{D}\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 \qquad (13.1)$$

Za očitanje kuteva δ na tim kružnicama, moramo na svaku kružnicu ucrtati posebu skalu, jer linije δ = konst nisu pravci (slika 13.2).

Dvije medjusobno pripadne točke M i N za očitanje snage $\bar{S}_2$ odnosno $\bar{S}_1$ leže na kružnicamo za isti U_1 pri čemu i δ mora biti isti.

U slučaju da je $\bar{A} = \bar{D}$, leže sva središta kružnica na istom pravcu, t.j. na produženju dužine O_2O. Kod voda bez poprečne admitancije ($\bar{Y} = 0$) leže sva središta na realnom pravcu.

Radi lakšeg očitanja primarne djelatne i jalove snage možemo analogno rečenome u točki 7. i 8. nacrtati familije kružnica P_1 i Q_1. Ako je $\bar{Y} = 0$ onda se pripadne kružnice S_1, P_1 i Q_1, t.j. one koje odgovaraju istoj vrijednosti U_1, medjusobno poklapaju.

Primjer:

Uzmimo iste podatke od prije i nacrtajno kružnice U_1 = konst. za primarnu i sekundarnu snagu.

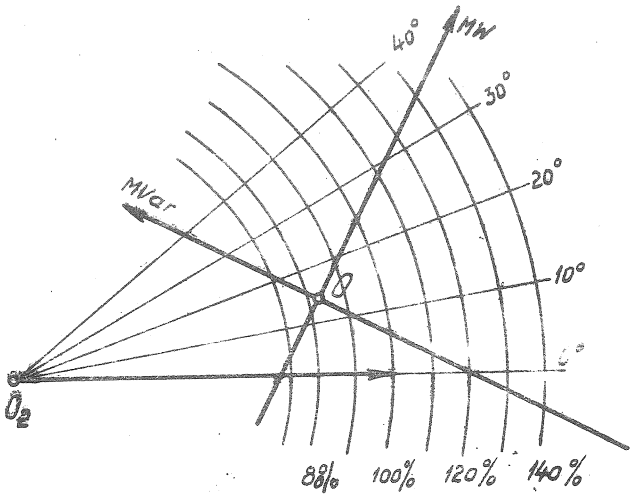
Radius kružnica u mm odgovara brojčanoj vrijednosti za U_1 u postocima, jer smo za U_2 odabrali dužinu 100 mm.

Udaljenosti središta ($D = 0{,}9406$):

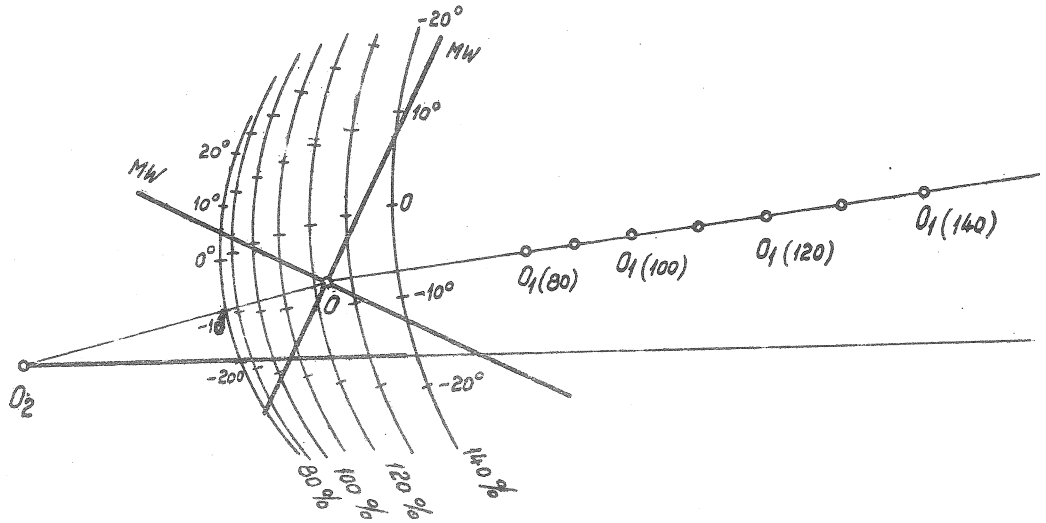
$\frac{U_1}{U_2}$ =	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
$D\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2$ =	60,2	76,2	94,1	113,9	135,6	159,0	184,4 mm

Dijagram je prijazan na slici 13.3.

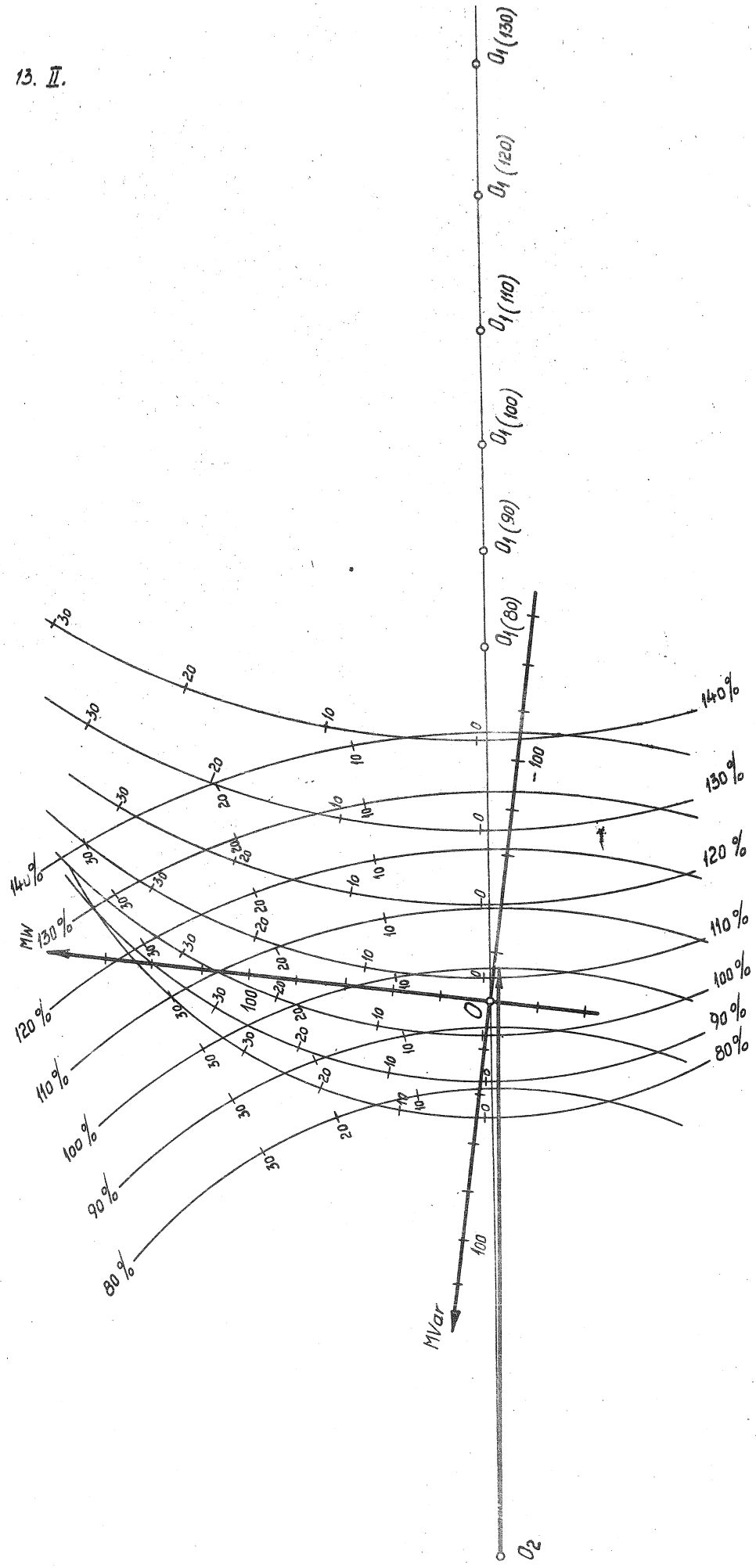
13. I.



Sl. 13.1. Kružnice U_1 = konst. za snagu S_2



Sl. 13.2. Kružnice U_1 = konst. za snagu S_1



Sl. 13. 3. Primjer

14. Geometrijska konstrukcija kružnica S_1

Ako na slici 13.3 spojimo sjecišta medjusobno pripadnih kružnica S_2 i S_1 (t.j. kružnica za isti U_1), vidimo da smo dobili opet jednu kružnicu. Ovo će se, medjutim, dogoditi samo u slučaju ako je $\overline{A} = \overline{D}$. Kako je u većini slučajeva taj uslov ispunjen, vrijedi ovo potanje razmotriti.

Budući da sva središta kružnica U_1 = konst. leže na pravcu O_2O, to geometrijsko mjesto sjecišta mora biti simetrično obzirom na taj pravac. Položit ćemo dakle koordinatni sistem kroz točku O_2 tako, da os x padne u pravac O_2O (slika 14.1). U sliku su unesene i druge potrebne veličine, pri čemu je uvaženo da je $\overline{D} = \overline{A}$.

Iz slike slijedi:

$$y^2 = \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 - x^2 , \qquad (14.1)$$

a isto tako

$$x = \frac{1}{2}\left[A + A \cdot \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2\right] = \frac{A}{2}\left[1 + \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2\right] \qquad (14.2)$$

Da dobijemo kruvulju sjecišta za razne U_1, moramo iz gornjih izraza eleminirati U_1. Iz (14.1) slijedi:

$$\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 = \frac{2}{A} x - 1. \qquad (14.3)$$

Ako to uvrstimo u (14.1), dobijemo:

$y^2 = \frac{2}{A} x - 1 - x^2$, ili dalje ako sredimo i dodamo na obje strane jednadžbe $\frac{1}{A^2}$:

$$y^2 + x^2 - \frac{2}{A} x + \frac{1}{A^2} = -1 + \frac{1}{A^2} \qquad (14.4)$$

$$y^2 + \left(x - \frac{1}{A}\right)^2 = \frac{1}{A^2} - 1$$

Dobili smo jednadžbu kružnice, čime je dokazano da je spomenuta kruvulja zaista kružnica. Središte (točka S) nalazi se na udaljenosti

$$O_2S = \frac{1}{A} , \qquad (14.5)$$

a radius kružnice je

$$r = \sqrt{\frac{1}{A^2} - 1}. \qquad (14.6)$$

Dobiveni rezultat možemo koristiti za konstrukciju kružnica S_1 na taj način, da ucrtamo pomoćnu kružnicu prema izrazima (14.5) i (14.6), a zatim kroz sjecišta pomoćne kružnice sa kružnicama S_2 crtamo kružnice S_1 s istim radiusom i središtem na pravcu O_2O. Ako smo pak kružnice S_1 konstruirali kao u točki 13. onda nam ova pomoćna kružnica može poslužiti za kontrolu.

Nadalje pomočna kružnica može korisno poslužiti za lakše i preglednije iznalaženje pripadne kružnice S_1, čime se smanjuje mogućnost pogreške u radu, a naročito je prikladna za interpoliranje medju ucrtane kružnice S_1. Kružnice S_1 za razne U_1 = konst. nisu naime ekvidistantne, što otežava interpolaciju, dok su kružnice S_2 ekvdistantne, pa se medju njih može lako interpolirati nova kružnica /koju ionako trebamo za očitanje U_1/, i to preko pomoćne kružnice

Primjer /slika 14.2/

Uz iste podatke kao prije imamo:

$$OS_2 = \frac{1}{A} = \frac{1}{0,9406} = 1,063 \text{ , t.j. } 106,3 \text{ mm}$$

$$r = \sqrt{\frac{1}{A^2} - 1} = \sqrt{1,063^2 - 1} = 0,3605$$

Konstrukcija pomoćne kružnice

Izrazi /14.5/ i /14.6/ mogu se dobiti i geometrijskim putem, kao što je prikazano na slici 14.3.
Iz točke O treba podići okomicu na O_2O do kružnice iz O_2 s radiusom 1 /dakle kružnica za $U_1 = U_2$/.

Tako dobijemo točku E, u kojoj crtamo tangentu, a njezino sjecište s pravcem O_2O daje središte pomoćne kružnice S. Sama pomoćna kružnica prolazi kroz točku E.

Iz slike naime jasno slijedi, da je

$$O_2S : O_2E = O_2E : O_2O$$

$$O_2S : 1 = 1 : A$$

$$O_2S = \frac{1}{A},$$

i dalje

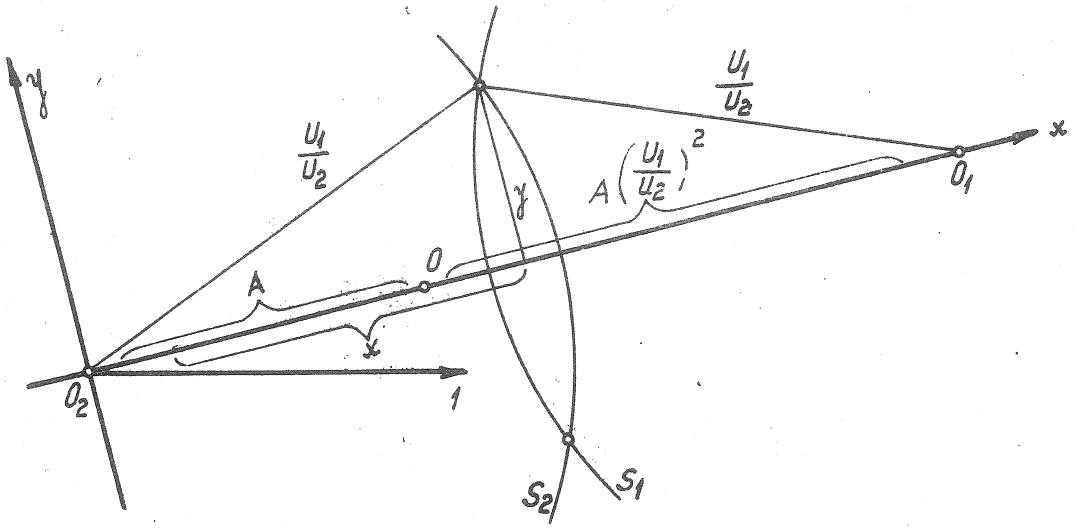
$$r = \sqrt{/O_2S/^2 - /O_2E/^2} = \sqrt{\frac{1}{A^2} - 1} .$$

Time je konstrukcija dokazana.

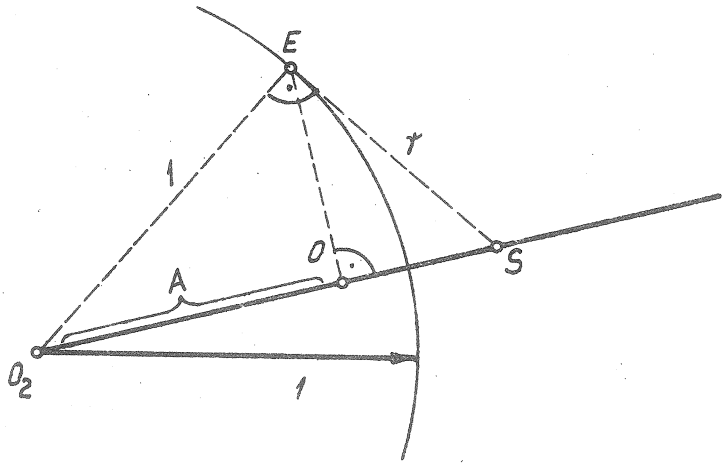
Opći slučaj: $\bar{A} \neq \bar{D}$

U ovom slučaju geometrijsko mjesto sjecišta medjusobno pripadnih kružnica S_2 i S_1 ne će biti kružnica, a to je samo po sebi jasno, jer središta kružnica S_2 i S_1 ne leže na istom pravcu, pa nije ispunjen prije spomenuti uvjet simetrije. Jedino u slučaju da kod $\bar{A} = \bar{D}$ ipak te kompleksne veličine imaju isti fazni kut, t.j. da je a = d, bio bi spomenuti uvjet simetrije ispunjen i dobili bismo opet kružnicu. Ali taj slučaj je tako malo vjerojatan, da ne vrijedi baviti se njime.

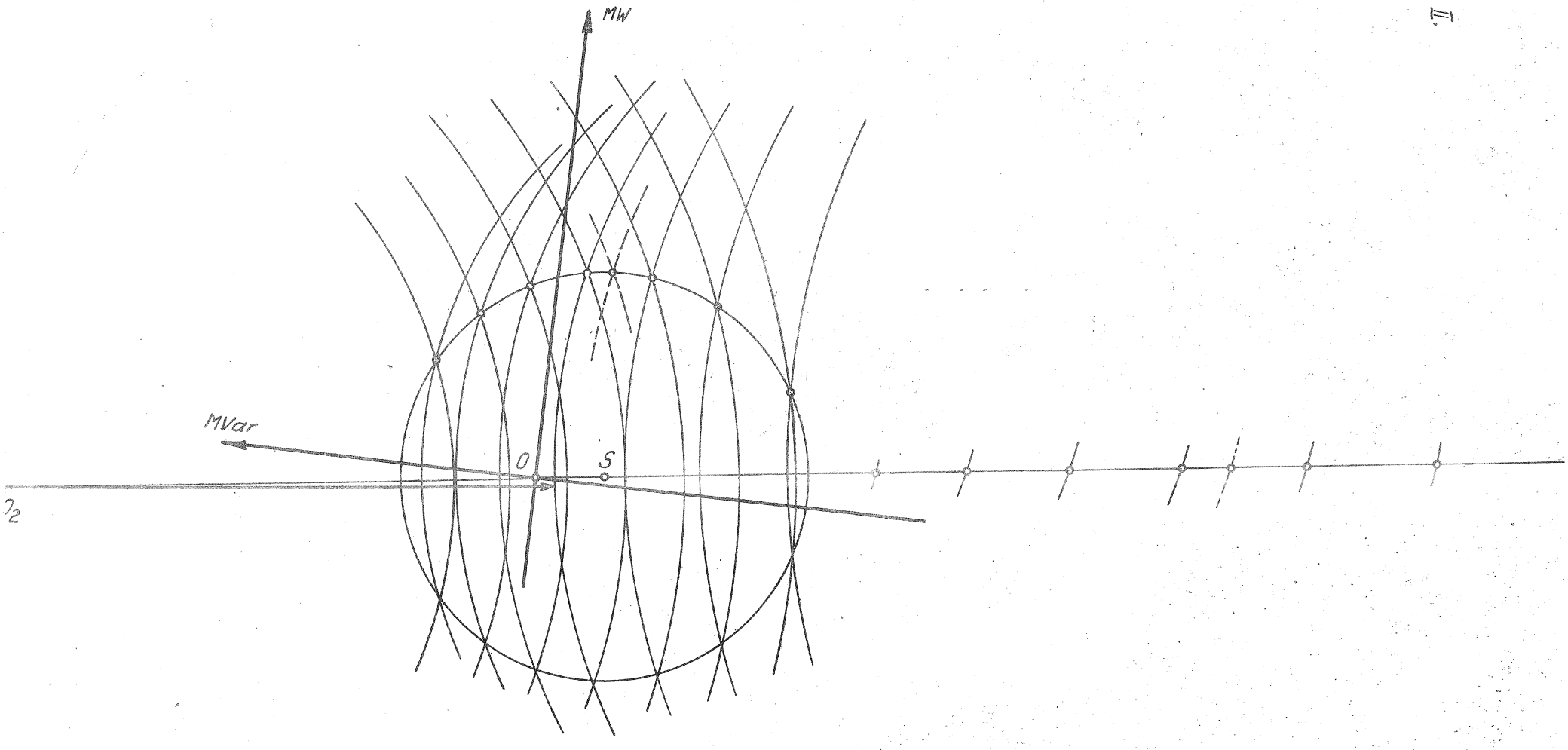
14. I.



Sl. 14. 1. K određivanja geometrijskog mjesta sjecišta.



Sl. 14. 3 Konstrukcija pomaćne kružnice



Sl. 14. 2. Primjer upotrebe pomoćne kružnice

15. Kružnice gubitaka djelatne snage ΔP

Gubitke u prijenosnom sistemu možemo i kod dijagrama za $U_1 \neq$ konst dobiti kao spojnicu MN izmedju pripadnih točaka na krugovima S_2 i S_1. Želimo li medjutim točnije i jednostavnije očitanje, ne možemo se poslužiti pravcem gubitaka ΔP, jer svakoj pojedinoj vrijednosti U_1 odgovara drugi pravac gubitaka, a to nije prikladno za upotrebu. Medjutim ipak svakoj točki M odgovaraju neki odredjeni djelatni gubici ΔP, pa je od interesa istražiti, kako izgledaju krivulje ΔP = konst., koje bi nam omogućile lako očitanje gubitaka. Uslov njihove upotrebljivosti jest dakako to, da se dadu lako konstruirati. Kao što ćemo vidjeti, te krivulje su koncentrične kružnice i njihova je konstrukcija dakle veoma jednostavna.

Izvod za kružnice ΔP pomoću električnih veličina

Djelatni gubici definirani su izrazom

$$\Delta P = P_1 - P_2 \qquad (15.1)$$

Ako se odlučino da sve pomatramo u koordinatnom sistemu napona sa središtem u točki 0_2, onda moramo sve veličine izraziti pomoću napona U_2 i U_1, kojega možemo pisati

$$\bar{U}_1 = U_1' + j\,U_1'' \qquad (15.2)$$

Analogno možemo pisati za struje

$$\bar{I}_1 = I_1' + jI_1' \qquad (15.3)$$

$$I_2 = I_2' + jI_2'' \qquad (15.4)$$

Primarnu djelatnu snagu možemo pisati

$$P_1 = U_1'\,I_1' + U_1''\,I_1'' \qquad (15.5)$$

Ovdje moramo struje izraziti pomoću napona, te polazimo od izraza (2.7):

$$\bar{U}_2 = \bar{D}\cdot\bar{U}_1 - \bar{B}\cdot\bar{I}_1 \text{ ,odakle slijedi}$$

$$\bar{I}_1 = \frac{1}{B}\left(\bar{D}\,\bar{U}_1 - U_2\right) = \frac{1}{b' + j\,b''}\left[(d'+jd'')\cdot(U_1'+jU_1'') - U_2\right]$$

Ako to izmnožimo i sredimo, te uvažimo izraz (15.3), dobit ćemo:

$$I_1' = \frac{1}{B^2}\left[U_1'(b'd'+b''d'') + U_1''(b''d' - b'd'') - b'U_2\right] \qquad (15.6)$$

$$I_1'' = \frac{1}{B^2}\left[U_1'(b'd'' - b''d') + U_1''(b'd' + b''d'') + b''U_2\right] \qquad (15.7)$$

Ako izraze (15.6) i (15.7) uvrstimo u (15.5) i to sredimo, dobit ćemo

$$B^2P_1 = (U_1'^2 + U_1''^2)\cdot(b'd'+b''d'') - U_1'\,U_2\,b' + U_1''\,U_2b'' \qquad (15.8)$$

Nadalje imamo za sekundarnu djelatnu snagu:

$$P_2 = U_2 I_1' \qquad (15.9)$$

Opet ćemo struju izraziti pomoću napona polazeći od izraza (2.5)

$\bar{U}_1 = \bar{A}\, U_2 + \bar{B}\, I_2$, odakle slijedi

$$\bar{I}_2 = \frac{1}{B}(\bar{U}_1 - \bar{A}\, U_2) = \frac{1}{b' + jb''}\,(U_1' + jU_1'' - a'U_2 - ja''U_2)$$

Ako ovo izmnožimo i sredimo te uvažimo izraz (15.4), dobit ćemo:

$$I_1' = \frac{1}{B^2}\,(U_1' b' - U_2 a'b' + U_1'' b'' - U_2 a''b'') \qquad (15.10)$$

$$I_2'' = \frac{1}{B^2}\,(-U_1' b'' + U_2 a'b'' + U_1'' b' - U_2 a''b') \qquad (15.11)$$

Uvrstimo sada izraz (15.10) u izraz (15.9) i to sredimo:

$$B^2 P_2 = U_1' U_2 b' + U_1'' U_2 b'' - U_2^2\,(a'b' + a''b'') \qquad (15.12)$$

Sad možemo uvrstiti izraze (15.8) i (15.12) u izraz (15.1) i to srediti, pa ćemo dobiti konačno

$$\left(\frac{U_1''}{U_2}\right)^2 + \left(\frac{U_1'}{U_2} - \frac{b'}{f}\right)^2 = \frac{B^2}{U_2^2}\frac{\Delta P}{f} - \frac{g}{f} + \left(\frac{b'}{f}\right)^2 \qquad (15.13)$$

gdje nam kao i prije znači

$$f = b'd' + b''d'' \qquad (15.14)$$

$$g = a'b' + a''b'' \qquad (15.15)$$

Iz izraza (15.13) vidimo da se radi o koncentričnim kružnicama u koordinatnom sistemu.

$\frac{U_1'}{U_2}$, $\frac{U_1''}{U_2}$ (slika 15.1). Središte kružnica (točka P) nalazi se na realnom pravcu, na udaljenosti

$$O_2P = p = \frac{b'}{f} \qquad (15.16)$$

Radius kružnica ovisi o odabranoj veličini ΔP, te iznosi

$$r = \sqrt{\frac{B^2}{U_2^2}\frac{\Delta P}{f} - \frac{g}{f} + p^2} \qquad (15.17)$$

Radiusu $r = 0$ odgovaraju minimalni gubitci, i to za prijenos energije karakteriziran položajem točke M u točki P. Ako u izraz (15.17) uvrstimo $r = 0$, dobit ćemo

$$\Delta P_{min} = \frac{U_2^2 f}{B^2}\left(\frac{g}{f} - p^2\right) \qquad (15.18)$$

Specijalni slučajevi

Ako je $\bar{A} = \bar{D}$, bit će i $g = f$.
Ako je $\bar{Y} = 0$, bit će $\bar{A} = \bar{D} = 1$, t.j.
$a' = d' = 1$
$a'' = d'' = 0$
Odatle slijedi
$f = g = b'$
i nadalje udaljenost središta
$p = 1$, t.j. Točka P se poklapa s točkom O.
Radius iznosi

$$r = \sqrt{\frac{B^2}{U_2^2}\frac{\Delta P}{b'} - \frac{b'}{b'} + \left(\frac{b'}{b'}\right)^2} = \frac{B}{U_2}\sqrt{\frac{\Delta P}{b'}} \qquad (15.19)$$

Pravac maksimalne korisnosti η_{max}

Stepen korisnosti dan je izrazom

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta P}{P_2}} \qquad (15.20)$$

Za odredjene gubitke ΔP dobit ćemo najveću moguću korisnost ηmax, ako je P_2 što je moguće veći. Na kružnicama ΔP maksimalnoj korisnosti odgovaraju dakle točke, koje su najviše udaljene od jalove osi. Spojnica tih točaka daje nam liniju η_{max}.
Kao što je pokazano na slici 15.1 pravac ηmax prolazi kroz točku P i paralelan je s djelatnom osi.

Geometrijski izvod kružnica ΔP

Budući da je osnov za konstrukciju kružnog pogonskog dijagrama dan sa tri vektora $\bar{A}, \frac{\bar{B}}{U_2^2}$ i $\bar{D}$, koji su prikazani na slici 15.2, to je

time ujedno dana i potrebna geometrijska podloga za daljnju konstrukciju dijagrama. Prema tome mora postojati način da se daljnje razvijanje kružnog dijagrama vrši čisto geometrijskim putem. Takvim ćemo putem poći i ovdje i pokazati da je geometrijski izvod kružnica ΔP u stvari mnogo pregledniji i jednostavniji.

Polazimo od pravca gubitaka ΔP, kojim smo u točki 9 geometrijski definirali gubitke djelatne snage. Za odredjeni napon U_1 gubitci su jednaki udaljenosti m od točke M do pripadnog pravca gubitaka ΔP (slika 15.3.) Kako istim gubitcima na kružnici za odredjen U_1 pripadaju dvije točke M i M', koje su simetrične na realni pravac, to će i tražene kruvulje ΔP = konst. biti simetrične na realni pravac. Položiti ćemo dakle koordinatni sistem x, y kroz točku O_2 , tako da se os x podudara s realnim pravcem,

Prema izrazu (9.2), uvaživši mjerilo snaga $\frac{B}{U_2^2}$, slijedi

$$m = \frac{\Delta P}{2} \frac{B}{b'} \frac{B}{U_2^2} . \qquad (15.21)$$

Iz izraza (9.4) imamo

$$n = \frac{1}{2\,b'}\left[g + f\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2\right] \qquad (15.22)$$

Iz slike 15.3. slijedi

$$y^2 + x^2 = \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 \qquad (15.23)$$

Da dobijemo traženu krivulju, moramo se riješiti veličine U_1. Iz slike 15.3 nadalje slijedi

$$x = n - m = \frac{1}{2\,b'}\left[g + f\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2\right] - \frac{\Delta P \cdot B^2}{2\,b'\,U_2^2}$$

Odavle dobijemo:

$$\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 = 2\,\frac{b'}{f}\,x - \frac{g}{f} + \frac{\Delta P\,B^2}{U_2^2\,f} \qquad (15.24)$$

Uvrstimo (15.24) u (15.23):

$$y^2 + x^2 = 2\,\frac{b'}{f}\,x - \frac{g}{f} + \frac{\Delta P\,B^2}{U_2^2\,f}$$

Ako to sredimo, dobit ćemo

$$y^2 + \left(x - \frac{b'}{f}\right)^2 = \frac{\Delta P \cdot B^2}{U_2^2\,f} - \frac{g}{f} + \left(\frac{b'}{f}\right)^2 \qquad (15.25)$$

Dobili smo u stvari isti rezultat kao u izrazu (15.13).

Geometrijska konstrukcija točke P

Ako iz točke O_2 nacrtamo vektor $\bar{D}$ i iz njegovog vrha povučemo paralelu s pravcima P = konst do realnog pravca, dobit ćemo odsječak O_2 P' (slika 15.4). Iz slike slijedi

$$O_2 P' = d' + d''\,tg\,b = d' + d''\,\frac{b''}{b'} = \frac{d'b' + d''b''}{b'} = \frac{f}{b'}, \qquad (15.26)$$

Kako je prema izrazu (15.16)

$$O_2P = p = \frac{b'}{f} ,$$

to slijedi

$$O_2P = p = \frac{1}{O_2P'} \qquad (15.27)$$

I izraz (15.27) možemo riješiti geometrijski koristeći kružnicu $\frac{U_1}{U_2} = 1$, koja je redovito u dijagramu već ucrtana. To je prikazano takodjer u slici 15.4, a konstrukcija je opće poznata.

Navedena konstrukcija je naročito interesantna u slučaju kad je $\bar{A} = \bar{D}$, jer tada vrh vektora $\bar{D}$ pada u točku O, a crtana paralela s pravcima P= konst je u stvari sama djelatna os. Točka P' je dakle sjecište pravca P= 0 s realnim pravcem.

Položaj točke P i veličina ΔP_{min}

Odredit ćemo udaljenost točke P od osi P = 0. Veličine potrebne za račun prikazane su na slici 15.5. Iz slike slijedi:

$$O_2P'' = a' + a''tg\ b = a' + a''\frac{b''}{b'} = \frac{a'b'' + a''b''}{b'} = \frac{g}{b'} \qquad (15.28)$$

$$PP'' = O_2P'' - O_2P = \frac{g}{b'} - p = \frac{g}{b'} - \frac{b'}{f} \qquad (15.29)$$

$$PP_0 = PP'' \cdot \cos b = \left(\frac{g}{b'} - \frac{b'}{f}\right)\frac{b'}{B} = \frac{f}{B}\left[\frac{g}{f} - \left(\frac{b'}{f}\right)^2\right] \qquad (15.30)$$

U mjerilu snaga to iznosi:

$$PP_0 = \frac{U_2^2}{B}\,\frac{f}{B}\left[\frac{g}{f} - \left(\frac{b'}{f}\right)^2\right] = \frac{U_2^2}{B^2}\left(\frac{g}{f} - p^2\right) \qquad (15.31)$$

Dobili smo isti izraz kao (15.18), pa to znači da je očitanje djelatne snage za točku P po vrijednosti jednako (ali protivnog predznaka!) ΔP_{min}, t.j. minimalnim gubicima djelatne snage, koji upravo i nastupaju, ako je prijenos definiran točkom P. Vrijednost ΔP_{min} možemo dakle očitati (ili barem kontrolirati) kao djelatnu snagu za točku P (s protivnim predznakom).

Geometrijska konstrukcija kružnica ΔP

Osnova, koja nam je poslužila za geometrijski izvod kružnica ΔP, može nam poslužiti i za njihovu geometrijsku konstrukciju. Postupak je sasvim jednostavan: Treba nacrtati kružnicu S_2 za bilo koji napon U_1 = konst.; zatim nacrtati pravac ΔP, koji pripada toj kružnici, sa pripadnom skalom djelatnih gubitaka; kroz pojedine točke skale treba povući paralele s pravcem ΔP i naći sjecišta na kružnici U_1 = konst, kroz ta sjecišta treba ortati kružnice sa središtem u točki P, koju točku treba posebno odrediti. Dobivene kružnice su tražene kružnice ΔP = konst.

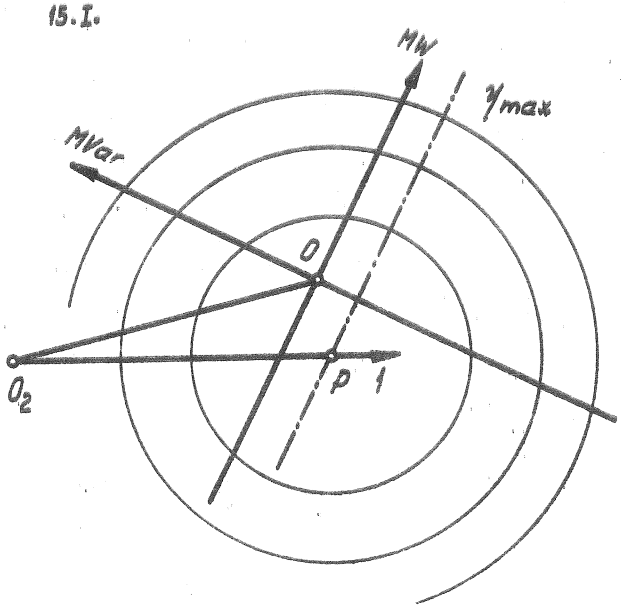
Ipak je nazgodnije ne uzeti bilo koju kružnicu S_2 nego baš onu, koja prolazi kroz točku P (slika 15.6). Pripadni pravac ΔP leži u tom slučaju u sredini izmedju točke P i sjecišta realnog pravca s pravcem P = 0 (točka P''), pa ga je lako konstruirati. Ili još jednostavnije, treba crtati skalu za pravac ΔP počam od točke P sa vrijednošću ΔP_{min}, koju možemo izračunati ili očitati, kako je prije pokazano.

Da pravac ΔP u tom slučaju leži u sredini izmedju točaka P i P", vidi se iz ovog razmatranja: crtamo li kružnicu P_1, koja pripada kružnici S_2 kroz točku P, to točka N' na toj kružnici P_1, mora ležati toliko desno od P, da projekcija dužine PN' na djelatnu os bude jednaka gubitcima ΔP, koji odgovaraju točki P. A ti su gubici, kao što smo vidjeli, upravo jednaki udaljenosti točke P od jalove osi. Dakle točka N' pada u točku P", odnosno pripadna kružnica P_1 prolazi kroz točku P". Pripadni pravac ΔP prolazi dakle sredinom izmedju točaka P i P".

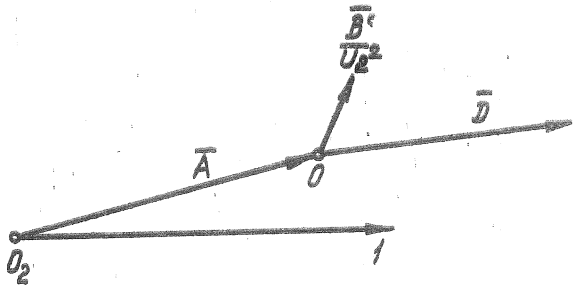
Treba napomenuti, da kružnica S_2 kroz točku P i njoj pripadna kružnica P_1 kroz točku P" čine par medjusobno pripadnih kružnica, koje su medjusobno najbliže. To je zato, jer udaljenost izmedju tih kružnica daje u nekom odredjenom mjerilu gubitke snage, a ti su najmanji za točku P kroz koju crtana kružnica S_2 prolazi.

Ako je $\overline{A} = \overline{D}$ onda taj pravac ΔP prolazi vrlo blizu vrha jediničnog vektora, ali ne kroz sam vrh. Udaljenost pravca ΔP od točke O_2 jest naime aritmetička sredina za dužine O_2 i P i $P_2P"$, dok je jedinični vektor njihova geometrijska sredina.

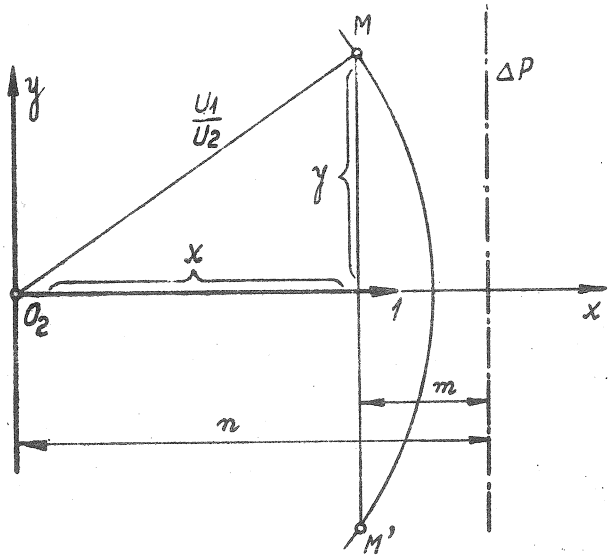
15.I.



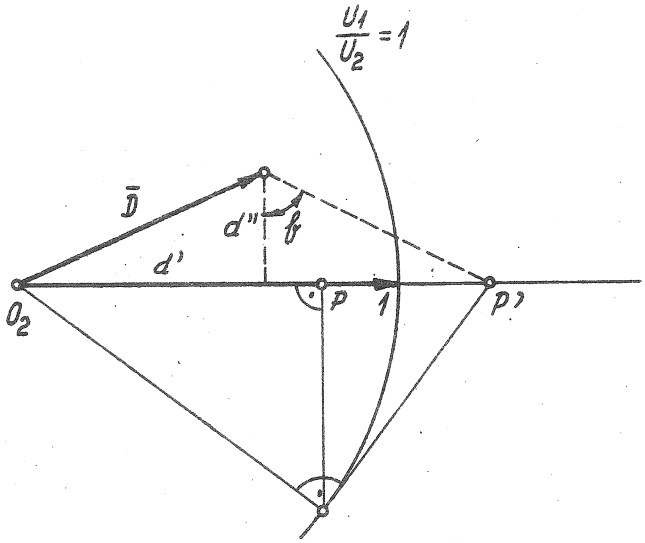
Sl. 15. 1. Kružnice ΔP = konst. i pravac γmax.



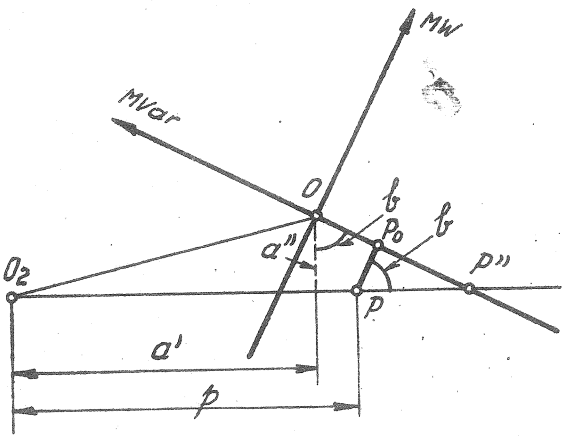
Sl. 15.2 Geometrijski osnov za konstrukciju kružnog dijagrama



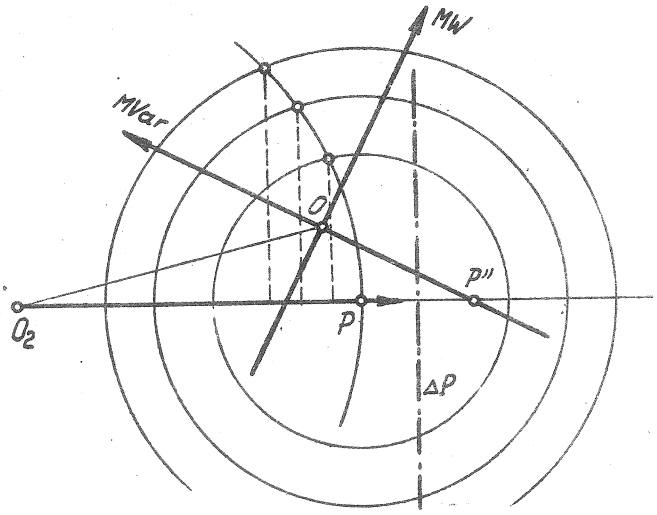
Sl. 15. 3. K određivanja kružnica ΔP.



Sl. 15.4. Konstrukcija točke P.



Sl. 15.5 K određivanja ΔP min



Sl. 15. 6. Konstrukcija kružnica ΔP

16. Kružnice gubitaka jalove snage ΔQ

Za lakše očitanje gubitaka jalove snage možemo također crtati krivulje ΔQ = konst. Kao što ćemo vidjeti, dobit ćemo opet koncentrične kružnice, pa ih je dakle vrlo lako konstruirati.

Izvod kružnica ΔQ pomoću električnih veličina.

Gubici jalove snage definirani su izrazom

$$\Delta Q = Q_1 - Q_2 \tag{16.1}$$

Primarna jalova snaga dana je sa:

$$Q_1 = U_1' I_1'' - U_1'' I_1' \tag{16.2}$$

Opet ćemo sve veličine izraziti pomoću napona.
Komponente struje imamo već izračunate u izrazima (15.6) i (15.7), i to

$$I_1' = \frac{1}{B^2}\left[U_1' (b'd' + b''d'') + U_1'' (b''d' - b'd'') - b'U_2\right]$$

$$I_1'' = \frac{1}{B^2}\left[U_1' (b'd'' - b''d') + U_1'' (b'd' + b''d'') + b''U_2\right]$$

Ako to uvrstimo u izraz (16.2) i sredimo, dobit ćemo:

$$B^2 Q_1 = (U_1'^2 + U_1''^2)(b'd'' - b''d') + U_1' U_2 b'' + U_1'' U_2 b' \tag{16.3}$$

Nadalje imamo za sekundarnu jalovu snagu:

$$Q_2 = U_2 I_2'' \tag{16.4}$$

Struju I_2'' imamo izračunatu u izrazu (15.11) i to

$$I_2'' = \frac{1}{B^2}(- U_1' b'' + U_2 a' b'' + U_1'' b' - U_2 a'' b')$$

Uvrstimo li to u izraz (16.4) i sredimo, dobit ćemo

$$B^2 Q_2 = - U_1' U_2 b'' + U_1'' U_2 b' + U_2^2 (a'b'' - a''b') \tag{16.5}$$

Ako sad uvrstimo izraze (16.3) i (16.5) u izraz (16.1) i to sredimo, dobit ćemo konačno

$$\left(\frac{U_1''}{U_2}\right)^2 + \left(\frac{U_1'}{U_2} - \frac{b''}{h}\right)^2 = \left(\frac{b''}{h}\right)^2 - \frac{j}{h} - \frac{B^2 \Delta Q}{U_2^2 h} \tag{16.6}$$

Tu nam kao i prije znači

$$h = d'b'' - d''b' \tag{16,7}$$

$$j = a'b'' - a''b' \tag{16.8}$$

Izraz (16.6) pokazuje nam, da se opet radi o koncentričnim kružnicama u koordinatnom sistemu

$\frac{U_1'}{U_2}$, $\frac{U_1''}{U_2}$ (slika 16.1). Središte se nalazi na realnom pravcu (točka Q), i to na udaljenosti

$$O_2Q = q = \frac{b''}{h} \qquad (16.9)$$

Radius kružnice ovisi o odabranoj veličini ΔQ, te iznosi

$$r = \sqrt{q^2 - \frac{j}{h} - \frac{B^2 \Delta Q}{U_2^2 h}} \qquad (16.10)$$

Radiusu r = 0 odgovaraju maksimalni jalovi gubitci, i to za prijenos energije karakteriziran točkom Q. Ako r = 0 uvrstimo u izraz (16.10), dobit ćemo

$$\Delta Q_{max} = \frac{U_2^2 h}{B^2} \left(q^2 - \frac{j}{h} \right) \qquad (16.11)$$

Specijalni slučajevi

Ako je $\bar{A} = \bar{D}$, bit će h = j.

Radius kružnica iznosit će

$$r = \sqrt{q^2 - 1 - \frac{B^2 \Delta Q}{U_2^2 h}} \qquad (16.12)$$

Ako je $\bar{Y} = 0$, bit će (analogno kao kod točke 15)

h = j = b"

q = 1

Točka Q će opet pasti u O.
Radius kružnica u tom slučaju iznosi:

$$r = \frac{B}{U_2} \sqrt{\frac{-\Delta Q}{b''}} \qquad (16.13)$$

Vidimo da se dobiju realne kružnice samo za negativne vrijednosti ΔQ, što je jasno jer vod sa $\bar{Y} = 0$ ima samo induktivne gubitke.

Pravac minimalnih relativnih gubitaka jalove snage λ_{min}

Relativni gubitci jalove snage dani su izrazom

$$\lambda = \frac{\Delta Q}{Q_2} \qquad (16.14)$$

Za odredjene jalove gubitke ΔQ dobit ćemo minimalni λ, ako je Q_2 što je moguće veće. Na pojedinim kružnicama ΔQ tome odgovaraju točke koje su bilo najbliže bilo najdalje djelatnoj osi. Spojnica tih točaka daje nam liniju λ_{min}.

Na slici 16.1 se vidi da je linija λ_{min} pravac, koji prolazi kroz točku Q, a paralelan je s jalovom osi.

Geometrijski izvod kružnica ΔQ

Ovdje polazimo od pravca jalovih gubitaka ΔQ, kojim smo u točki 10 geometrijski definirali gubitke jalove snage, a inače u potpunosti i ovdje vrijedi slika 15.3, samo uz slijedeće veličine, prema izrazima (10.2) i (10.1):

$$m = \frac{-\Delta Q}{2} \frac{B}{b''} \frac{B}{U_2^2} \qquad (16.15)$$

$$n = \frac{1}{2b''} \left[j + h \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2 \right] \qquad (16.16)$$

Dalje je

$$x = n - m = \frac{1}{2b''} \left[j + h \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2 \right] + \frac{\Delta Q \cdot B^2}{2b'' U_2^2} ,$$

a odavle slijedi

$$\left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2 = 2 \frac{b''}{h} x - \frac{j}{h} - \frac{\Delta Q B^2}{U_2^2 h} \qquad (16.17)$$

Koristimo opet izraz (15.23) u koji uvrstimo (16.17):

$$y^2 + x^2 = 2 \frac{b''}{h} x - \frac{j}{h} - \frac{\Delta Q B^2}{U_2^2 h}$$

Ako to sredimo, dobit ćemo:

$$y^2 + \left(x - \frac{b''}{h} \right)^2 = \left(\frac{b''}{h} \right)^2 - \frac{j}{h} - \frac{\Delta Q B^2}{U_2^2 h} \qquad (16.18)$$

Dobili smo opet isto kao u izrazu (16.6)

Geometrijska konstrukcija točke Q

Ako iz točke O_2 nacrtamo vektor $\bar{D}$, pa iz njegovog vrha povučemo paralelu s pravcima Q = konst. do realnog pravca, dobit ćemo točku Q' (slika 16.2). Iz slike slijedi

$$O_2Q' = d' - d'' \operatorname{ctg} b = d' - d'' \frac{b'}{b''} = \frac{d'b'' - d''b'}{b'} = \frac{h}{b''} \qquad (16.19)$$

Uvaživiši izraz (16.9), imamo

$$O_2Q = p = \frac{b''}{q} = \frac{1}{O_2Q'} \qquad (16.20)$$

Opet možemo koristiti poznatu konstrukciju, kao što je prikazano na slici 16.2

Ta je konstrukcija opet interesantna u slučaju $\bar{A} = \bar{D}$, kad vrh vektora $\bar{D}$ pada u točku O. Točka Q' je prema tome sjecište realnog pravca s pravcem Q = 0.

Položaj točke Q i veličina ΔQ_{max}

Odredit ćemo udaljenost točke Q od osi Q = 0. Veličine potrebne za račun prikazane su na slici 16.3. Iz slike slijedi:

$$O_2Q'' = a' - a'' \operatorname{ctg} b = a' - a'' \frac{b'}{b''} = \frac{a'b'' - a''b'}{b''} = \frac{j}{b''} \qquad (16.21)$$

$$Q\,Q'' = O_2Q - O_2Q'' = q - \frac{j}{b''} = \frac{b''}{h} - \frac{j}{b''} \qquad (16.22)$$

$$Q\,Q_o = Q\,Q''\sin b = \left(\frac{b''}{h} - \frac{j}{b''}\right)\frac{b''}{B} = \frac{h}{B}\left[\left(\frac{b''}{h}\right)^2 - \frac{j}{h}\right] \qquad (16.23)$$

U mjerilu snaga to iznosi :

$$Q\,Q_o = \frac{U_2^2}{B}\frac{h}{B}\left[\left(\frac{b''}{h}\right)^2 - \frac{j}{h}\right] = \frac{U_2^2\,h}{B^2}\left(q^2 - \frac{j}{h}\right) \qquad (16.24)$$

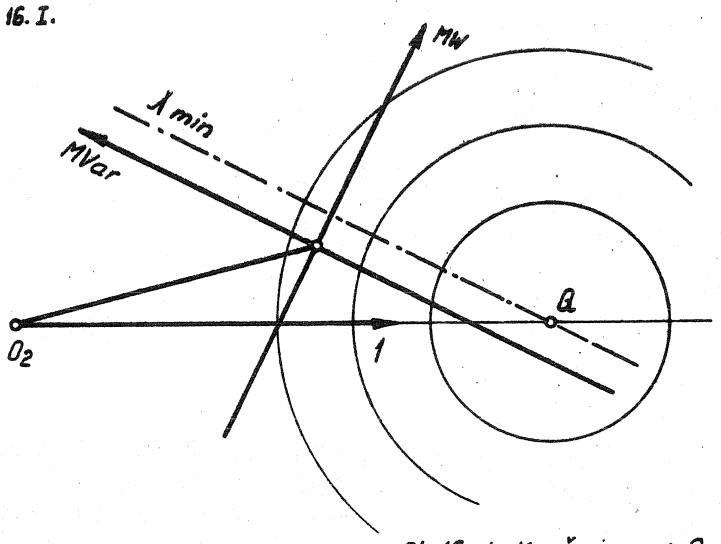
Dobili smo isti izraz kao (16.11), pa to znači da je očitanje jalove snage za točku Q po vrijednosti jednako (ali protivnog predznaka!) ΔQ_{max}, t.j. maksimalnim gubitcima jalove snage, koji upravo i nastupaju, ako je prijenos definiran točkom Q. Vrijednost ΔQ_{max} možemo dakle očitati kao jalovu snagu za točku Q (s protivnim predznakom).

Geometrijska konstrukcija kružnica ΔQ

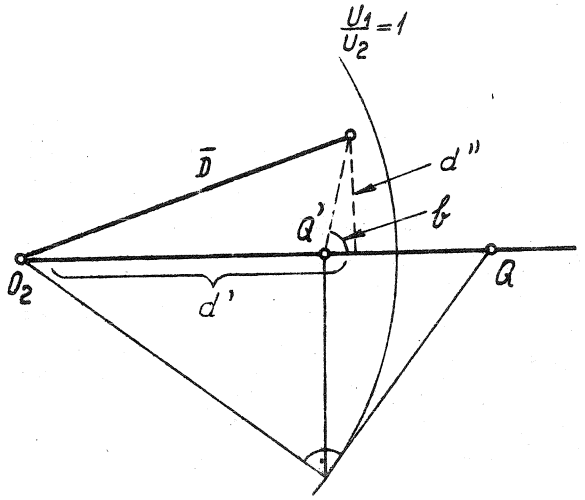
Kružnice ΔQ možemo takodjer konstruirati geometrijskim putem analogno kao i kružnice ΔP. I ovdje je najzgodnije u tu svrhu uzeti kružnicu S_2, koja prolazi točkom Q (slika 16.4). Pripadni pravac ΔQ leži tada u sredini izmedju točke Q i sjecišta realnog pravca s pravcem Q = 0 (točka Q"), pa ga je lako konstruirati. Ako nacrtomo pripadnu skalu uz pravac ΔQ, pa kroz njene podjele vučemo paralele sa pravcem ΔQ do sjecišta s kružnicom S_1 kroz točku Q, dobit ćemo točke kroz koje prolaze kružnice ΔQ = konst; središte tim kružnicama leži u točki Q. Kroz sjecište samog pravca ΔQ sa kružnicom S_2 prolazi naravno kružnica ΔQ = 0. (To vrijedi za svaku kružnicu S_2 i njoj pripadni pravac ΔQ).

Da pravac ΔQ u gornjem slučaju leži u sredini izmedju točaka Q i Q", može se pokazati analogno kao i prije. Crtamo li kružnicu Q_1, koja pripada kružnici S_2 kroz točku Q, to točka N" na toj kružnici Q_1 mora ležati toliko lijevo od Q, da projekcija dužine QN" na jalovu os bude jednaka gubicima ΔQ, koji odgovaraju točki Q. A ti su gubitci, kao što smo prije pokazali, upravo jednaki udaljenosti točke Q od djelatne osi. Dakle točka N" pada u točku Q", odnosno pripadna kružnica Q_1 prolazi kroz točku Q", a pripadni pravac ΔQ prolazi sredinom izmedju točaka Q i Q".

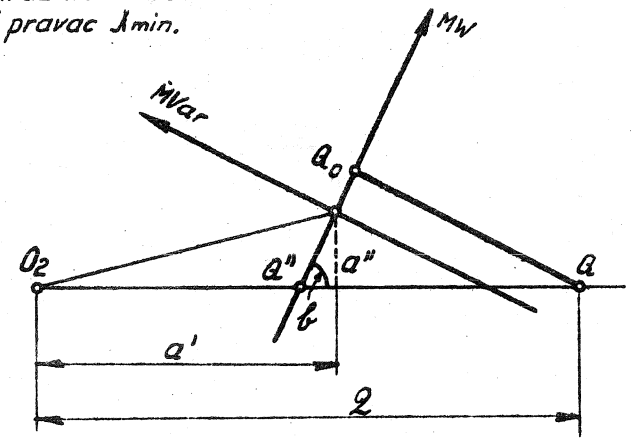
Ako je $\bar{A} = \bar{D}$, onda taj pravac prolazi blizu vrha jediničnog vektora iz istih razloga, kao što je prije pokazano za analogni pravac ΔP.



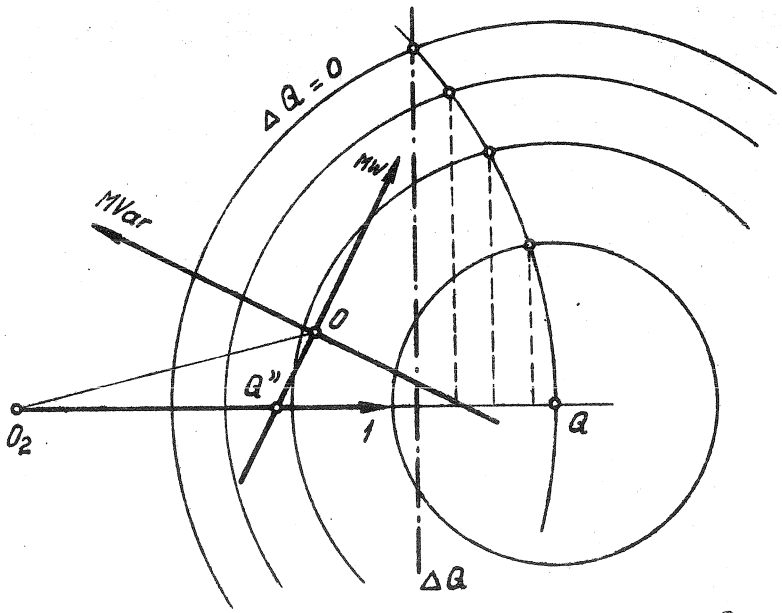
Sl. 16. 1. Kružnice ΔQ = konst. i pravac λ_{min}.



Sl. 16. 2. Konstrukcija točke Q_0.



Sl. 16.3. K određivanja ΔQ max.



Sl. 16. 4. Konstrukcija kružnica ΔQ

17. Geometrijska konstrukcija kružnica Q_1

Ako nacrtamo dijagram s familijom kružnica S_2 i familijom kružnica Q_1 te potražimo sjecišta medjusobno pripadnih kružnica, i ta sjecišta spojimo, dobit ćemo opet kružnicu. Koja je to kružnica možemo lako istražiti na slijedeći način:

Udaljenost izmedju bilo koje točke M na kružnici S_2 i njoj pripadne točke N" na kružnici Q_1 daje nam u odredjenom mjerilu jalove gubitke prijenosa ΔQ. Prije spomenuta sjecišta su u stvari medjusobno pripadne točke M i N", koje u ovom slučaju padaju skupa, pa za njih vrijedi $\Delta Q = 0$. Krivulja, koja ta sjecišta spaja, definirana je dakle izrazom $\Delta Q = 0$, a to je-kao što smo prije pokazali - kružnica sa središtem u točki Q, dok joj radius slijedi iz izraza (16.10), ako u nj uvrstimo $\Delta Q = 0$, t.j.

$$r = \sqrt{q^2 - \frac{j}{h}} \qquad (17.1)$$

Dobiveni rezultat možemo koristiti za konstrukciju kružnica Q_1 na taj način, da nacrtamo kružnicu $\Delta Q = 0$, a zatim kroz sjecišta te kružnice sa kružnicama S_2 crtamo kružnice Q_1 s istim radiusom i središtima na realnom pravcu.

Kružnica $\Delta Q = 0$ može se nadalje koristiti - analogno kao pomoćna kružnica u točki 14.- za: kontrolu crtanja; lakše i preglednije iznalaženje pripadne kružnice Q_1; interpoliranje kružnica Q_1.

Treba napomenuti da analogna geometrijska konstrukcija kružnice P_1 nije moguća, jer bi sjecišta kružnica S_2 i pripadnih kružnica P_1 morala ležati na kružnici $\Delta P = 0$. Takva kružnica u dijagramu ne postoji, jer je uvijek $P > 0$. Kad bi smo računali radius te kružnice prema izrazu (15.17), dobili bismo imaginarnu vrijednost.

Primjer (slika 17.1)

Uz iste podatke kao prije imamo:

$$h = d'b'' - d''b' = 0{,}9406 \cdot 196{,}4 - 0{,}01114 \cdot 23{,}73 = 184{,}5$$

$$j = h = 184{,}5$$

$$q = \frac{b''}{h} = \frac{196{,}4}{184{,}5} = 1{,}064, \text{ t.j. } 106{,}4 \text{ mm}$$

$$r = \sqrt{q^2 - 1} = \sqrt{1{,}064^2 - 1} = 0{,}363, \text{ t.j. } 36{,}3 \text{ mm}$$

Geometrijska konstrukcija kružnice $\Delta Q = 0$

Ako je $\overline{A} = \overline{D}$, a to je većinom slučaj, može se kružnica $\Delta Q = 0$ lako konstruirati. U tom slučaju, kao što je pokazano na kraju točke 10, pravac ΔQ za $\frac{U_1}{U_2} = 1$ prolazi sjecištem realnog ravca sa pravcem $Q = 0$, t.j. prolazi kroz točku Q", pa ga je lako nacrtati.

Sjecište tog pravca sa kružnicom S_2 za $\frac{U_1}{U_2} = 1$, daje nam točku tražene kružnice $Q = 0$. Ako u toj točki crtamo tangentu, dobit ćemo na realnom pravcu točku Q, t.j. središte kružnice $\Delta Q = 0$, kao što je pokazano u točki 16. Kružnicu $\Delta Q = 0$ možemo tada lako nacrtati.

17. I

Sl. 17.1: Primjer konstrukcije kružnica Q1

18. Geometrijska konstrukcija pravaca ΔQ

Prijašnji izvodi omogućuju nam laku konstrukciju pravaca ΔQ. Treba samo nacrtati kružnicu $\Delta Q = 0$ i kroz dva njezina sjecišta sa kružnicom S_2 povući pravac. To je pravac ΔQ, koji pripada toj kružnici S_2.

Ova je konstrukcija jasna sama po sebi, jer je u nadjenom sjecištu $\Delta Q = 0$ za dotičnu kružnicu S_2, pa tuda mora prolaziti i pravac ΔQ.

19. Primjer (slika 19.1)

Na temelju prijašnjih podataka nacrtajmo dijagram s kružnicama ΔP i ΔQ.

Točka P:

f = 24,49 (izračunato u točki 11)

$$p = \frac{b'}{f} = \frac{23,73}{24,49} = 0,968$$

Kružnice ΔP ćemo konstruirati grafički, uvaživši da je mjerilo gubitaka snaga za pravac ΔP: 1,71 mm za 1 MW (vidi točku 11).

$$\Delta P_{min} = \frac{U_2^2 f}{B^2} \cdot \left(\frac{g}{f} - p^2 \right) = \frac{220^2 \cdot 24,49}{198,0^2} \left(1 - 0,968^2\right) = 1,815 \text{ MW}$$

Točka Q:

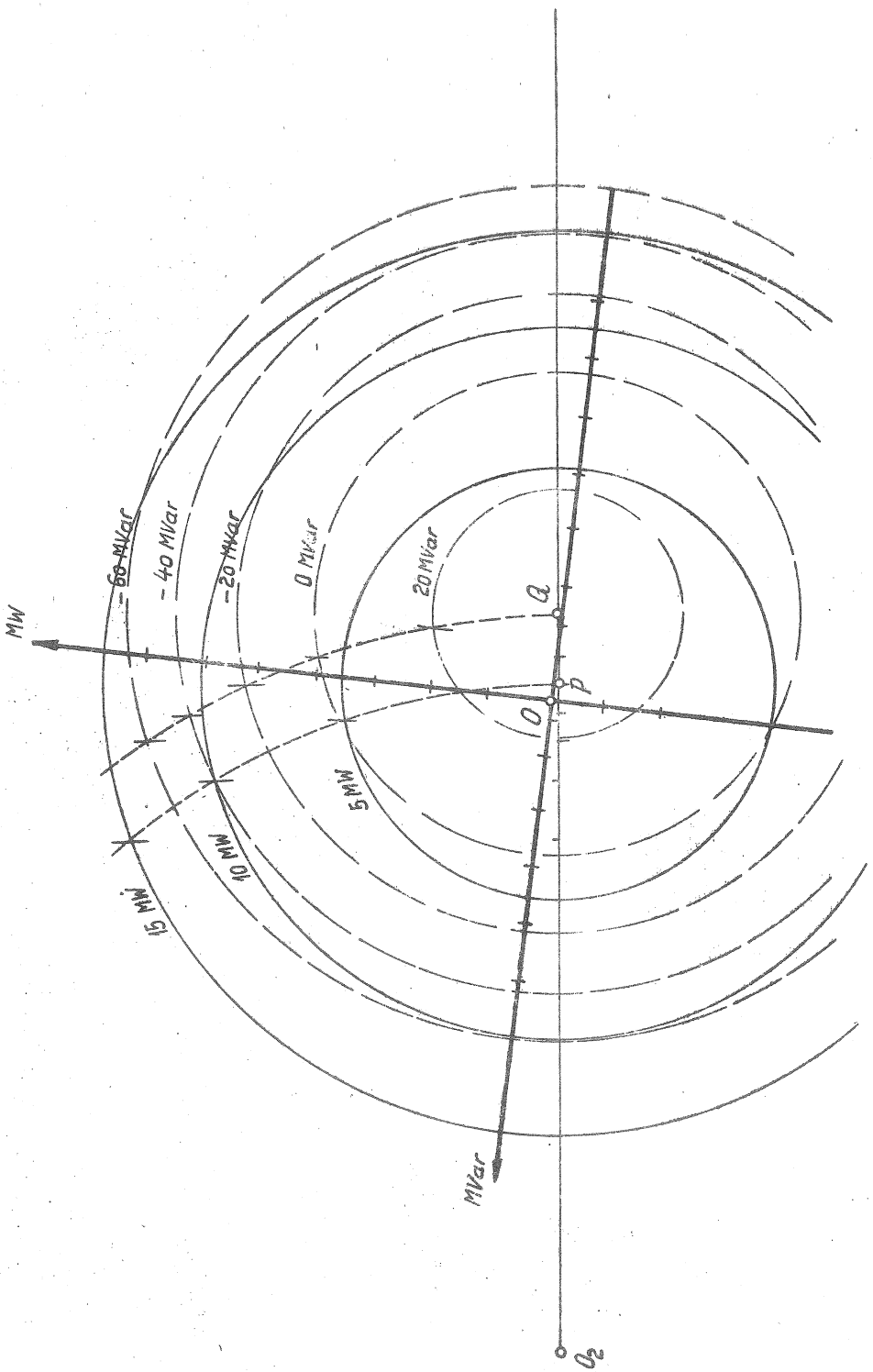
h = 184,5 (izračunato u točki 11.)

$$q = \frac{b''}{h} = \frac{196,4}{184,5} = 1,064$$

Kružnice ΔQ ćemo konstruirati grafički, uvažívši da je mjerilo jalovih gubitaka 0,207 mm za 1 MVar (vidi točku 11.)

$$\Delta Q_{max} = \frac{U_2^2 h}{B^2} \left(q^2 - \frac{j}{h}\right) = \frac{220^2 \cdot 184,5}{198^2} \left(1,064^2 - 1\right) = 30,3 \text{ MVar.}$$

19. I.



Sl. 19. 1. Primjer

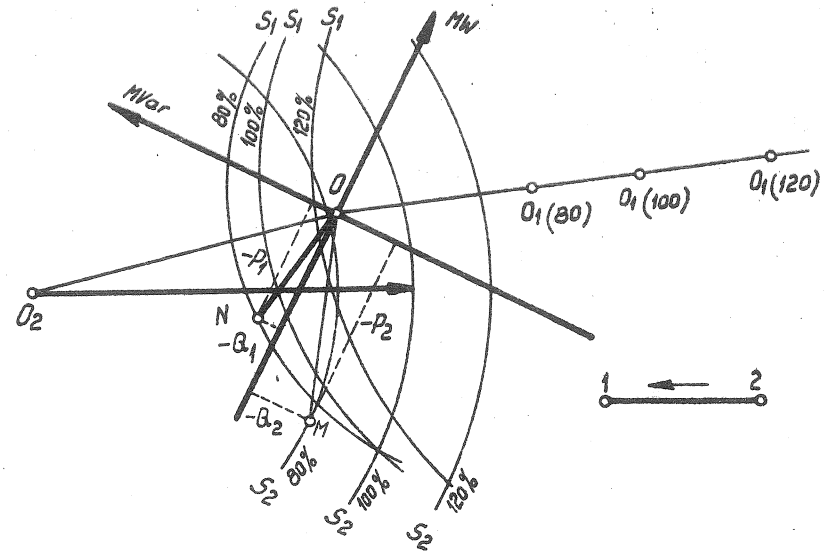
20. Upotreba dijagrama za obrnuti smjer prijenosa

Kod promatranja prilika u prijenosnom sistemu često imamo takav slučaj, da je zadan napon na početku, a ne na kraju prijenosnog sistema, kao što smo do sada uzimali te konstruirali dijagram na osnovu zadane vrijednosti U_2. Mogli bismo dakako ponovno razvijati konstrukciju dijagrama za zadani U_1 = konst, ali to nije potrebno, jer smo ionako oznake s indeksima 1 i 2 proizvoljno uzeli za početak i kraj prijenosnog sistema.

Ako dakle kraj označen indeksom 2 smatramo početkom, onda nam naš dijagram za U_2 = konst, kako smo ga do sada razvili, vrijedi za slučaj zadanog konstantnog napona na početku. Jedino u tom slučaju prijenos energije ide u protivnom smjeru, pa bismo koordinatnom sistemu snaga morali promijeniti predznake a možemo koordinatni sistem snaga ostaviti kako je, te promijeniti predznak snazi kojom ulazimo u dijagram. Vektor prividne snage $\overline{S}$ crtat ćemo dakle u obrnutom smjeru, a ako radimo s djelatnom i jalovom komponentom snage, to ćemo im obima promijeniti predznak (slika 20.1). Pri tome sve što je označeno indeksom 1 odnosi se na kraj prijenosnog sistema.

Na slici je snaga na početku ($\overline{S}_2$) prikazana točkom M, sa djelatnom i jalovom snagom P_2 i Q_2. Napon na kraju (U_1) definiran je na kružnici S_2, te vidimo da iznosi 80 %. Pripadnu točku za snagu na kraju ($\overline{S}_1$) treba tražiti na kružnici S_1 za istih 80 % napona, i za isti kut ; tako dobijemo točku N, kojoj pripadaju djelatna i jalova snaga P_1 i Q_1. Konstrukcija i upotreba dijagrama je dakle u potpunosti ista kao i prije, samo treba imati u vidu, da je smjer energije obrnut.

20. I.



Sl. 20.1 Obrnuti smjer energije

21. Kružnice stepena korisnosti η

Već smo prije (u točki 15) pokazali, da uz dane uslove, na pr. za zadanu snagu P_2 ili za zadane gubitke ΔP, točke maksimalne korisnosti leže u pravcu η_{max}, koji prolazi točkom P, a paralelan je s djelatnom osi. Ako međutim općenito tražimo, koliki je stepen korisnosti η, onda to možemo izračunati na pr. iz očitanja za P_2 i za ΔP, prema izrazu (15.20):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta P}{P_2}} \qquad (21.1)$$

Kako svakoj točki M u dijagramu odgovara odredjena vrijednost P_2 i odredjena vrijednost ΔP, to je za svaku točku M definirana i vrijednost η. Možemo dakle konstruirati linije η = konst., koje nam mogu poslužiti za očitanje stepena korisnosti.

Konstrukciju linija η = konst. možemo provesti na slijedeći način: Odaberimo vrijednost za η, na pr. $\eta = 0{,}9$. Iz izraza (21.1) slijedi tada:

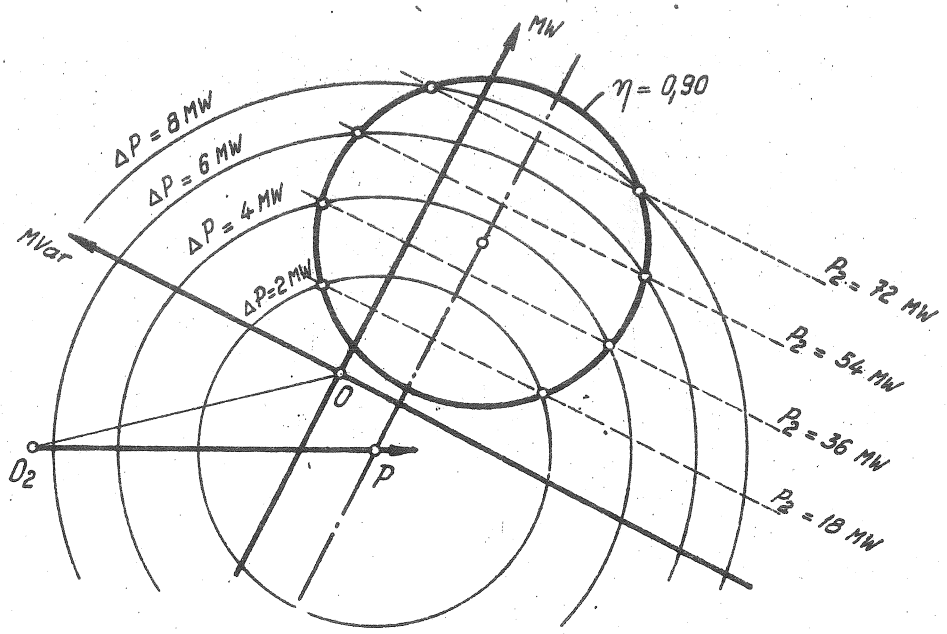
$$\frac{\Delta P}{P_2} = \frac{1-\eta}{\eta} = \frac{0{,}1}{0{,}9}.$$ Točke linije $\eta = 0{,}9$ moraju dakle ležati na sjecištima kružnica ΔP = konst. s pravcima P_2 = konst., za koje je $P_2 = 9 \cdot \Delta P$.

Ta konstrukcija prikazana je na slici 21.1; kao što vidimo, dobili smo kružnicu, te se dade općenito pokazati da za linije η = konst. dobijemo kružnice.

Pravci P_2 = konst. okomiti su na pravac η_{max}, koji prolazi kroz središte kružnica ΔP. Sjecišta pravaca P_2 = konst. s kružnicama ΔP moraju prema tome biti simetrična obzirom na pravac η_{max}, pa i geometrijsko mjesto tih točaka mora biti obzirom na nj simetrično. Dobivenoj kružnici mora dakle središte ležati na pravcu η_{max}, a isto tako i ostalim kružnicama η = konst.

Kružnice η = konst. nisu od velikog interesa, jer se rijetko polaže važnost direktno na stepen korisnosti prijenosa. One imaju i tu manu što za obrnuti smjer prijenosa energije gube svoj smisao, budući da daju odnos $P_2 : P_1$, a to je kod obrnutog smjera prijenosa veće od 1. Zbog toga se tim kružnicama u ovom obliku ne ćemo više baviti, a uostalom na analognu familiju krivulja vratit ćemo se kasnije, kad budemo govorili o relativnim gubitcima.

21. I.



Sl. 21. 1. Konstrukcija kružnice η = konst.

DIJAGRAM ZA OBA NAPONA PROMJENLJIVA

22. Dijagram za $U_2 \neq$ konst.

Dijagram, kako smo ga do sada konstruirali, vrijedio je za odredjeni U_2 = konst. Ako odaberemo drugu vrijednost napona U_2, čini se u prvi mah da bi trebalo nacrtati novi dijagram. Ako je pak U_2 promjenljiv, onda bismo na taj način morali crtati čitav niz dijagrama za razne vrijednosti U_2, pa ni onda ne bismo mogli raditi s kontinuiranom promjenom U_2, nego bismo ga mogli mijenjati samo na skokove. Takvo rješenje dakako ne bi moglo zadovoljiti.

Medjutim gornjoj poteškoći može se prilično lako doskočiti. Ako pogledamo sliku 15.2, vidimo da napon U_2 ulazi u dijagram u stvari samo u izrazu $\frac{B}{U_2^2}$ djelujući jedino na mjerilo snage. Napon U_1 dan

$$\frac{B}{U_2^2}$$

je pri tome uvijek u odnosu na U_2, bez obzira koliki je U_2. Prema tome, mijenja li se U_2, mijenja se u dijagramu samo mjerilo snaga. Ako se stvarni napon U_2 dakle razlikuje od onoga, za koji je napon U_2 dijagram crtan, to pojedinim točkama ne odgovara snaga očitana u dijagramu nego neka druga.

Redukciju očitanja snage treba prema tome izvršiti obzirom na novi napon U_2, a ta se redukcija ima izvršiti u odnosu kvadrata napona, kao što nam to pokazuje i izraz $\frac{B}{U_2^2}$.

Sada je razumljivo i to, zašto se u svakoj formuli uz snagu pojavljuje i U_2^2 . Ako indeksom "s" označimo stvarne veličine, a bez tog indeksa U_2 veličine u dijagramu, odnosno U_2 za koji je dijagram crtan, onda prema gornjem vrijedi

$$\frac{P_{2S}}{P_2} = \left(\frac{U_{2S}}{U_2}\right)^2, \text{ i.t.d.} \qquad (22.1)$$

Takvu redukciju moramo izvšiti za sva očitanja snaga, bilo to u koordinatnom sistemu snaga, na pravcima gubitaka ili na kružnicama gubitaka snaga.

Ako su naponi U_1 upisani u dijagram u stvarnoj vrijednosti [kV], a ne u relativnoj [%], onda kod njih treba izvršiti redukciju u odnosu napona, i to

$$\frac{U_{1S}}{U_1} = \frac{U_{2S}}{U_2} . \qquad (22.2)$$

Kod veličina bez dimenzije, na pr. $\cos\varphi$, δ i sl., redukciju dakako ne treba provoditi.

U slučaju, da je dakle $U_2 \neq$ konst., može se za konstrukciju dijagrama uzeti, da u U_2 = nazivni napon mreže, pa veličine u dijagramu reducirati na stvarni napon U_2. A mogu se i snage označiti u relativnoj vrijednosti prema nekoj veličini snage, koja ovisi o naponu na pr. o prirodnoj snazi prijenosa, pa se tako ta osnovna veličina i sama mijenja s promjenom napona U_2. Ili se konačno umjesto snaga mogu upisati vodljive vrijednosti $\frac{P}{U_2^2}$ [S], pa se stvarna snaga dobije množeći tu vodljivu vrijednost sa U_{2S}^2.

Primjer

Napon za koji je crtan dijagram $U_2 = 220$ kV.

Stvarni napon $U_{2S} = 242$ kV.
Stvarna snaga na kraju $P_{2S} = 60$ MW, uz cos $\varphi_2 = 0,95$.
Tomu odgovara

$$P_2 = \left(\frac{U_2}{U_{2S}}\right)^2 \cdot P_{2S} = \left(\frac{220}{242}\right)^2 \cdot 60 = 49,6 \text{ MW, uz cos } \varphi_2 = 0,95.$$

To unesemo u dijagram i očitamo na pr:
$\Delta P = 3$ MW
Stvarni gubitci će iznositi

$$\Delta P_S = \left(\frac{U_{2S}}{U_2}\right)^2 \Delta P = \left(\frac{242}{220}\right)^2 \cdot 3 = 3,63 \text{ MW.}$$

Stvarna snaga na početku:

$$P_{1S} = P_{2S} + \Delta P_S = 60 + 3,63 = 63,63 \text{ MW.}$$

23. Kružnice relativnih djelatnih gubitaka $\varkappa$.

Vidjeli smo u prijašnjoj točki, da se na linijama, koje predstavljaju relativne veličine, ništa ne mijenja, makar se napon U_2 mijenjao. Zbog toga je od interesa razmotriti, mogu li se gubitci snage prikazati u dijagramu kao relativne veličine, jer tada promjena napona U_2 ne će na njih imati nikakva utjecaja.

Relativne gubitke djelatne snage možemo definirati slijedećim izrazom

$$\varkappa = \frac{\Delta P}{P_2} \tag{23.1}$$

Prema gore rečenome potražit ćemo geometrijsko mjesto točaka definirano sa $\varkappa$= konst. To možemo opet načiniti geometrijskim putem, kao što smo učinili za linije η = konst.

Odaberimo neki $\varkappa$, na pr. $\varkappa$ = 0,1. Iz izraza (23.1) slijedi da je

$$P_2 = \frac{1}{\varkappa}\Delta P = \frac{1}{0,1}\Delta P = 10\,\Delta P.$$

Konstrukcija je dakle potpuno analogna konstrukciji za η= konst., te je prikazana na slici 23.1. U stvari linije $\varkappa$= konst i η = konst su jedne te iste, jer svakoj vrijednosti $\varkappa$ odgovara odredjena vrijednost η. Iz izraza (21.1) i (23.1) možemo naime dobiti, da je

$$\eta = \frac{1}{1+\varkappa} \tag{23.2}$$

Istražit ćemo krivulju $\varkappa$ = konst. računskim putem. Kao što smo u točki 22 rekli, ta krivulja mora biti simetrična na pravac η_{max}, pa ćemo zato os y našeg koordinatnog sistema položiti u pravac η_{max}, a ishodište u točku P (slika 23.2).

Dužina PM odgovara radiusu kružnica ΔP, dakle prema izrazu (15.17) imamo

$$PM = \sqrt{\frac{B^2\,\Delta P}{U_2^2\,f} - \frac{g}{f} + p^2} \tag{23.3}$$

Iz slike pak slijedi

$$PM = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{23.4}$$

Iz izraza (23.3) i (23.4) dobijemo

$$\frac{B^2\Delta P}{U_2^2\,f} - \frac{g}{f} + p^2 = x^2 + y^2$$

$$\Delta P = \frac{U_2^2\,f}{B^2}\left(x^2+y^2+\frac{g}{f} - p^2\right) \tag{23.5}$$

Nadalje dužina MM' odgovara snazi P_2. Ako uvaživo mjerilo snaga, dobit ćemo

$$P_2 = \frac{U_2^2}{B}(y - m_1) \tag{23.6}$$

Iz slike slijedi

$$m_1 = m_2 - m_3$$

$$m_2 = A \cos (b-a) = A (\cos b.\cos a + \sin b.\sin a)$$

$$= A \left(\frac{b'}{B}\frac{a'}{A} + \frac{b''}{B}\frac{a''}{A}\right) = \frac{1}{B}(a'b'+a''b'') = \frac{g}{B}$$

$$m_3 = p.\cos b = p\frac{b'}{B}$$

Dakle

$$m_1 = \frac{g}{B} - p\frac{b'}{B} = \frac{f}{B}\left(\frac{g}{f} - p\frac{b'}{f}\right) = \frac{f}{B}\left(\frac{g}{f} - p^2\right) \qquad (23.7)$$

Uvrstimo (23.7) u (23.6):

$$P_2 = \frac{U_2^2}{B}\left(y - \frac{g}{B} + p\frac{b'}{B}\right) \qquad (23.8)$$

Ako sada uvrstimo (23.5) i (23.8) u (23.1), dobit ćemo

$$\varkappa = \frac{f}{B} \cdot \frac{x^2 + y^2 + \frac{g}{f} - p^2}{y - \frac{g}{B} + p\frac{b'}{B}}$$

Ako to sredimo i uvrstimo

$$k = \varkappa \frac{B}{2f}, \qquad (23.9)$$

dobit ćemo

$$x^2 + (y-k)^2 = k^2 - \left(\frac{g}{f} - p^2\right)(1+\varkappa) \qquad (23.10)$$

Dobili smo dakle kružnicu sa središtem na pravcu η_{max}, i to na udaljenosti k od točke P. Radius kružnice iznosi

$$r = \sqrt{k^2 - \left(\frac{g}{f} - p^2\right)(1+\varkappa)} \qquad (23.11)$$

Kao što vidimo, izrazi (23.9) i (23.11) su neovisni o U_2. Kružnice $\varkappa$= konst, osim što dakle omogućuju direktno očitanje relativnog gubitka snage (bez obzira koliki je napon U_2), a relativni gubitak snage se često traži kod proračuna prijenosa, imaju itu prednost pred kružnicama η= konst., što i kod obrnutog smjera energije u potpunosti zadržavaju svoj smisao dajući relativne gubitke u odnosu na snagu P_2.

Ako već prelazimo od kružnica η na kružnice $\varkappa$, onda možemo i pravac η_{max} označiti sa $\varkappa_{min}$, jer on predstavlja pravac minimalnih relativnih gubitaka.

Radius kružnice (r) ovisi o veličini $\varkappa$, pa je to veći što je $\varkappa$ veći. Za r = 0 dobijemo najmanju moguću vrijednost za $\varkappa$, koju možemo izračunati, ako izraz (23.11) izjednačimo s nulom. Pri tome ćemo

općenito dobiti dva rješenja za $\varkappa$, jedno pozitivno i jedno negativno. Negativno rješenje odgovara obrnutom smjeru energije. Isto tako, ako želimo konstruirati krugove $\varkappa$= konst za obrnuti smjer energije moramo u izraze (23.9) i (23.11) uvrstiti vrijednosti $\varkappa$ s negativnim predznakom.

Konstrukcija središta za kružnice $\varkappa$= konst i kružnica $\varkappa$= -1

Udaljenost središta pojedinih kružnica od točke P možemo lako izračunati iz izraza (23.9), ali položaje središta možemo lako dobiti i jednostavnom geometrijskom konstrukcijom. Izraz (23.9) možemo naime preinačiti, i to:

$$k = \varkappa \frac{B}{2f} - \varkappa \frac{b'}{2f} \frac{B}{b'} = \varkappa \frac{P}{2} \frac{1}{\cos b} \qquad (23.12)$$

Ta je konstrukcija prikazana u slici 23.3. Ova nam konstrukcija obično ne daje dovoljnu točnost, jer je kut b obično blizu 90^0. Medjutim, ta konstrukcija nam još nešto pokazuje. Ako konstruiramo središta za negativne vrijednosti $\varkappa$, to vidimo da središte kružnice $\varkappa$= - 1 leži na simetrali dužine O_2P. Ako pak računamo radius za tu kružnicu prema izrazu (23.11), dobijemo

$$r = \sqrt{k^2 - \left(\frac{g}{f} - p^2\right)(1 - 1)} = \sqrt{k^2} = k$$

Dakle radius je jednak udaljenosti središta od točke P odnosno kružnica $\varkappa$= -1 prolazi kroz točku P, a kako joj je središte na simetrali dužine O_2P, to ta kružnica prolazi i kroz točku O_2 (slika 23.4).

Budući da prema gornjemu za točku P imamo $\varkappa$ = -1, to slijedi da tom pogonskom stanju odgovaraju gubitci ΔP, koji su jednaki očitanju djelatne snage za točku P s protivnim predznakom. Do tog zaključka smo već bili došli putem izraza (15.31).

Konstrukcija kružnica $\varkappa$= konst.

Kružnice $\varkappa$= konst. možemo lako konstruirati na slijedeći način: Najprije odredimo središta kružnica prema izrazu (23.9), što je lako, jer su udaljenosti od točke P proporcionalne sa $\varkappa$. Radiuse kružnica nije potrebno računati prema izrazu (23.11), jer nam sjecišta kružnice ΔP i pravaca P_2 = konst. definiraju odredjeni $\varkappa$, pa kružnica za tu vrijednost $\varkappa$ mora prolaziti kroz dotično sjecište. Na slici 23.5 nacrtana je kružnica ΔP = 10 MW, koju možemo konstruirati kao što je pokazano u točki 15, i pripadni pravci P_2 = konst. za razne vrijednosti $\varkappa$. Na pr. za

$\varkappa$ = 0,4 odgovara

$$P_2 = \frac{\Delta P}{\varkappa} = \frac{10}{0,4} = 25 \text{ MW}$$

Kao što vidimo iz slike 23.5, što je veća vrijednost $\varkappa$, to se kružnice $\varkappa$= konst. sve više približuju osi P_2 = 0. Konačno će kružnica $\varkappa = \infty$ pasti u pravac P_2 = 0, što je jasno, jer točkama na osi P_2=0 pripadaju odredjene vrijednosti ΔP (to se vidi na pr. po kružnicama ΔP), a to je moguće samo ako je ujedno $\varkappa = \infty$.

Isto tako se i kružnice za negativne vrijednosti $\varkappa$ sve više približuju osi P = 0, što se $\varkappa$ više približuje vrijednosti $-\infty$. Konačno kružnica $\varkappa = -\infty$ pada u os P_2 = 0.
Zbog toga su kružnice $\varkappa$= konst. teško upotrebive u području vrlo

malih vrijednosti za P_2, jer ih je zbog velikog radiusa teško crtati, a i očitanja ne daju točne rezultate (vrlo velike vrijednosti za $\varkappa$, a vrlo male za P_2).

Udaljenost središta kružnica za $\varkappa_{min}$ od osi P = 0

Izračunat ćemo najprije udaljenosti ovih središta od točke P. Uvjet za $\varkappa$ = min jest da je radius kružnice jednak nuli, dakle prema izrazu (23.11)

$$r = \sqrt{k^2 - \left(\frac{g}{f} - p^2\right)(1 + \varkappa)} = 0 \qquad (23.13)$$

Nadalje iz izraza (23.9) slijedi

$$\varkappa = \frac{2f}{B} k \qquad (23.14)$$

Ako izraz (23.14) uvrstimo u (23.13) i nađjemo rješenje za udaljenosti središta od točke P, dobijemo

$$k = \left(\frac{g}{B} - p\frac{b'}{B}\right) \pm \sqrt{\left(\frac{g}{B} - p\frac{b'}{B}\right)^2 + \left(\frac{g}{f} - p^2\right)} \qquad (23.15)$$

Ako označimo sa

$$m_1 = \left(\frac{g}{B} - p\frac{b'}{B}\right) \qquad (23.16)$$

a to je kao što vidimo iz izraza (23.7) udaljenost točke P od osi P = 0, dobijemo

$$k = m_1 \pm \sqrt{m_1^2 + \left(\frac{g}{f} - p^2\right)} = m_1 \pm n_o, \qquad (23.17)$$

ako je

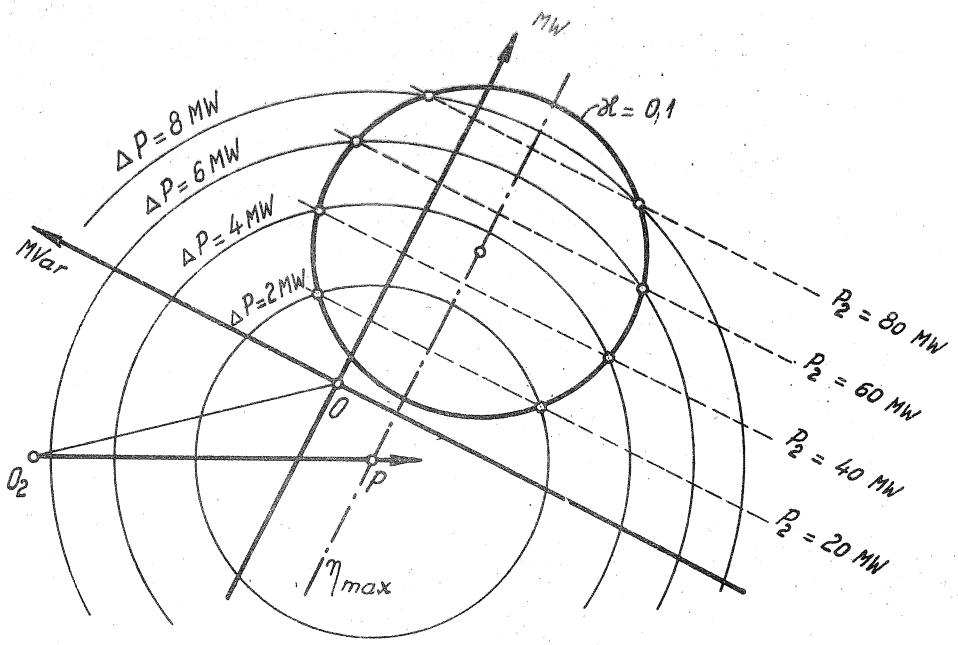
$$n_o = \sqrt{m_1^2 + \left(\frac{g}{f} - p^2\right)}. \qquad (23.18)$$

Na slici 23.6, u koju su unesene potrebne veličine, vidi se da su središta kružnica $\varkappa_{min}$ simetrično postavljena prema osi P = 0. Udaljenost središta tih kružnica od osi P = 0 dana je izrazom (23.18), a kako je pod korjenom prvi član mnogo manji od drugoga, to možemo pisati

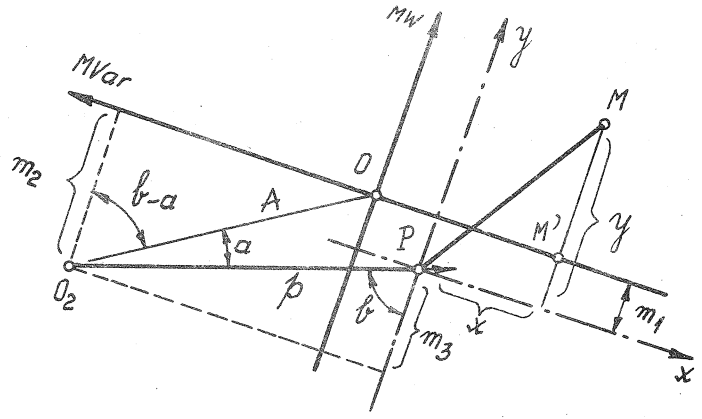
$$n_o \cong \sqrt{\frac{g}{f} - p^2} \qquad (23.19)$$

Iz gornjeg razmatranja ujedno slijedi, da familije kružnica s jedne i druge strane osi P = 0 leže simetrično, makar dvjema simetričnim kružnicama ne pripadaju iste apsolutne vrijednosti za $\varkappa$.

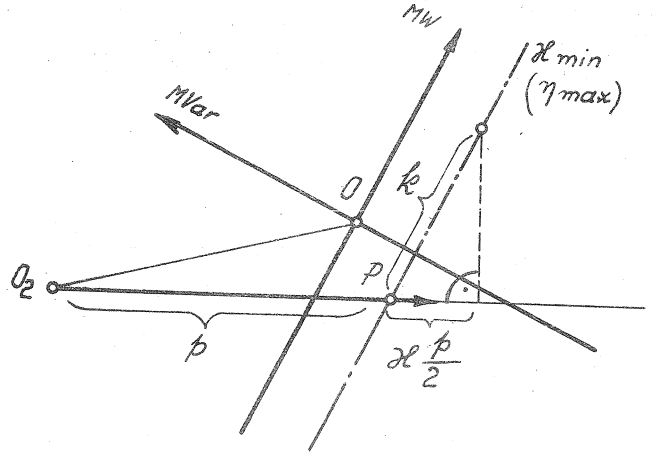
23. I.



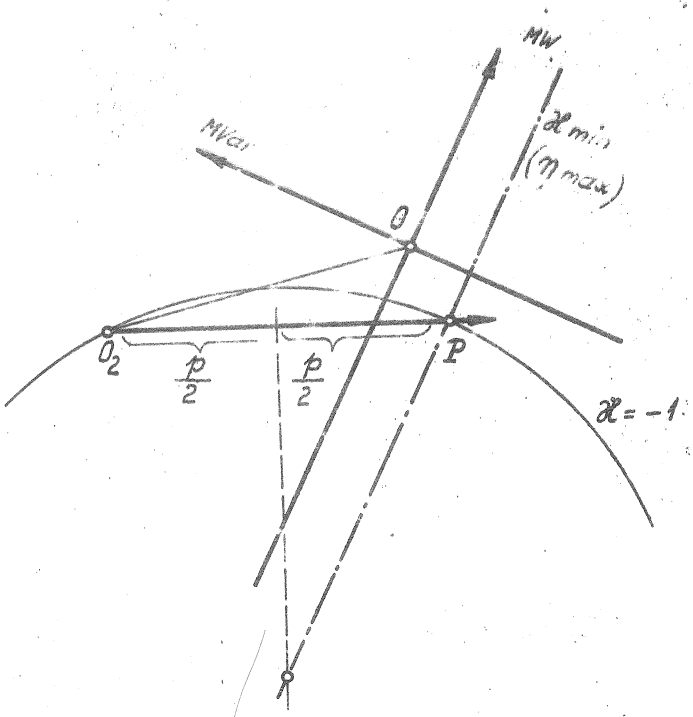
Sl. 23. 1. Konstrukcija kružnice $\mathcal{H}$ = konst.



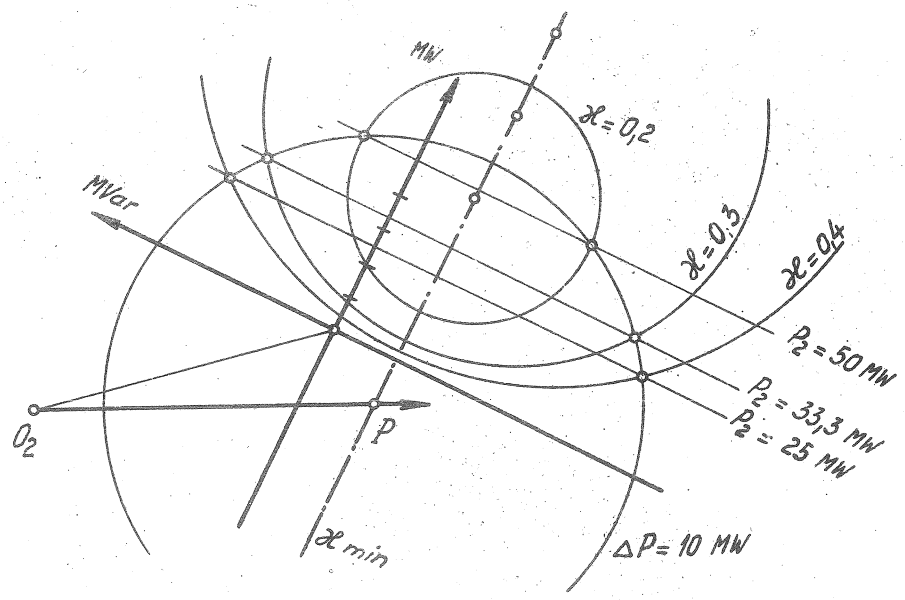
Sl. 23. 2. K određivanju kružnica $\mathcal{H}$ = konst.



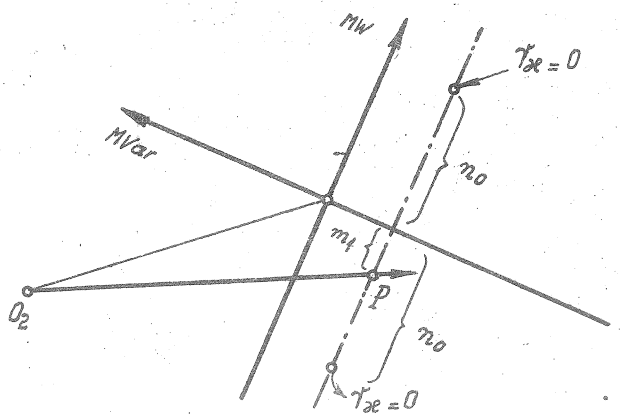
Sl. 23. 3. Konstrukcija središta za kružnice $\mathcal{H}$.



Sl. 23.4. Konstrukcija kružnice $\mathcal{K}=-1$



Sl. 23.5 Konstrukcija kružnica $\mathcal{K}$.



Sl. 23.6 Položaj središta.

24. Kružnice relativnih jalovih gubitaka λ

Isto kao kod djelatnih gubitaka, možemo i gubitke jalove snage prikazati u dijagramu u relativnim veličinama polazeći od izraza za relativne jalove gubitke:

$$\lambda = \frac{Q}{Q_2} \qquad (24.1)$$

Geometrijsko mjesto točaka definiranih sa λ = konst. naći ćemo opet geometrijskim putem. Odaberima na pr. λ = 0.2. Iz izraza (24.1) slijedi da je

$$Q_2 = \frac{1}{\lambda}\Delta Q = \frac{1}{0,2}\Delta Q = 5\cdot\Delta Q$$

Potražimo dakle sjecišta kružnica ΔQ sa pravcima Q_2 = konst. uz uslov da je $Q_2 = 5\cdot\Delta Q$ i ta sjecišta spojimo (slika 24.1). Vidimo da smo opet dobili kružnicu i to sa središtem na pravcu λ_{min}.

Istražit ćemo krivulju λ = konst. računskim putem. Kako pravac λ_{min} prolazi kroz središte kružnica ΔQ, a pravci Q_2 = konst. su okomiti na nj, to će dobivena sjecišta biti simetrična na pravac λ_{min}. Zbog toga će i krivulje λ = konst. biti simetrične na pravac λ_{min}, pa ćemo zato os x koordinatnog sistema položiti na pravac λ_{min}, a os y kroz točku Q (slika 24.2).

Dužina QM odgovara radiusu kružnica ΔQ, dakle prema izrazu (16.10) imamo

$$QM = \sqrt{q^2 - \frac{j}{h} - \frac{B^2\,\Delta Q}{U_2^2\,h}} \qquad (24.2)$$

Iz slike slijedi

$$QM = \sqrt{x^2 + y^2} \qquad (24.3)$$

Iz izraza (24.2)i(24.3) dobijemo

$$q^2 - \frac{j}{h} - \frac{B^2\,\Delta Q}{U_2^2\,h} = x^2 + y^2$$

$$\Delta Q = \frac{U_2^2\,h}{B^2}\left(q^2 - \frac{j}{h} - x^2 - y^2\right) \qquad (24.4)$$

Nadalje u slici dužina MM' odgovara snazi Q_2, te ako uvažimo mjerilo snaga, imamo

$$Q_2 = \frac{U_2^2}{B}(x + n_1) \qquad (24.5)$$

Iz slike slijedi

$$n_1 = n_2 - n_3$$

$$n_2 = q \sin b = q\,\frac{b''}{B}$$

$$n_3 = A \sin(b-a) = A(\sin b.\cos a - \cos b.\sin a)$$

$$= A\left(\frac{b''}{B}\frac{a'}{A} - \frac{b'}{B}\frac{a''}{A}\right) = \frac{1}{B}(b''a' - b'a'') = \frac{j}{B}$$

Dakle

$$n_1 = q\frac{b''}{B} - \frac{j}{B} \qquad (24.6)$$

Uvrstimo (24.6) u (24.5)

$$Q_2 = -\frac{U_2^2}{B}\left(q\frac{b''}{B} - \frac{j}{B}\right) \qquad (24.7)$$

Ako sada (24.4) i (24.7) uvrstimo u (21.1) dobit ćemo

$$\lambda = \frac{\Delta Q}{Q_2} = \frac{h}{B}\,\frac{q^2 - \frac{j}{h} - x^2 - y^2}{-x - q\frac{b''}{B} - \frac{j}{B}}$$

Sredimo li taj izraz i uvrstimo

$$\ell = \lambda\frac{B}{2h}, \qquad (24.8)$$

dobit ćemo

$$(x-\ell)^2 + y^2 = \ell^2 + \left(q^2 - \frac{j}{h}\right)\cdot(1+\lambda) \qquad (24.9)$$

Vidimo da smo dobili kružnicu sa središtem na osi x, t.j. na pravcu λ_{min}, i to na udaljenosti ℓ od točke Q. Radius kružnice iznosi

$$r = \sqrt{\ell^2 + q^2 - \frac{j}{h}\cdot 1 + \lambda} \qquad (24.10)$$

I ovdje vidimo da kružnice λ = konst. nisu ovisne o naponu U_2, jer taj napon ne ulazi u izraze (24.8) i (24.10).

Vrijednosti za λ mogu dakako biti pozitivne i negativne, te poprimiti i vrijednost λ = konst.-realno rješenje za radius i to prema izrazu (24.8) i (24.10)

$$r = \sqrt{q^2 - \frac{j}{h}} \qquad (24.11)$$

Usporedimo li to s izrazom (16.10) vidimo da je to radius kružnice $\Delta Q = 0$. To je jasno, jer kružnica $\lambda = 0$ i $\Delta Q = 0$ moraju u stvari biti jedna te ista kružnica.

Nadalje za razliku od kružnica λ = konst., ovdje može λ poprimiti sve moguće vrijednosti (ne postoji neki granični λ_{min}, odn. λ_{min}), a veličina radiusa ne može pasti na nulu. Ako u izraz (24.10) uvrstimo r = 0 ne ćemo za λ dobiti realno rješenje.

<u>Konstrukcija središta za kružnice λ = konst. i kružnica λ = -1.</u>

Položaj središta za kružnice možemo dobiti ne samo računom iz izraza (24.8) nego i geometrijskom konstrukcijom kao i za kružnice

$\varkappa$ = konst. Izraz (24.8) možemo naime preinačiti, i to

$$\ell = \lambda \frac{B}{2h} = \lambda \frac{b''}{2h} \frac{B}{b''} = \lambda \frac{q}{2} \frac{1}{\sin b} \qquad (24.11)$$

Konstrukcija je prikazana na slici 24.3. Redovito je kut b dosta velik, pa točnost ove konstrukcije potpuno zadovoljava. Iz te konstrukcije nadalje vidimo da središte kružnice $\lambda = -1$ leži na simetrali dužine O_2Q. Radius te kružnice prema izrazu (24.10) iznosi

$$r = \sqrt{\ell^2 + (q^2 - \frac{j}{h})(1 - 1)} = \sqrt{\ell^2} = \ell \qquad (24.12)$$

Dakle kružnica $\lambda = -1$ prolazi kroz točku Q, pa prema tome i kroz točku O_2 (slika 24.4). Prema tome i kružnica $\varkappa = -1$ i kružnica $\lambda = -1$ prolaze kroz točku O_2. To je i razumljivo, jer točki O_2 odgovara napon $U_1 = 0$, a to znači kratki spoj kod obrnutog smjera energije. Prema tome snaga na početku voda S_2 sva se troši na gubitke u vodu, kako djelatne tako i jalove. Dakle je $\Delta P = - P_2$ i $\Delta Q = - Q_2$ (kod obrnutog smjera energije treba promijeniti predznak snagama!), a odatle za točku O_2 slijedi: $\varkappa = -1$ i $\lambda = -1$.

Kao što smo vidjeli, za točku Q dobijemo $\lambda = -1$, pa prema tome su tu jalovi gubici ΔQ jednaki očitanju jalove snage s protivnim predznakom. To smo već vidjeli u izrazu (16.24).

Konstrukcija kružnica λ = konst.

Nakon što nadjemo položaje središta za pojedine kružnice, mogli bismo postupiti slično kao kod konstrukcije kružnica $\varkappa$ = konst. Medjutim ovdje može konstrukcija biti mnogo jednostavnija. Koristimo naime činjenicu, da sve kružnice λ = konst. sijeku os Q = 0 u iste dvije točke, a te dvije točke dobijemo kao sjecišta kružnice $\Delta Q = 0$ sa osi Q = 0 (slika 24.5). Za svaku drugu točku na osi Q = 0 je naime vrijednost ΔQ konačna, a $Q_2 = 0$, pa dobijemo

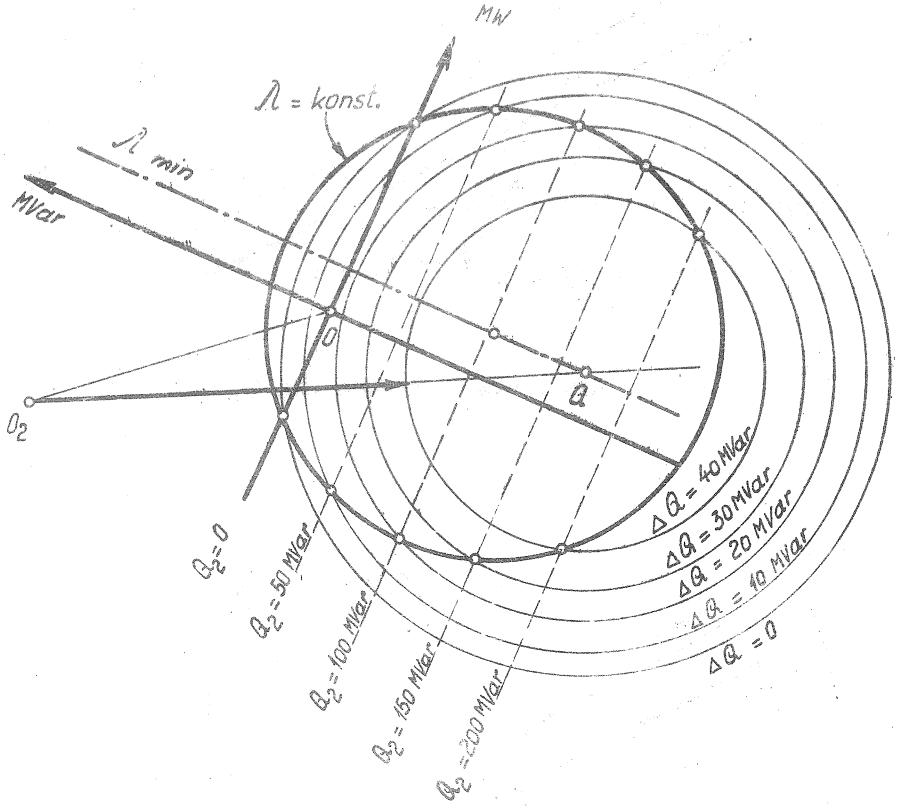
$$\lambda = \frac{Q}{0} = \infty .$$

Kružnice za konačnu vrijednost λ mogu dakle prolaziti samo kroz spomenuta dva sjecišta, a os Q = 0 predstavlja kružnicu $\lambda = \infty$. Kružnica $\lambda = 0$ ima središte u točki Q, jer je prema izrazu (24.8) $\ell = 0$. Odatle opet vidimo da su kružnice $\lambda = 0$ i $\Delta Q = 0$ identične.

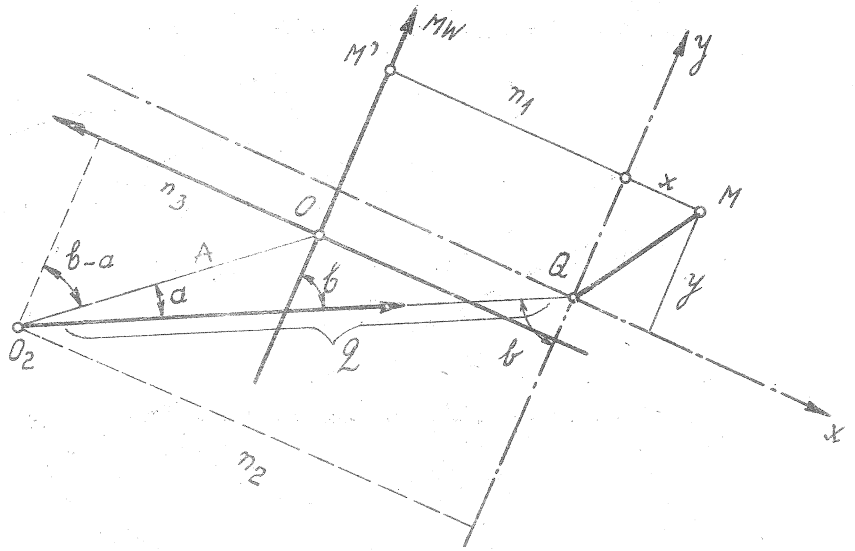
Što se λ više razlikuje od nule, to će središte biti dalje od točke Q. Za sve veće vrijednosti λ kružnice se sve više približavaju osi Q = 0 te konačno, ako λ poprimi beskonačnu vrijednost kružnica padne u os Q = 0. Zbog toga je kružnice λ = konst. teško crtati za područje sasvim u blizini osi Q = 0 (zbog velikih radiusa) a i greške očitanja dolaze jače do izražaja.

Kod konstrukcije kružnica λ = konst. ne moramo medjutim crtati najprije kružnicu $\Delta Q = 0$, kojoj bismo radius morali odrediti računom.

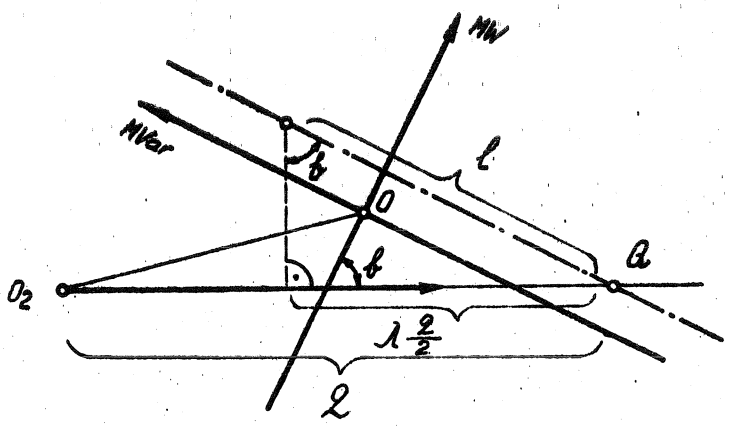
Potrebna sjecišta na osi Q = 0 možemo dobiti pomoću kružnice $\lambda = -1$, a tu je lako konstruirati i bez računa, kao što smo prije vidjeli.



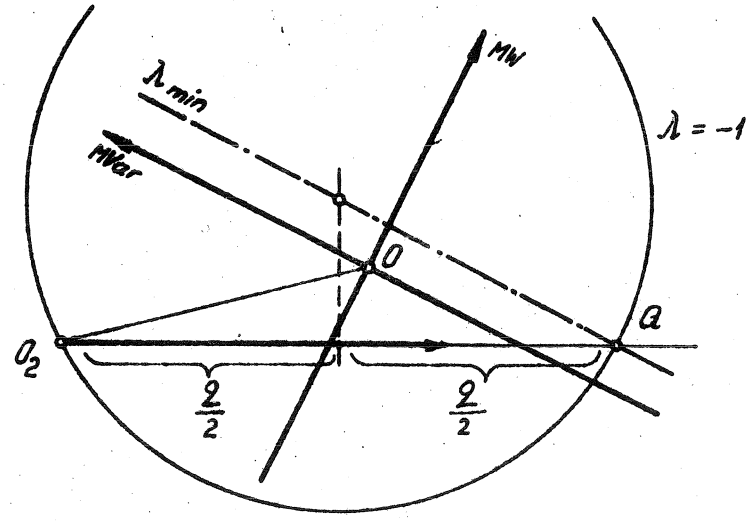
Sl. 24. 1. Konstrukcija kružnice λ = konst.



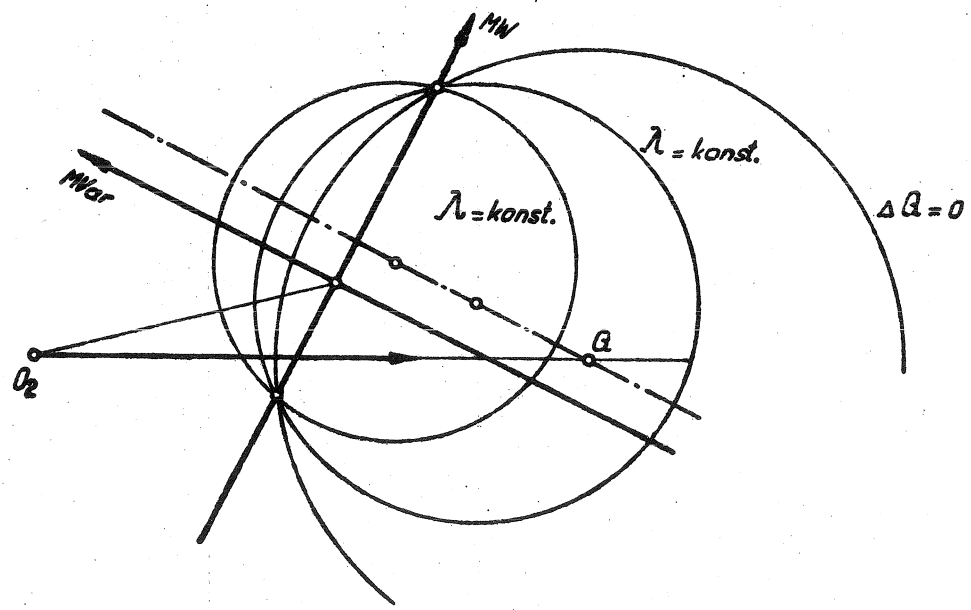
Sl. 24. 2. K određivanju kružnica λ = konst.



Sl. 24.3. Konstrukcija središta za kružnice λ.



Sl. 24.4. Konstrukcija kružnica $\lambda = -1$



Sl. 24.5. Konstrukcija kružnica λ = konst.

25. Geometrijska konstrukcija kružnica $\varkappa$

U prošloj točki smo vidjeli, da sve kružnice λ = konst. imaju ista sjecišta sa osi Q = 0. Kod kružnica $\varkappa$ = konst. naprotiv tih sjecišta na dijagramu uopće nema. Ako tražimo ta sjecišta računskim putem, dobit ćemo imaginarna rješenja. To je razumljivo, jer bi za točku na osi P = 0, koja ujedno leži na kružnici $\varkappa$ = konst. (gdje $\varkappa$ ima konačnu vrijednost), moralo biti $\Delta P = \varkappa$, $P_2 = 0$, a to je nemoguće, budući da su gubitci djelatne snage uvijek veći od nule.

Ako je udaljenost središta neke kružnice $\varkappa$ = konst. jednaka n_1, a njezin radius r_1, to će njezina jednadžba u koordinatnom sistemu x,y, kako je položen na slici 25.1, imati slijedeći oblik

$$(y - n_1)^2 + x^2 = r_1^2 \qquad (25.1)$$

Tražimo li apscise x_1 za sjecišta te kružnice s osi P = 0, postavit ćemo $y_1 = 0$, dakle

$n_1^2 + x_1^2 = r_1^2$, a odatle

$$x_1^2 = r_1^2 - n_1^2 \qquad (25.2)$$

Budući da je $r < n$, rješenja su imaginarna. Medjutim, u stvari, ipak i ostale kružnice $\varkappa$ = konst. prolaze kroz ta sjecišta, makar su sjecišta imaginarna. Zato možemo u opći izraz za bilo koju kružnicu

$$(y - n)^2 + x^2 = r^2 \qquad (25.3)$$

uvrstiti koordinate sjecišta x_1, y_1, pa dobijemo:

$$n^2 + (r_1^2 - n_1^2) = r_1^2$$

$$n^2 - n_1^2 = r^2 - r_1^2 \qquad (25.4)$$

Izraz (25.4) nam daje vezu izmedju udaljenosti središta i radiusa različitih kružnica. Ako kao osnovnu kružnicu uzmemo onu, gdje je $r_1 = 0$, i kojoj pripada udaljenost središta $n_1 = n_o$ [koju vrijednost možemo izračunati iz izraza (23.18)], dobijemo

$$n^2 - n_o^2 = r^2. \qquad (25.5)$$

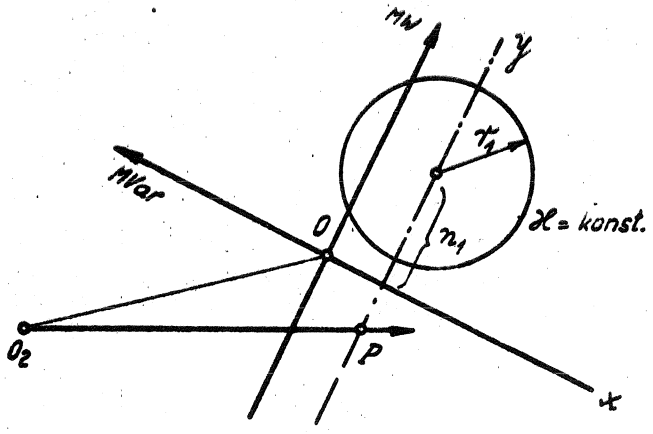
Modificiramo li taj izraz na

$$(n + n_o) \cdot (n - n_o) = r^2, \qquad (25.6)$$

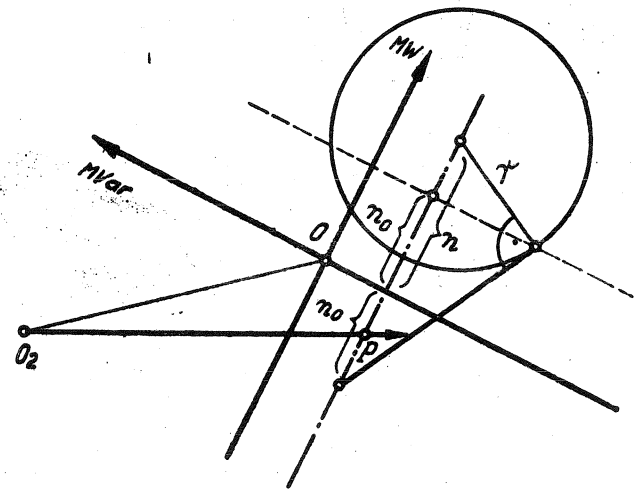
dobili smo osnov za geometrijsku konstrukciju kružnica $\varkappa$ = konst., kao što je prikazano na slici 25.2, iz koje jasno slijedi da je uslov (25.6) ispunjen. Ako dakle izračunamo n_o i odredimo središta za pojedine kružnice $\varkappa$ = konst, možemo prikazanom konstrukcijom odrediti pripadne radiuse.

Isto tako možemo odrediti središte kružnice za r = 0, ako imamo bilo koju kružnicu $\varkappa$ = konst već nacrtanu. Konstrukcija je prikazana na slici 25.3, iz koje jasno slijedi da je uvjet (25.5) ispunjen.

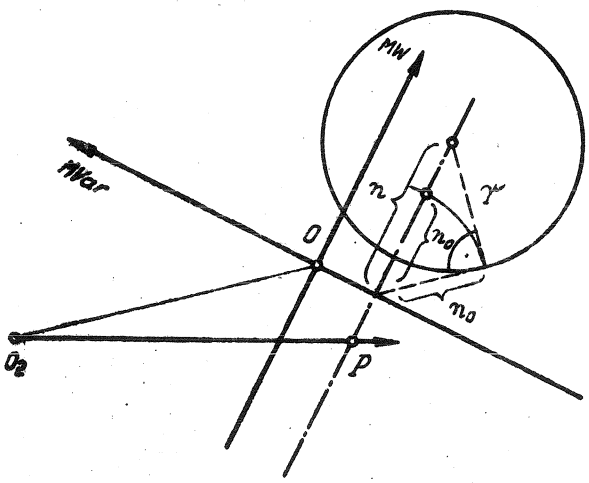
Iz dosadašnjeg izlaganja vidimo da familije kružnica $\varkappa$ = konst. i λ = konst. imaju po 4 karakteristične točke: po 2 sjecišta sa osi P = 0 odnosno Q = 0, i po 2 središta za kružnice s radiusom r = 0. Samo što su prve dvije točke imaginarne za familiju kružnica $\varkappa$ = konst, a druge dvije za familiju kružnica λ = konst.



Sl. 25.1. Uz geometrijsku konstrukciju kružnica $\mathcal{H}$ = konst.



Sl. 25.2 Konstrukcija kružnica $\mathcal{H}$ = konst.



Sl. 25.3 Konstrukcija dužine n_0.

26. Primjer

Uzmimo iste podatke kao prije, te u dijagramu ucrtajmo kružnice $\varkappa$= konst. i λ= konst. Za konstrukciju kružnica $\varkappa$= konst. poslužimo se postupkom prema točki 25.

Udaljenost središta za r = 0:

$$n_o \approx \sqrt{\frac{g}{f} - p^2} = \sqrt{1 - 0{,}968^2} = \sqrt{0{,}0620} = 0{,}249, \text{ t.j. } 24{,}9 \text{ mm}$$

Udaljenost središta za razne vrijednosti $\varkappa$:

$$k = \varkappa \frac{B}{2f} = \varkappa \frac{198{,}0}{2 \cdot 24{,}49} = \varkappa \cdot 4{,}04, \text{ t.j. } \varkappa \cdot 404 \text{ mm}$$

$\varkappa$ =	0,1	0,15	0,2
k =	40,4	60,6	80,8 mm

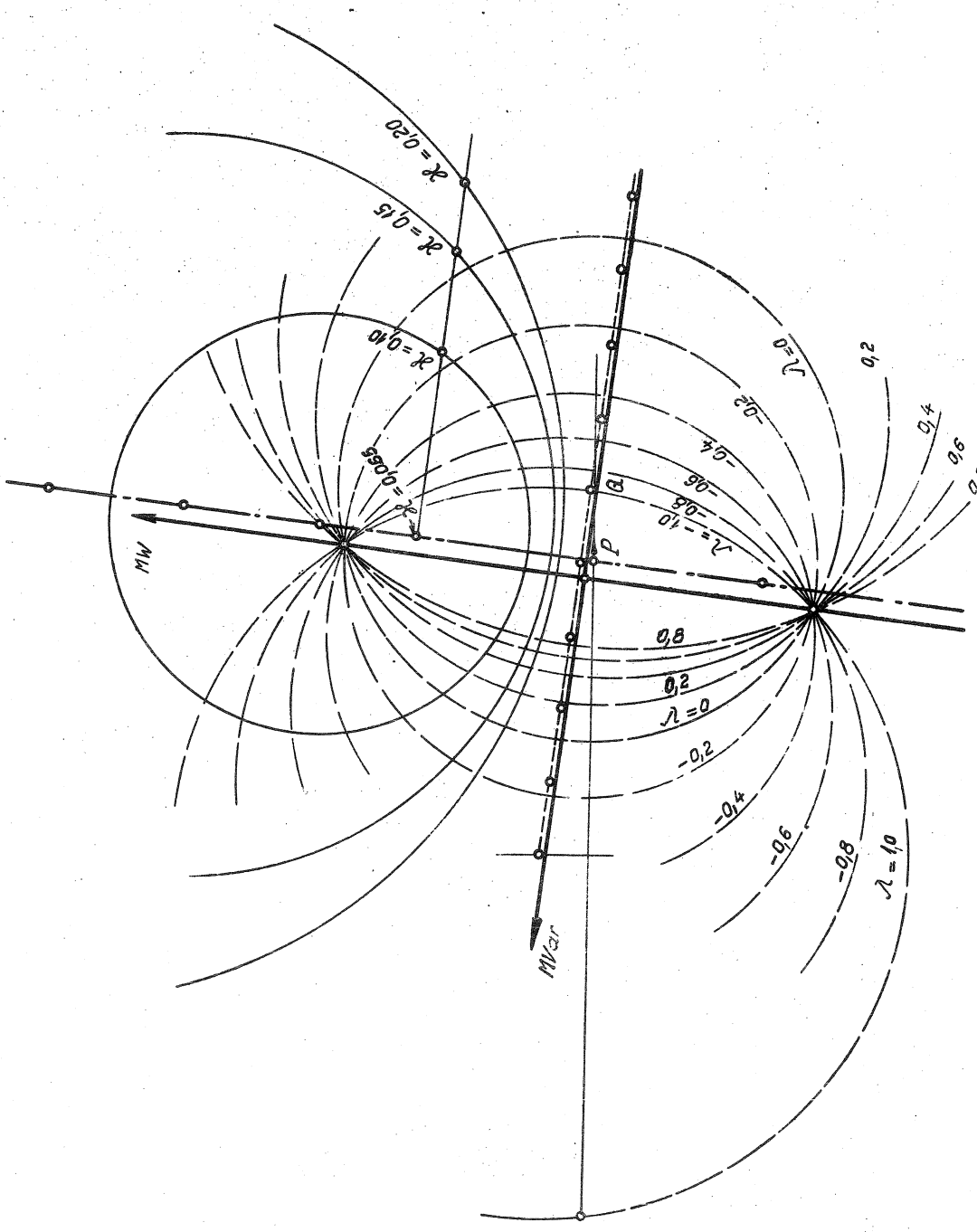
Vrijednost $\varkappa$ za r = 0 možemo najlakše odrediti, ako na dijagramu izmjerimo udaljenost k_o od točke P do središta kružnice sa r = 0, koja iznosi 26 mm.

Tome dakle odgovara

$$\varkappa = \frac{k_o}{404} = \frac{26}{404} = 0{,}065$$

Kružnice λ = konst. konstruiramo počam od kružnice λ = -1,0, pa dalje kako je prije prikazano.

26. I.



Sl. 26.1 Primjer za konstrukciju kružnica $\varkappa$ i λ.

27. Geometrijska konstrukcija kružnica ΔP i ΔQ

Vezu izmedju točaka na kružnicama $\varkappa$ = konst, ΔP = konst i P_2 = konst. iskoristili smo prije za konstrukciju kružnica $\varkappa$ = konst. (vidi sliku 23.1). Istu konstrukciju, kako je prikazana na toj slici, možemo iskoristiti za crtanje kružnica ΔP = konst., ako nacrtamo jednu kružnicu $\varkappa$ = konst. (na pr: $\varkappa$ = 0,1) i tražimo njena sjecišta sa pravcima P_2 = konst. Svakom sjecištu odgovaraju gubitci $\Delta P = \varkappa . P_2$ (u našem slučaju $\Delta P = 0,1 . P_2$), pa za toliku vrijednost ΔP treba ortati kružnicu kroz dotično sjecište, a sa središtem u točki P. Pomoćnu kružnicu $\varkappa$ = konst. dobro je ostaviti ucrtanu u dijagramu, jer može dobro poslužiti za interpolaciju kružnica ΔP = konst.

Isto tako možemo konstruirati i kružnice ΔQ = konst. samo pomoću kružnice λ = konst i pravaca Q = konst. (vidi sliku 24.1) Njihova sjecišta daju točke, kroz koje prolaze kružnice ΔQ = konst sa središtem u točki Q.

Pri tome je najbolje koristiti kružnicu $\lambda = -1$, koja se najlakše crta bez ikakovog proračunavanja, a pojedinim krugovima ΔQ = konst. pripada vrijednost odgovarajućeg pravca Q = konst, samo s protivnim predznakom. Kružnicu $\lambda = -1$ opet je korisno ostaviti u dijagramu radi lakše interpolacije.

Za crtanje kružnica ΔP = konst. redovito ne ćemo kao pomoćnu moći upotrebiti kružnicu $\varkappa = -1$, premda bi to inače bilo najugodnije, jer ta kružnica ima vrlo veliki radius (teško se crta!), a odredjivanje sjecišta s pravcima P = konst. ne bi bilo dovoljno točno.

Primjer: (slika 27.1)

Uz iste podatke kao prije crtat ćemo u dijagramu kružnice ΔP = konst. i ΔQ = konst. pomoću gore prikazane konstrukcije.

Kružnice ΔP = konst. :

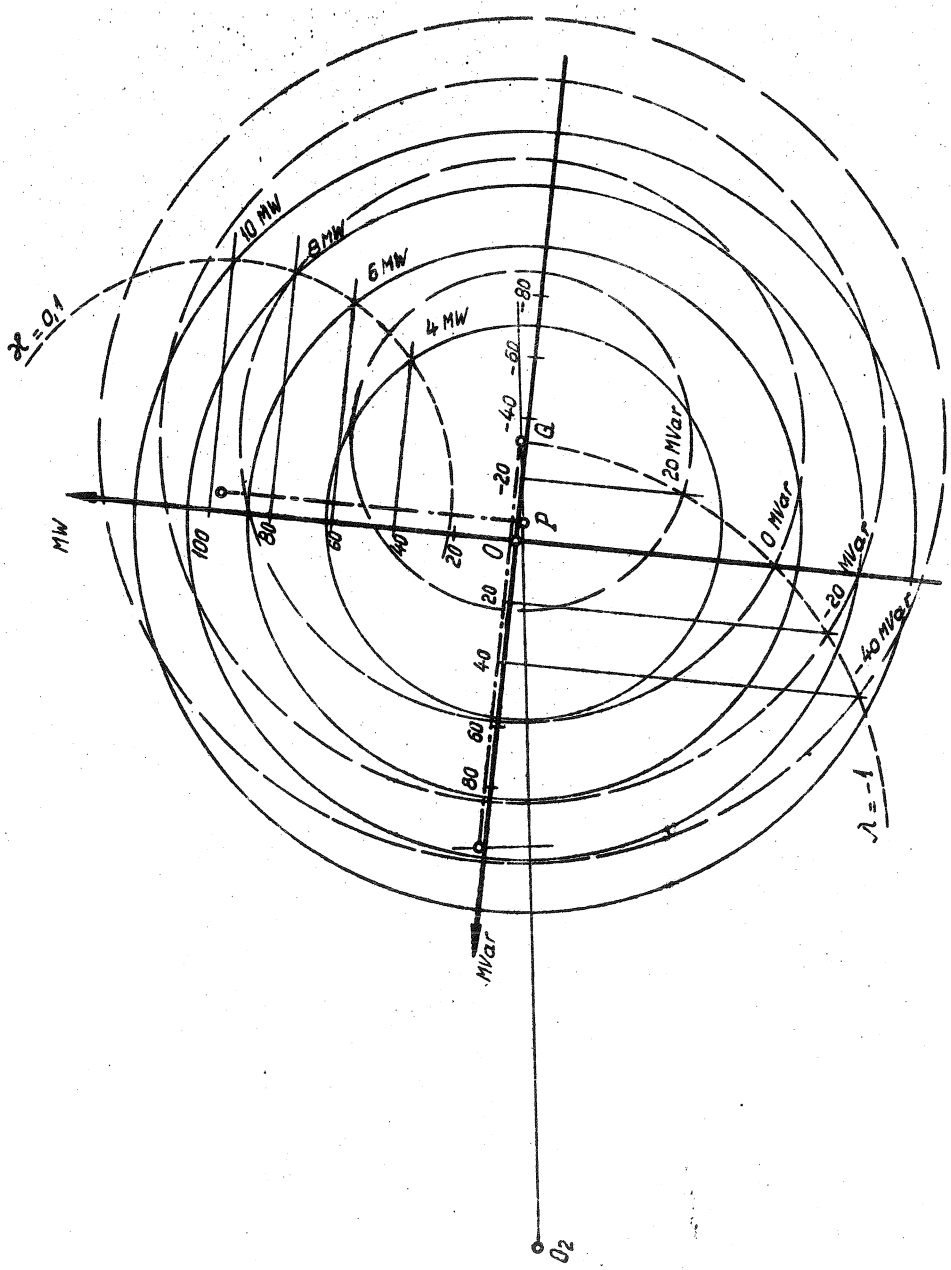
Za pomocnu kružnicu odaberimo $\varkappa = 0,1$.

$$k = \varkappa \frac{B}{2f} = 0,1 \frac{198,0}{2.24,49} = 0,404, \text{ t.j. } 40,4 \text{ mm}$$

$$r = \sqrt{k^2 - \left(\frac{s}{f} - p^2\right) \cdot (1 + \varkappa)} = \sqrt{0,404^2 - (1-0,968^2)1,1} = 0,308, \text{t.j. } 30,8 \text{ mm}$$

Za kružnice ΔQ = konst. nije potrebno računanje.

27. I



Sl. 27.1. Primjer za konstrukciju kružnica ΔP i ΔQ.

ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

28. Zaključak

U provedenim razmatranjima pokazano je, kako se kružni pogonski dijagram za električne prijenosne sisteme može proširiti daljnjim familijama krivulja, korisnima za upotrebu, i kako se pojedine konstrukcije mogu svesti na najjednostavniji postupak, većinom jednostavnom geometrijskom konstrukcijom i tako rekuć skoro uopće bez računanja. Nadalje su uočene zakonitosti, koje postoje u nacrtanom dijagramu, što povećava preglednost i kod konstrukcije i kod upotrebe dijagrama. Potrebni izvodi dani su u jednostavnom i lako prihvatljivom obliku, što čini da onaj, koji radi s kružnim pogonskim dijagramima, može lako ući u suštinu samog dijagrama i na taj način se njime najbolje koristiti.

Na temelju razrađenog materijala mogu se izraditi praktične upute za konstrukciju dijagrama, gdje će biti izostavljeni izvodi i dokazi, te odabrane one formule za proračun i one konstrukcije, koje u pojedinom slučaju najbolje odgovaraju. Pri tome se također mogu dati i upute, koje linije u dijagramu treba crtati, već prema tome, čemu dijagram u konkretnom slučaju treba da nam posluži. Nadalje se mogu unaprijed izraditi podlošci, u kojima će neke familije krivulja već biti ucrtane, što će olaksati izradu dijagrama. I konačno mogu se dati upute za njihovo korištenje. To sve međutim izlazi izvan okvira ovih razmatranja.

OZNAKE U FORMULAMA

$\bar{A} = A\angle a = a' + ja''$ ..... opća konstanta

$\bar{B} = B\angle b = b' + jb''$ ..... " " [Ω]

$\bar{C} = C\angle c = c' + jc''$ ..... " " [S]

C_o ..... linearni kapacitet voda [F/km]

$\bar{D} = D\angle d = d' + jd''$ ..... opća konstanta

G_o ..... linearni odvod voda [S/km]

f ..... pomoćna veličina

g ..... " "

h ..... " "

I ..... struja [A]

j ..... pomoćna veličina

k ..... udaljenost središta kružnica $\varkappa$

ℓ ..... udaljenost središta kružnica λ

l_v ..... dužina voda [km]

$m, m_1, m_2, m_3, \ldots$ ..... pomoćne veličine

n, n_1, n_2, n_3, n_o ..... " "

L_o ..... linearni induktivitet voda [H/km]

p ..... udaljenost središta kružnica ΔP

P ..... djelatna snaga [MW]

q ..... udaljenost središta kružnica ΔQ

Q ..... jalova snaga [MVar]

r ..... radius

R_o ..... linearni otpor vod [Ω/km]

S ..... prividna snaga [MVA]

U ..... napon [kV]

x ..... apscisa

y ..... ordinata

Y ..... poprečna admitancija [S]

Z ..... uzdužna impedancija [Ω]

δ ..... kut medju naponima

η ..... stepen korisnosti

$\varkappa$ ..... relativni djelatni gubitci

λ ..... relativni jalovi gubitci

ω ..... kružna frekvencija [1/sek]

$\cos\varphi$ ..... faktor snage

ΔP ..... gubitci djelatne snage [MW]

ΔQ ..... gubitci jalove snage [MVar]

ΔS ..... gubitci prividne snage [MVA]

Indeksi:

max	maksimalna vrijednost
min	minimalna vrijednost
S	stvarna vrijednost
T	transformator
V	vod
1, 2	krajevi voda

Kompleksne veličine označene su crticom odozgo (na pr. $\bar{U}_1$), a konjugirano kompleksne crticom odozdo (na pr. $\underline{U}_1$).

Realna komponenta kompleksne veličine označena je jednom crticom (na pr. U'_1), a imaginarna sa dvije crtice (na pr. U''_1).

LITERATURA

1. Woodruff L.F.: PRINCIPLES OF ELECTRIC TRANSMISSION, New York, 1946.

2. Rissik H.: POWER SYSTEM INTERCONNECTION, London, 1940.

3. Dalla Verde A.: LE GRANDI LINEE DI TRASMISSIONE D'ENERGIA, Milano, 1947.

4. Rüdenberg R.: ELEKTRISCHE HOCHLEITUNGSÜBERTRAGUNG AUF WEITE ENTFERNUNG, Berlin 1932.

5. Fallou J.: MREŽE ZA PRIJENOS ENERGIJE (prijevod s francuskog), Beograd. 1950.

6. Schwaiger A.: ELEKTRIČNI DALEKOVODI (prijevod s njemačkoga), Zagreb, 1950.

7. Electric Light & Power, 1952, July, str. 101-107, August, str. 123-128.

8. L'Energia elettrica 1951 god., br. 6, str. 339-341.

S V E U Č I L I Š T E U Z A G R E B U

Dr ing. BOŽIDAR STEFANINI

PRIJENOS ELEKTRIČNE ENERGIJE

II DIO

NADZEMNI VODOVI

ZAGREB 1964

Odobreno rješenjem Komisije za udžbenike i skripta Sveučilišta u Zagrebu
broj 08-468/1 od 30. III 1967.

Cijena za studente Sveučilišta u Zagrebu
N. din 5,20

Umnoženo u tiskari Izdavačkog odjela Sveučilišta u Zagrebu Trg Maršala Tita 14

823

S a d r ž a j

	Strana
I Općenito o nadzemnim vodovima ..... Vodiči, izolatori, pribor, mehanički proračun vodiča, raspored vodiča, stupovi, projektiranje i izgradnja, propisi.	1
II Mehanički stepen sigurnosti vodiča	47
III Mehanički proračun vodiča pomoću PN-krivulje	58
IV Izbor i dimenzioniranje izolatora	76

I. OPĆENITO O NADZEMNIM VODOVIMA

V O D I Č I

1. Materijal za vodiče nadzemnih vodova treba da ima ne samo veliku električnu vodljivost, nego i dovoljnu mehaničku čvrstoću. Zato se kao materijal za vodiče u prvom redu upotrebljava bakar, i to čisti elektrolitički tvrdo vučeni bakar. Radi uštede bakra sve se više upotrebljava čisti aluminij, koji doduše ima dosta manju specifičnu vodljivost (62 % od bakra), ali zato ima i mnogo manju specifičnu težinu (30,4 % od bakra), pa tako aluminijski vodič ima otprilike polovinu težine od bakrenog vodiča s istom vodljivom vrijednošću. Aluminij mora biti veoma čist (99,5%), jer inače dolazi do elektrolitskog razaranja (naročito su opasne sitne čestice bakra). Zbog relativno male mehaničke čvrstoće čisti aluminij ne dolazi u obzir za veće raspone, dakle uglavnom niti za visokonaponske dalekovode. Montažu aluminijskih vodiča (i kasnije opisanih vodiča kombiniranih s aluminijem) treba veoma brižljivo provoditi, da se aluminij sačuva od oštećenja i od onečišćenja.

Čelik se upotrebljava rijetko kao vodič zbog male vodljivosti i zbog skinefekta. Kod viših napona dolazi u obzir samo kod malih struja opterećenja, gdje drugi razlozi (mehanička čvrstoća, korona) zahtijevaju veliki prosjek. Zbog velike čvrstoće upotrebljava se za dozemna zaštitna užeta na dalekovodima viših napona, gdje njegova loša električna svojstva ne dolaze do izražaja. Da bi se sačuvao od rđe, mora biti dobro pocinčan u vatri.

Zbog poboljšanja mehaničkih svojstava legiraju se bakar i aluminij s drugim metalima, pri čemu se vodljivost ne smije previše smanjiti. Od legura dolazi u obzir bronca (Cu,Sn,Si), koja se često upotrebljava u onim rasponima voda s bakrenim vodičima, gdje se traži veća mehanička čvrstoća (veliki rasponi kod prijelaza rijeka i dolina, područja s velikim teretom leda i sl.). Nadalje se upotrebljava aldrej (0,3 do 05 % Mg, 0,4 do 0,7 % Si, 0,3 Fe, ostalo čisti Al), i to bilo za pojedine raspone, gdje je potrebna veća mehanička čvrstoća, bilo za cio vod.

Da se sjedine dobra električna svojstva bakra odnosno aluminija s dobrim mehaničkim svojstvima čelika, izrađuju se kombinirani vodiči od dva različita materijala. Čelična žica obložena bakrom upotrebljava se u inozemstvu, ali ne dolazi u obzir za visokonaponske vodove. Nasuprot tome, mnogo se upotrebljava uže kombinirano od aluminija i čelika, t.zv. alučel. Tu mehanički teret preuzima jezgra od čelika čvrstoće 120 kg/mm^2, a za vođenje struje se uzima u

račun samo aluminijski plašt. Ova užeta dolaze naročito u obzir kod vodova najvišeg napona, gdje se zbog velikih raspona ne može upotrebiti obično aluminijsko uže, a gdje ekonomski presjek bakra nije dovoljan a da se spriječe gubici korone. U posljednje vrijeme izrađuju se užeta od aldrej-čelika.

2. Način izvedbe vodiča. Razni načini izvedbe prikazani su na slici 1. Kao prvo imamo vodič u obliku žice (a), koja se zbog svoje krutosti kod većih presjeka ne upotrebljava. Niti obložena žica (b), na pr. čelik obložen bakrom iz istih se razloga ne upotrebljava kod dalekovoda.

Da se dobije veća gibljivost, izrađuju se vodiči kao užeta (c), pletena od većeg broja žica. Kod užeta od istog materijala upotrebljavaju se sve žice jednake debljine, koje mogu oko srednje žice biti sukane u više slojeva, pri čemu je svaki sloj sukan naizmjenice u drugu stranu. Broj žica u pojedinim slojevima iznosi redom 1, 6, 12, 18,24. Zbog sukanja povećava se nešto dužina žica (oko 3%), što treba uvažiti kod određivanja težine, otpora i sl.

Kombinirana užeta (d) izrađuju se prvenstveno od čelika i aluminija (t.zv. alučel). Pri tome se odnos čelika prema aluminiju drži na približno istoj vrijednosti, i to normalno 1:6, a kad je potrebna veća mehanička čvrstoća, 1:4 i 1:3. Zbog toga se ne mogu upotrebiti žice istog promjera. Da se smanje gubici zbog vrtložnih struja i histereze u čeličnoj jezgri, izrađuje se aluminijski plašt po mogućnosti u dva sloja sukana u suprotnu stranu.

Zbog sprečavanja vibracija vodiča uslijed vjetra(naročito kod velikih raspona i lakih vodiča), izrađuju se u posljednje vrijeme antivibraciona užeta(e), kod kojih je šupljina unutar aluminijskog plašta veća od promjera čelične jezgre. Tako kod vibracija nastaju međusobni udarci, koji dovode do prigušenja. Kod nas ovakva užeta još nisu upotrebljavana.

Za vrlo visoke napone upotrebljavaju se šuplji vodiči (f), koji su se razvili iz težnje, da se uskladi ekonomski prosjek bakrenog vodiča s vanjskim promjerom potrebnim zbog korone. Ovi se vodiči izrađuju samo od bakra, a ima različitih konstrukcija, kojima je svima svrha da vodič bude gibljiv i da sačuva svoj oblik. Zbog upotrebe alučela (koji ima znatno veći promjer od ekvivalentnog bakrenog užeta) i zbog primjene snopova vodiča za jednu fazu, gube šuplji vodiči na značaju.

3. Usporedba raznih vodiča treba da bude provedena za presjeke, koji imaju jednaku vodljivu vrijednost, na pr. za vodiče: bakar 95 mm^2, aluminij 150 mm^2, alučel 1:6 150 mm^2 i aldrej 185 mm^2. Tako dobijemo slijedeće rezultate usporedbe.

Alučel, a pogotovo aldrej, imaju manje provjese od bakrenih vodiča, pa zato uz istu visinu stupova dopuštaju upotrebu većih raspona. Aluminij ima najveće provjese, pa se niti ne upotrebljava za velike raspone.

Aluminij, a pogotovo aldrej i alučel, imaju veći promjer od bakra. Zbog toga su obzirom na gubitke korone prikladniji za visoke napone. Nasuprot tome kod većih promjera vodiča je i pritisak vjetra veći, što zahtijeva jače stupove zbog većih sila i veće razmake zbog većih otklona vodiča i izolatorskih lanaca. Ovo opet govori u prilog bakru.

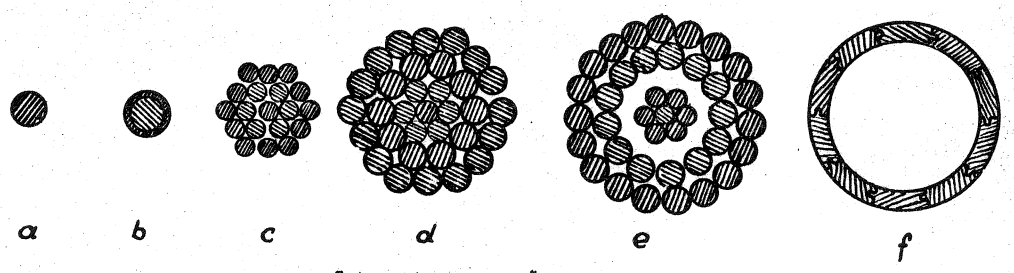
Za mehaničku sigurnost vodiča važan je stepen sigurnosti protiv loma. Taj je stepen dat višekratnikom nazivnog dodatnog tereta, kod kojeg naprezanje u provodniku dosegne vrijednost trajne čvrstoće. U tom pogledu najbolja svojstva ima aldrej, zatim alučel, pa bakar, a najslabiji je aluminij.

Težina užeta, a isto tako i težina užeta s dodatnim teretom, najveća je za bakar, a zatim redom za alučel, aldrej pa aluminij. To je važno s jedne strane za iznos investicije (kad se uzme u račun i cijena), a s druge strane za vertikalna opterećenja stupova, izolatora i pribora.

4. Izbor vodiča. Vodiči moraju ispunjavati uslove u mehaničkom, električnom, toplotnom i ekonomskom pogledu, te u pogledu pada napona i stabilnosti prenosa.

U mehaničkom pogledu: provjesi i naprezanja u vodičima ne smiju prekoračiti dozvoljenu granicu pri ekstremnim klimatskim uslovima. U električnom pogledu: jakost polja u blizini vodiča ne smije prekoračiti električnu čvrstoću uzduha, da ne dođe do gubitaka korone. Grubo se može uzeti da promjer vodiča u milimetrima mora iznositi bar jednu devetinu linijskog napona voda u kolovoltima. U toplotnom pogledu: nadtemperatura vodiča uslijed Džulove topline ne smije prekoračiti dozvoljenu granicu, koja se obično uzima 40°C. Jakost struje u vodiču, koja odgovara tolikoj nadtemperaturi, dana je u tablicama svojstava vodiča.

U ekonomskom pogledu:ukupni godišnji troškovi prenosa (troškovi kapitala, uzdržavanja i gubitaka) moraju biti minimalni. Odatle slijedi ekonomska gustoća struje od cca 1,8 A/mm^2 za bakrene i 1,o A/mm^2 za aluminijske vodiče. U pogledu pada napona: ne smije odabrani vodič izazvati veće promjene napona od dozvoljenih, što je ograničeno dozvoljenim promjenama napona kod potrošača i raspoloživim opsegom regulacije. U pogledu stabilnosti prenosa: ne smije nastati prevelik fazni pomak napona na početku voda prema naponu na kraju voda, koji bi mogao spriječiti stabilni rad.



Sl. 1. Izvedbe vodiča.

5. Svojstva materijala za vodiče

Materijal	Specifična ili vlastita težina	Temperaturni koef. rastezanja	Modul elastičnosti	Trajna vlačna čvrstoća	Ispitna vrstoća	Električna vodljiva vrijed.	Specifični otpor	Temperaturni koef. otpora
	kg/cm^3	za 1^oC	kg/mm^2			Sm/mm^2	$\Omega mm^2/m$	za 1^oC
Bakar	$8,9.10^{-3}$	$1,7\cdot10^{-5}$	13000	30	40	56	0,01786	0,00382
Bronza I				40	50	48	0,02082	
Bz.II	$8,65\cdot10^{-3}$	$1,66\cdot10^{-5}$		50	60	36	0,02777	0,0040
Bz. III				62	70	18	0,05555	
Aluminij	$2,70\cdot10^{-3}$	$2,3.10^{-5}$	5600	12	18	34,8	0,02874	
Aldrey			6000	24	30	30	0,0333	0,0036
Čelik I	$7,8\cdot10^{-3}$	$1,23\cdot10^{-5}$	19200	32	40	oko 7-9	0,143-0,111	0,0045
Če II		$1,1\cdot10^{-5}$	19600	56	70	oko 6,7	0,149	
Če III				90	120	oko 6,5	0,154	0,0048
Če IV			20000	110	150	oko 6,3	0,159	
Čelik-Aluminij Al/Če 5,7-6	$3,45\cdot10^{-3}$	$1,95\cdot10^{-5}$	7500		Al 18 Če 120	34,8	0,02874	0,0040
Al/Če 4,3	$3,65\cdot10^{-3}$	$1,76\cdot10^{-5}$	7900					
Al/Če 3	$3,98\cdot10^{-3}$	$1,66\cdot10^{-5}$	8700					
Čelik/Aldrey Aldrey/Če 5,7-6	$3,45\cdot10^{-3}$	$1,87\cdot10^{-5}$	8000		Aldrej 30 Če 120 30		0,0333	0,0036

6. Izvedba i svojstva homogenih užeta

Presjek mm^2		Žica prema DIN 48200		Nazivni promjer užeta d mm	Težina užeta kg/1000 m			
Nazivni	Stvarni	Broj	Promjer		Bakar bronza	Bronza II i III	Aluminij i Aldrey	Čelik
10	10	1 + 6 = 7	1,35	4,1	84-99	82-96	-	73-88
16	15,9		1,7	5,1	136-155	132-151	41-47	115 - 141
25	24,2		2,1	6,3	208-236	202-230	63-72	175-215
35	34,4		2,5	7,5	298-332	289-322	90-101	252 - 300
50	49,5		3	9	428-467	416-453	130-142	368 - 426
	48,3	1 +6+ +12 =19	1,8	9	416-472	405-459	126-143	353- 427
70	65,8		2,1	10,5	566-643	550-625	172-195	477 - 585
95	93,2		2,5	12,5	809-903	787-878	246-274	686 - 817
120	117		2,8	14	1021-1128	992-1096	310-342	869 -1016
150	147	1 + 6 + +12+18 = 37	2,25	15,8	1270-1434	1235-1394	385-435	1073-1300
185	182		2,5	17,5	1577-1761	1533-1711	478-534	1337-1592
240	243	1+6+12+ +18+24 = 61	2,25	20,3	2085-2365	2036-2298	635-717	1770-2145
300	299		2,5	22,5	2600-2904	2627-2823	789-881	2205-2625

7. Izvedba i svojstva užeta od alučela

Presjek		Ukupni presjek	Promjer užeta d	Težina	Omjer presjeka
Nazivni mm^2	Stvarni aluminija mm^2	mm^2	mm	kg/1000 m	Al/Če
16/2,5	15,3	17,8	5,4	61,8	6
25/4	23,8	27,8	6,8	96,6	6
35/6	34,3	40,0	8,1	139,1	6
50/8	48,3	56,3	9,6	195,5	6
70/12	66,2	77,8	11,6	274,5	5,7
95/15	90,0	105,0	13,4	368,0	6
120/21	122,6	143,5	15,7	505,0	5,8
150/25	148,9	174,3	17,3	614,0	5,8
185/32	183,8	215,5	19,2	760,0	5,8
210/36	209,1	244,9	20,5	864,0	5,8
240/40	236,0	276,1	21,7	971,0	5,9
300/50	294,9	344,4	24,2	1208,0	6
125/29	124,6	153,7	16,1	576,0	4,3
170/40	171,8	211,9	18,9	794,0	4,3
210/50	212,1	261,6	21,0	980,0	4,3
310/100	305,0	405,2	26,6	1668,0	3
340/110	341,2	451,8	28,1	1864,0	3

Nazivni presjek mm^2	Čelična jezgra				Alu-omotač		
	Broj žica	Promjer mm	Promjer užeta mm	Presjek mm	Broj žica	Promjer mm	Broj slojeva
16/2,5		1,8		2,55		1,8	1
25/4		2,25		4,0		2,25	1
35/6	1	2,7		5,7	6	2,7	1
50/8		3,2		8,0		3,2	1
70/12		1,45	4,35	11,6		1,8	2
95/15		1,65	4,95	15,0		2,1	2
120/21		1,95	5,85	20,9		2,45	2
150/25	1+6=	2,15	6,45	25,4	26	2,7	2
185/32	=7	2,4	7,20	31,7		3,0	2
210/36		2,55	7,65	35,8		3,2	2
240/40		2,7	8,10	40,1		3,4	2
300/50		3,0	9,0	49,5		3,8	2
125/29		2,3	6,9	29,1		2,3	2
170/40		2,7	8,1	40,1	30	2,7	2
210/50		3,0	9,0	49,5		3,0	2
310/100	1+6+12 = 19	1x2,92+18x 2,57,	13,2	100,2	78	2,23	3
340/110		1 x3,1+18x2,7	13,9	110,6		2,36	3

8. Omski otpor i nazivni teret vodiča.

Homogeni vodiči

Nazivni presjek mm^2	Srednji omski otpor kod 20°C Ω/km					Nazivni teret kg					
	Bakar	Alu-minij	Aldrey	Bronze			Bakar Čelik Če I,	Alu-minij	Al-drey	Bronze		
				Bz I	Bz II	Bz III				Bz I	Bz II	Bz III Če II
1o	1,786	-	-	2,o86	2,785	5,571	399	-	-	497	6o2	7oo
16	1,123	1,8o7	2,o96	1,314	1,734	3,486	637	287	476	791	952	1113
25	o,738	1,187	1,377	o,857	1,143	2,286	973	434	728	1211	1456	1694
35	o,525	o,845	o,98o	o,6oo	o,814	1,628	1372	581	1o29	1722	2o58	24o8
5o	o,364	o,586	o,68o	o,414	o,557	1,114	1981	84o	1484	2478	2975	3465
5o	o,372	o,599	o,694	o,432	o,574	1,147	1938	874	1349	2431	2888	3382
7o	o,271	o,435	o,5o5	o,316	o,421	o,842	2641	1178	1976	3287	3952	4598
95	o,192	o,3o9	o,358	o,221	o,3oo	o,6oo	3724	1577	2793	4674	5586	6536
12o	o,153	o,246	o,285	o,179	o,237	o,474	4674	1995	3515	5852	6o3o	8189
15o	o,122	o,196	o,227	o,141	o,189	o,378	5883	2664	44o3	7363	88o6	1o286
185	o,o98	o,158	o,183	o,1135	o,1541	o,3o8	7252	3o71	5439	91o2	1o878	12728
24o	o,o74	o,118	o,137	o,o853	o,1148	o,229	9699	4392	7259	12139	1451o	16958
3oo	o,o6o	o,o96	o,112	o,o689	o,o934	o,1868	11956	5o63	8967	15oo6	17934	2o984

Nazivni presjek mm^2	Srednji omski otpor Ω/km		Nazivni teret kg	
	Čelik-Aluminij	Čelik-aldrey	Čelik-aluminij	Čelik-Aldrey
16/2,5	1,833	2,183	523	689
25/4	1,2oo	1,4	818	1 o79
35/6	o,833	o,97o	1 143	1 542
5o/8	o,6oo	o,691	1 6o8	2 168
7o/12	o,435	o,5o4	2 324	3 o4o
95/15	o,319	o,369	3 o7o	4 o5o
12o/21	o,235	o,273	4 251	5 567
15o/25	o,192	o,223	5 o17	6 763
185/32	o,158	o,181	6 229	8 386
21o/36	o,138	o,159	7 o68	9 512
24o/4o	o,123	o,141	7 938	1o 7o2
3oo/5o	o,o96	o, 113	9 839	13 3o8
125/29	o,23	-	5 161	-
17o/4o	o,167	-	6 959	-
21o/5o	o,137	-	8 991	-
31o/1oo	o,o95	-	15 789	-
34o/11o	o,o85	-	17 582	-

9. Trajno dopuštena struja u vodičima.
(za frekvenciju 5o Hz i nadtemperaturu 40°C)

Homogeni vodiči:

Naziv presjeka mm^2	Trajna struja A		
	Bakar	Aluminij	Aldrey
16	115	92	88
25	151	121	115
35	174	149	142
5o	234	187	178
5o	231	185	176
7o	282	226	215
95	357	283	269
12o	411	329	313
15o	477	382	363
185	544	435	414
24o	63o	5o2	479
24o	641	513	488
3oo	747	598	468

ALUČEL:

Nazivni presjek mm^2	Trajna struja A	Nazivni pr. mm^2	Trajna str. A
16/2,5	9o	21o/36	49o
25/4	125	24o/4o	53o
35/6	145	3oo/5o	615
5o/8	17o	125/29	355
7o/12	235	17o/4o	44o
95/15	29o	21o/5o	5o5
12o/21	345	31o/1oo	63o
15o/25	4oo	34o/11o	68o
185/32	455	-	-

IZOLATORI

10. Materijal za izolatore. Prvenstveno se upotrebljava porculan zbog dobrih mehaničkih i električnih svojstava, te kemijske postojanosti (čvrstoća na pritisak 4000 do 4500, na vlak 300 do 500, savijanje 500 do 1000 kg/cm^2; probojna čvrstoća 34 do 38 kV/mm). Vanjska površina se glazira, obično smeđe ili zeleno, rjeđe bijelo, da bude manje upadljivo. Važan je upliv veznog sredstva između pojedinih dijelova, koje mora biti mehanički čvrsto, a ne smije bubriti, da ne dođe do prskanja porculana. Nadalje se upotrebljava steatit, koji ima veću mehaničku čvrstoću, i staklo kaljeno na posebni način da se dobije dovoljna mehanička čvrstoća.

11. Vrste izvedbe. Za niže napone upotrebljavaju se zvonasti izolatori nasađeni na potpornju, koji su se razvili iz niskonaponskih izolatora. Za više napone upotrebljavaju se lančasti izolatori, koji se sastavljaju u izolatorske lance, pri čemu se za viši napon uzme veći broj članaka. Granica upotrebe je oko 35 kV, za koji se napon upotrebljavaju kako zvonasti tako i lančasti izolatori. Ipak postoje zvonasti izolatori za napone do 60 kV, a s druge strane bolje je već od 20 kV na više upotrebljavati lančaste izolatore.

Prednosti zvonastih izolatora su: manja visina stupova, kod upotrebe savinutih potpornja nisu potrebne konzole, lakša montaža. Prednosti lančastih izolatora su: manja vjerojatnost trajnog luka i premoštenja zbog ptica i grana, lak prelaz na viši napon dodavanjem članaka, jeftinije održavanje izmjenom pojedinih članaka, manje sile kod prekida vodiča uslijed otklona lanca.

Zbog uštede izrađuju se u posljednje vrijeme štapni izolatori za napone 50 do 120 kV, koji se kao i lančasti objese na stup, ali se sastoje samo od jednog komada u obliku štapa, ako napon voda ne prelazi 110 kV.

12. Zvonasti izolatori mogu biti jednodjelni ili izrađeni u više dijelova i sastavljeni kitanjem ili pomoću kudelje. Kod tipa HD (slika 2) preuzimlje porculan samo naprezanja na pritisak, jer se vrh potpornja nalazi iznad žljeba za vodič. Zbog toga ima izolator usprkos glomazne glave malu probojnu čvrstoću. To je izbjegnuto kod tipa HW (slika 3), gdje porculan djelomice preuzimlje i naprezanja na savijanje. Još veću probojnu čvrstoću ima tip VHD (slika 4), a naročito veliku mehaničku čvrstoću

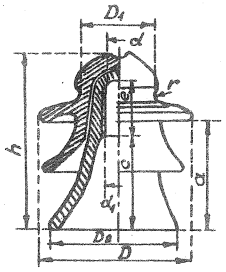
protiv udarca ima tip VHW (slika 5). Da se spriječe radio - smetnje uslijed tinjavog izbijanja između vodiča odnosno potpornja i porculana, može glava i unutarnja šupljina biti metalizirana.

13. Lančasti izolatori. Prvotno rješenje predstavljaju Hewlett-izolatori, koji su se međusobno spajali u lanac pomoću komada užeta, ali zbog nesimetričnog oblika imaju mnogo mana, pa su već zastarjeli.

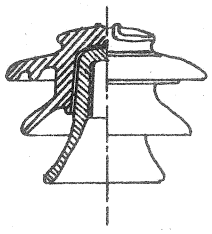
Danas se najviše upotrebljavaju kapasti ili kraće K-izolatori (slika 6), gdje porculan ima rotacioni oblik. Odozgo je na porculan nakitana kapa, a odozdo je usađen batić i zalit olovnom legurom ili zakitan, tako da je porculan napregnut na pritisak. Kapa je izrađena od temperlijeva pocinčanog u vatri, a batić od čelika. Da se spriječi proboj, izrađuju se masivni izolatori, t.zv. VK-izolatori (slika 7). Kod njih je keramički dio napregnut na vlak, pa se zato uz porculan upotrebljava i steatit. Normalna izvedba ima 2 kape, ali se za srednje napone izrađuje i sa 2 batića. Posebna izvedba K - izolatora za maglu ima nekoliko tanjura. Danas se i za nosne i za zatezne lance upotrebljavaju isti tipovi članaka, jedino se kod zateznih uzme obično jedan članak više. Zbog uštede mogu se nosni lanci izvesti od članaka manjeg tipa. Štapni izolatori (slika 8) su ustvari produženi masivni izolatori.

14. Izbor izolatora. Izabrani izolatori moraju odgovarati u električnom i u mehaničkom pogledu. U električnom pogledu preskočni napon izolatora mora iznositi najmanje 1,1 (2 U + 1o) kV, gdje je U nazivni napon voda, i to pri kiši od 3 mm/min pod kutem od 45°, vodljivosti 1oo μS/cm, kod 2o°C i 76o mmHg. Ako se želi veća sigurnost može se upotrebiti stroža formula 1,1 (2,2 U + 2o) kV. Kod visine iznad 1ooo m nad morem mora se preskočni napon povećati za 7,5% na svakih 5oo m visine, a isto ga tako treba povećati kod opasnosti od onečišćenja izolatora. Za lance otklonjene više od 45° od vertikale povećava se preskočni napon za 15%, a isto toliko ako na lance djeluje trajno puni međufazni napon. Kod izolatorskih lanaca treba paziti na to, da na donje članke otpada razmjerno veći napon, pa se broj članaka obično odabire iz tabele s podacima za lance različite dužine.

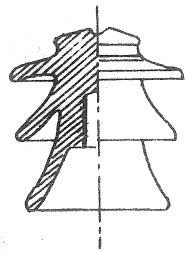
U mehaničkom pogledu ne smije trajni ispitni teret nosnih izolatora biti manji od tereta, koji nastupa kod dvostrukog nazivnog dodatnog tereta na vodičima. Kod zateznih izolatora trajni ispitni teret ne smije biti manji od trajne čvrstoće vodiča pomnožene presjekom vodiča.



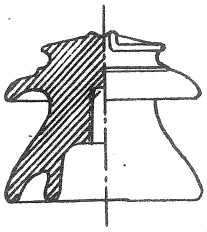
Sl. 2. HD-izolator



Sl. 3. HW-izolator

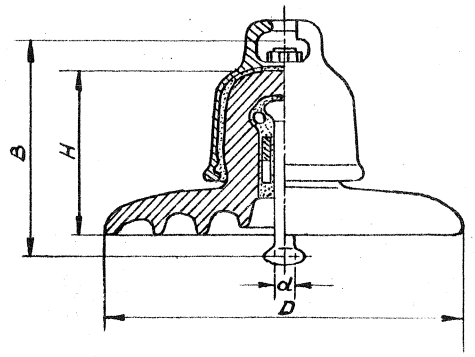


Sl. 4. VHD-izolator



Sl. 5. VHW-izolator

(prema podacima tvornice Rosenthal)



Sl. 6. Kapasti izolator

Dimenzije

Oznaka	RIGF. Nr.	Mjere u mm				Strujna staza mm	Težina
		B	H	D	d		
K 1	4o57	11o	8o	17o	11	18o	2,1
K 3	4o51	17o	12o	28o	16	32o	6,5
K 5	4o53	19o	14o	28o	2o	32o	9,3

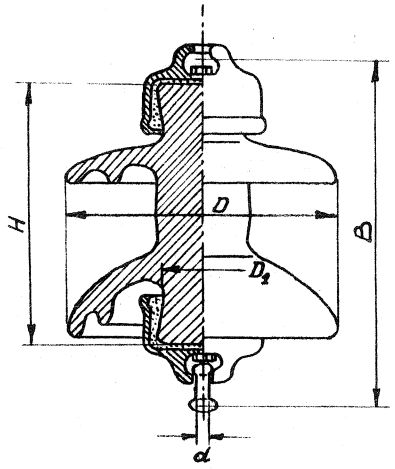
Svojstva jednog članka:

Oznaka	RIG F.Nr.	Srednji probojni napon	Ispitni teret	Elektromeh.teret	Maksim. dozvoljeni teret	Srednji prekidni teret
K 1	4o57	1o4	1,2	2,5	o,7	4,8
K 3	4o51	143	2,o	8	2,15	12
K 5	4o53	143	3,o	9	2,45	14

Oznaka		Stanje lanca	Broj članaka										
			1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14
K 1	Preskočni napon (Izmjerena vrijednost)	Suh	65	110	155	200	240						
		Pod kišom 10^{0} μScm^{-1}	35	65	100	130	160						
	Udarni val $^{1}/_{50}$ μS		85	150	205	270	330						
K 3	Preskočni napon (Izmjerena srednja vrijednost)	Suh	80	150	210	270	330	390	450	505	615	720	820
		Pod kišom 10^{0} μScm^{-1}	55	105	155	200	245	285	329	371	455	539	623
	Udarni val $^{1}/_{50}$ μS		127	209	291	373	455	536	618	700	864	1027	1191
K 5	Preskočni napon (Izmjerena srednja vrijednost)	Suh	85	160	220	285	350	410	470	530	650	760	865
		Pod kišom 10^{0} μScm^{-1}	55	105	155	200	245	285	325	370	455	540	625
	Udarni val $^{1}/_{50}$ μS		135	225	315	405	495	575	660	745	920	1090	1260

16. Izvedba i svojstva punih izolatora

(prema podacima tvornice Rosenthal)



Sl.7. Puni izolator

Svojstva jednog članka:

Oznaka	RIG - F. Nr.	Srednji probojni napon	Ispitni teret	Strujna staza mm
VK 6o/2	3116	5,5	3	1,38
VK 75/2	3117	1o	5,5	2,5
VK 85/2	3118	12	6,6	3,o

Dimenzije

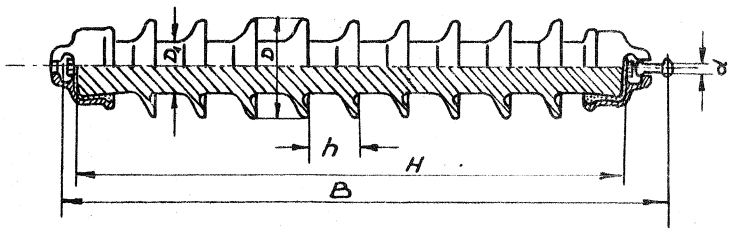
Oznaka	RIG-F.Nr.	Mjere u mm					Struj-na staza	Teži-na
		B	H	D	D_1	d		
VK 6o/2	3116	25o	19o	2oo	6o	11	45o	6
VK 75/2	3117	34o	25o	25o	75	16	57o	11,5
VK 85/2	3118	38o	28o	28o	85	2o	66o	16

Električna svojstva lanca:

Oznaka		Stanje lanca	Broj članaka							
			1	2	3	4	5	6	7	8
VK 6o/2	Preskočni napon (Izmjerena srednja vrijednost	suh	11o	2oo	29o	37o	46o			
		Pod kišom loo μScm^{-1}	75	14o	2o5	27o	335			
	Udarni val $^1/_{5o}$ μS		182	3oo	423	545	664			
VK 75/2	Preskočni napon	suh	14o	255	37o	49o	6oo	71o	82o	91o
	(Izmjerena srednja vrijednost)	Pod kišom loo μScm^{-1}	95	18o	26o	34o	42o	495	57o	64o
	Udarni val $^1/_{5o}$ μS		245	385	532	677	818	964	11o9	125o
VK 85/2	Preskočni napon	suh	145	28o	41o	545	67o	795	91o	1ooo
	(Izmjerena srednja vrijednost)	Pod kišom loo μScm^{-1}	1oo	195	285	375	465	545	625	7o5
	Udarni val $^1/_{5o}$ μS		255	414	537	736	895	1o55	1214	1373

17. Izvedba i svojstva štapnih izolatora.

(prema podacima tvornice Rosenthal)



Sl. 8. Štapni izolator

Dimenizije:

Oznaka	RIG. F.Nr.	Broj rebara	Mjera u mm						Struj. staza	Komadna tež.
			B	H	h	D	D_1	d		
VKL 6o/5	314o	5	4o5	34o	45	12o	6o	11	54o	5,5
VKL 6o/7	312o	7	525	44o	45	12o	6o	16	74o	8
VKL 75/9	31oo	9	895	81o	75	15o	75	16	1295	16,5
VKL 75/12	3o97	12	112o	1o35	75	15o	75	16	1715	2o
VKL 75/13	3o91	13	1195	111o	75	15o	75	16	1855	21,5
VKL 75/14	31o2	14	127o	1185	75	15o	75	16	1995	23
VKL 85/9	12oo3	9	93o	83o	75	16o	85	2o	13o5	23
VKL 85/13	3111	13	123o	113o	75	16o	85	2o	1865	28
VKL 85/14	3114	14	13o5	12o5	75	16o	85	2o	2oo5	3o

Svojstva jednog članka:

Oznaka	RIG-F. Nr.	Srednji prekid. teret	Ispitni teret t	Maksim. dozvolj. teret t
VKL 6o/5	314o	5,5	3	1,37
VKL 6o/7	312o	6,7	3,7	1,68
VKL 75/9	3loo	lo	5,5	2,5
VKL 75/12	3o97	lo	5,5	2,5
VKL 75/13	3o91	lo	5,5	2,5
VKL 75/14	3lo2	lo	5,5	2,5
VKL 85/9	12oo3	12	6,6	3,o
VKL 85/13	3111	12	6,6	3,o
VKL 85/14	3114	12	6,6	3,o

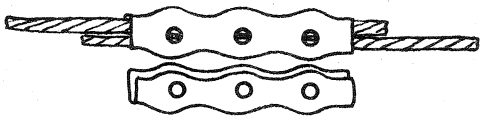
Električna svojstva lanca:

Oznaka	RIG-	Broj	Preskočni napon (izmjerena srednja vrijednost		Udarni val
			suh	pod kišom loo μScm^{-1}	
		1	12o	9o	177
VKL 6o/5	314o	2	225	17o	328
		3	32o	25o	478
		1	15o	12o	218
VKL 6o/7		2	28o	22o	41o
		3	4oo	32o	6oo
		1	265	225	382
VKL 75/9	3loo	2	51o	435	713
		3	7oo	635	1155
		1	4oo	34o	573
KL 75/14	3lo2	2	78o	66o	1163
		3	looo	92o	1755
		1	4oo	34o	573
VKL 85/14		2	78o	66o	1163
		3	looo	92o	1755

PRIBOR

18. Materijal koji se upotrebljava kod pribora za nadzemne vodove je: bakar, aluminij i lijevana bonca za dijelove, gdje je u prvom redu važna električna vodljivost; silicijeva bronca za dijelove koji se hladni oblikuju; čelik za dijelove gdje je važna mahanička čvrstoća, a koji se dijelovi mogu izraditi kovanjem; i temperljev (pocinčan u vatri) za dijelove koji se ne mogu iskovati.

19. Spojnice i strujne stezaljke. Spojnice služe za mehaničko i električno spajanje vodiča, a primjenjuju se za nastavljanje užeta, za izradu zamke kod zateznog veza i za izradu odvojaka. Za užeta od jednog materijala, a manjeg presjeka, obično se upotrebljavaju vijčane spojnice (slika 9), koje mogu biti jednodjelne ili dvodjelne. Na isti način su izrađene i zakovične spojnice, samo što umjesto vijaka imaju zakovice, Za veće presjeke za kombinirane vodiče upotrebljavaju se zarezne spojnice (sl. lo), koje imaju oblik ovalne cijevi, a montiraju se posebnim alatom. Za razliku od gornjih postoje i razne izvedbe centričnih spojnica, koje su složenije izvedbe.



Sl. 9. Vijčana spojnica.

Sl. 10. Zarezna spojnica.

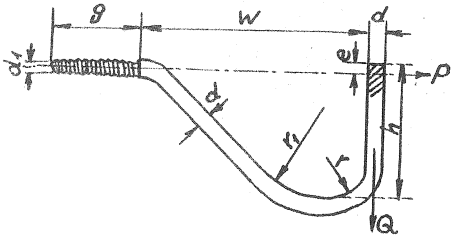
Strujne stezaljke služe samo za električni spoj, te ne podnose mehaničko oterećenje. Postoje razne izvedbe, kojima je svima svrha, da stvore dobar spoj za prolaz struje, koji se po potrebi može lako rastaviti. Za spajanje bakrenih vodiča s aluminijskim postoje posebne stezaljke, koje sprečavaju stvaranje elektrolitskog članka između bakra i aluminija.

20. Potpornji za zvonaste izolatore. Za pričvršćenje zvonastih izolatora na stupove upotrebljavaju se savinuti ili ravni potpornji, izrađeni od čelika te premazani katranom ili bojom. Učvršćenje izolatora na potpornje se obično izvodi pomoću kudelje.

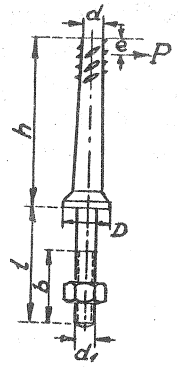
Savinuti potpornji (slika 11) se upotrebljavaju za jednostavne drvene nosne stupove, u koje se obično ušarafe.

Ravni potpornji (slika 12) upotrebljavaju se za montažu na konzole, i uopće gdje su mehanička opterećenja veća, a izvode se u nekoliko tipova različite čvrstoće.

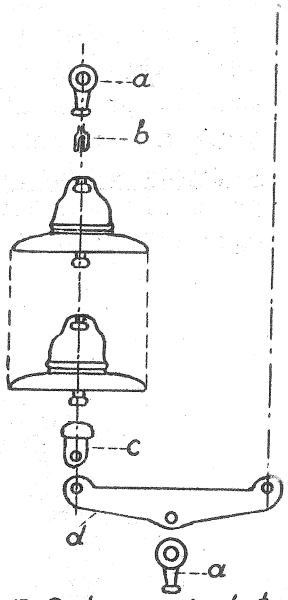
21. Pribor za izolatorske lance. Za sastavljanje jednostrukih i dvostrukih lanaca upotrebljava se mnogo raznih dijelova, od kojih su najobičniji prikazani na primjeru dvostrukog lanca (slika 13). To su: (a) uška za pričvršćivanje na stup, (b) zatik za osiguranje veze između batića i kape na izolatoru (c) zdjelica s uškom, (d) odstojnik za održavanje razmaka među lancima.



Sl. 11. Savinuti potporanj



Sl. 12. Ravni potporanj



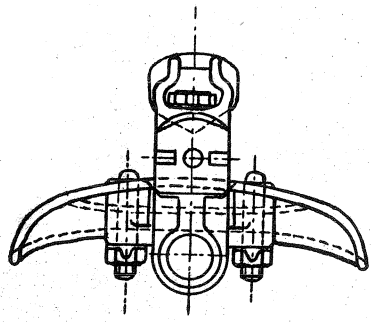
Sl. 13. Pribor za izolatorske lance.

22. Pričvršćenje vodiča na izolatore vrši se kod nosstupova sa zvonastim izolatorima pomoću vezne žice od mekog bakra odnosno aluminija; postoje razne vrste vezova, a upotrebljavaju se i posebni stremeni. Na zateznim stupovima se za vez oko zvonastog izolatora obično uzimaju vijčane spojnice, a ima i specijalnih spojnica u tu svrhu.

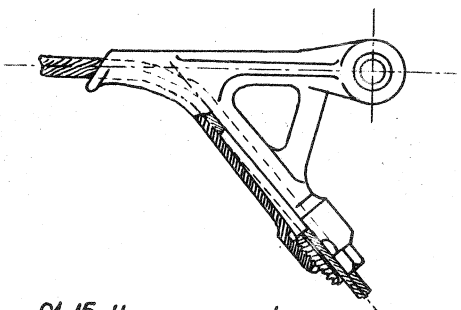
Na izolatorske lance se vodič pričvršćuje pomoću nosnih odnosno zateznih stezaljki. Od nosnih stezaljki najjednostavnija je čvrsta stezaljka, ali se zbog smanjenja umora vodiča obično upotrebljavaju gibljive stezaljke (slika 14) Ako se želi izbjeći dimenzioniranje stupova za slučaj prekida vodiča, upotrebljavaju se iskočne stezaljke, iz kojih vodič kod stanovitog otklona lanca iskoči. Zateznih stezaljki ima također mnogo raznih izvedbi, a svrha im je svima da čvrsto drže vodič i ujedno da spriječe prekid vodiča uslijed oslabljenja na mjestu pričvršćenja i uslijed umora materijala. Najobičnije su klinaste i konusne stezalje (slika 15), a upotrebljavaju se i pužaste stezalje (slika 16).

Za pričvršćnje dozemnih užeta na stup postoje posebne stezaljke, kako nosne tako i zatezne; nosne mogu biti čvršće i gibljive.

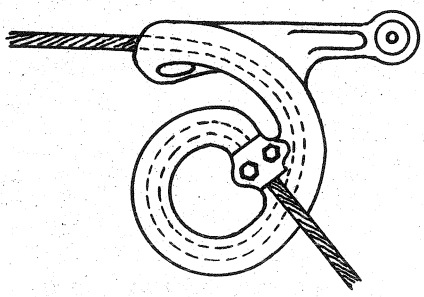
23. Zaštita od električnog luka postavlja se na izolatorske lance da se spriječi oštećenje izolatora uslijed preskoka, time što se električni luk, koji nastane od atmosferskih prenapona, drži podalje od izolatora. Ovo dolazi u obzir kod važnijih vodova i viših napona, ukoliko je ovjesište lanca uzemljeno. U prvom redu upotrebljavaju se rogovi (slika 17) i to za nosne lance obično 4 roga, a za zatezne 2 roga s gornje strane. Za više napone upotrebljavaju se nadalje zaštitni prsteni (slika 18), koji ujednačuju električno polje, pa se ukupna razlika potencijala jednoličnije podijeli na pojedine članke. U nekim zemljama se upotrebljavaju cijevni odvodnici, koji štite ne samo izolatorski lanac nego i cio vod od prekida pogona, time što u najkraćem vrijeme ugase luk; kod nas nisu upotrebljeni na vodovima.



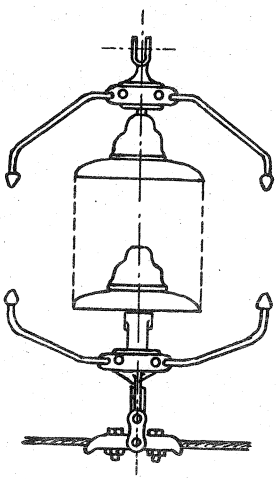
Sl. 14. Gibiva nosna stezaljka.



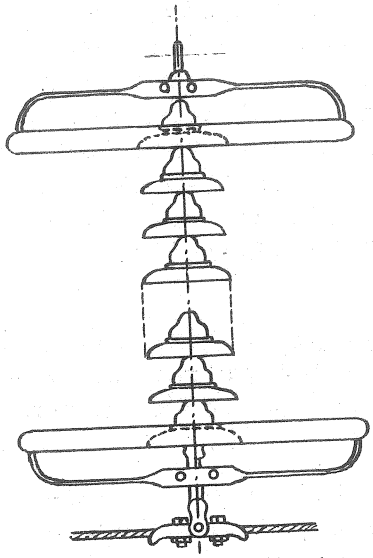
Sl. 15. Konusna zatezna stezaljka.



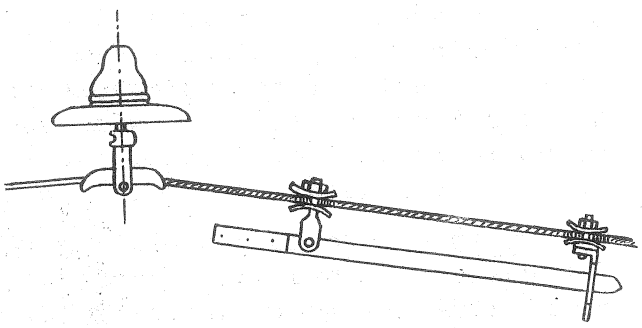
Sl. 16. Pužasta stezaljka



Sl. 17. Zaštitni rogovi



Sl. 18. Zaštitni prsteni



Sl. 19. Poluzni prigušivač

24. Prigušivači vibracija se upotrebljavaju kod vodova s lakim vodičima i velikim rasponima, da se spriječi lom vodiča kao posljedica umora materijala uslijed vibracije, koje stvara djelovanje vjetra. Jedan je način upotreba prigušenih obloga ili prutova, koji se montiraju na uže na mjestu pričvršćenja u nosne stezaljke. Drugi je način upotreba prigušivača, montiranih uz nosne stezaljke, koji titraju drugačije od vodiča, što dovodi do prigušenja. Postoje razne izvedbe: polužni prigušivač u obliku nesimetrične poluge (slika 19), opruženi prigušivač s utegom vezanim uz oprugu i sl.

MEHANIČKI PRORAČUN VODIČA

25. Osnovni pojmovi. Provjes vodiča je najveća vertikalna udaljenost od vodiča do spojnice tačaka, gdje je vodič ovješen na stupove. Pod naprezanjem vodiča podrazumijeva se naprezanje na vlak, jer se smatra da je vodič potpuno savitljiv. Što je vodič jače zategnut, to će naprezanje biti veće, a provjes manji, i obrnuto. Ovo treba međusobno uskladiti, da niti naprezanje ne pređe dozvoljenu granicu, niti da se uže spusti preblizu zemlji.

Na veličinu provjesa i naprezanja djeluje ne samo vla-

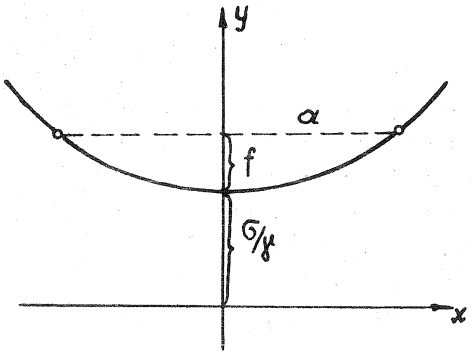
stita težina vodiča nego i dodatni teret, kojim se uzima u račun težina leda (snijega, inja i sl.) i djelovanje vjetra. Radi jednostavnosti računa se da dodatni teret djeluje vertikalno prema dolje. Nazivni dodatni teret za mehanički proračun vodiča određuje se prema osnovnom dodatnom teretu, koji se izračunava po formuli 18o $\sqrt{d}$ grama po metru (d je promjer vodiča u mm). U normalnim se klimatskim prilikama kao nazivni dodatni teret uzima osnovni dodatni teret, a ako su klimatski uslovi teži, onda se već prema terenskim prilikama uzima za nazivni dodatni teret 1,6, 2,5 odnosno 4,o puta osnovni dodatni teret.

Temperatura zbog toplotnog rastezanja provodnika također djeluje na provjes i naprezanje, pa se kod proračuna uzima minimalna temperatura sa 2o°C, maksimalna sa +4o°C, a temperatura pri kojoj djeluje dodatni teret sa - 5°C.

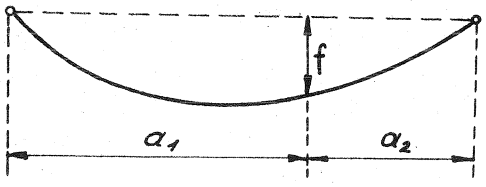
Maksimalno radno naprezanje ne smije biti veće od dozvoljenog naprezanje, koje je propisano za pojedini materijal vodiča i navedeno u točki 5. Ove vrijednosti ne smiju biti prekoračene niti kod -2o°C niti kod -5°C uz dodatni teret. Međutim, da se iskoriste mehanička svojstva provodnika, u pravilu ga treba montirati tako, da se kod nepovoljnijeg od gornja dva uslova postigne vrijednost maksimalnog radnog naprezanja. Pri tome se podrazumijeva horizontalna komponenta naprezanja, koja je jednaka naprezanju u najnižoj točki vodiča. Činjenica, da je naprezanje u ostalim tačkama užeta nešto veće, uzima se u račun kod kontrole mahaničkog stepena sigurnosti.

26. Oblik i dužina vodiča. Vodič u rasponu između dva stupa poprimi oblik lančanice (slika 2o), koja je definirana izrazom

$$y = \frac{\sigma}{g} \operatorname{ch} \frac{x}{\frac{\sigma}{g}}$$



Sl. 20. Lančanica



Sl. 21. Provjes izvan sredine raspona

Tu je σ - horizontalno naprezanje vodiča, g - reducirani teret vodiča, t.j. težina vodiča po dužnom metru (eventualno s dodatnim teretom) reducirana na 1 mm^2 presjeka. Gornji izraz možemo razviti u red

$$y = \sigma/g \left[1 + \frac{1}{2!} \left(\frac{x}{\sigma/g} \right)^2 + \frac{1}{4!} \left(\frac{x}{\sigma/g} \right)^4 + \ldots \right]$$

Ako treći i daljnje članove zanemarimo, vidimo da lančanicu možemo zamijeniti parabolom.

Dužina vodiča za pola raspona dana je izrazom

$$l/2 = \sigma/g \quad \mathrm{sh} \frac{x}{\sigma/g} ,$$

što također možemo razviti u red

$$l/2 = \sigma/g \left[\frac{x}{\sigma/g} + \frac{1}{3!} \left(\frac{x}{\sigma/g} \right)^3 + \frac{1}{5!} \left(\frac{x}{\sigma/g} \right)^5 + \ldots \right]$$

Obično se uzimlju u račun samo prva dva člana.

27. Provjes možemo izračunati iz izraza za lančanicu. Ako u taj izraz uvrstimo a = raspon, t.j. horizontalna udaljenost između tačaka, gdje je vodič ovješen, dobijemo provjes

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

Obično se uzimlje u račun samo prvi član. Provjes izvan sredine raspona (slika 21) možemo izračunati po formuli

$$f = \frac{a_1 a_2 g}{2\sigma} .$$

28. Jednadžba stanja omogućuje proračunavanje potrebnih veličina, ako se mijenja temperatura i dodatni teret. S druge strane na dužinu provodnika djeluje promjena temperature(toplinsko rastezanje) i promjena naprezanja(elastično rastezanje); s druge strane promjena dužine vodiča mora biti u skladu s oblikom lančanice i promjenom tereta vodiča;odatle slijedi jednadžba stanja

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

Tu je: ϑ = temperatura, β = toplinski koeficijent rastezanja, E= modul elastičnosti, a indeksi 1 i 2 označuju pojedina stanja. Ako u ovu jednadžbu uvrstimo podatke ϑ_1, σ_1 i g_1 za jedno stanje, te na pr. ϑ_2 i g_2 za drugo stanje, možemo izračunati čime je drugo stanje definirano. Prema formuli za provjes možemo po potrebi pomoću σ_1 i σ_2 izračunati odnosne provjese f_1 i f_2.

29. Kritični raspon je onaj raspon, kod kojega naprezanje dostiže vrijednost maksimalnog radnog naprezanja kako kod $-20^{\circ}C$ tako i kod $-5^{\circ}C$ uz dodatni teret. Važan je radi određivanja početnog stanja vodiča. Ako je stvarni raspon veći od kritičnog, onda će naprezanje kod $-5^{\circ}C$ uz dodatni teret biti veće nego kod $-20^{\circ}C$: i obrnuto. Zato kod raspona većih od kritičnoga treba kao početno stanje uzeti $-5^{\circ}C$ uz dodatni teret i naprezanje jednako maksimalnom radnom naprezanju. Kod raspona manjih od kritičnog treba naprotiv kao početno stanje s maksimalnim radnim naprezanjem uzeti $-20^{\circ}C$ bez dodatnog tereta . Kritični raspon se računa po formuli

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

Tu je: σ_{max} = maksimalno radno naprezanje, g_z - reducirani teret zaleđenog vodiča, g_0 - reducirani teret nezaleđenog vodiča.

30. Kritična temperatura je ona temperatura, kod koje je provjes nezaleđenog vodiča jednak provjesu zaleđenog vodiča kod $-5^{\circ}C$. Važna je radi određivanja stanja kod kojeg dolazi do maksimalnog provjesa. Ako je kritična temperatura manja od $+40^{\circ}C$, onda će maksimalni provjes nastupiti kod $-5^{\circ}C$ uz dodatni teret. Kritična temperatura računa se po formuli

$$\vartheta_k = \frac{\sigma_{max}}{\beta E} \left(1 - \frac{g_0}{g_z} \right) - 5.$$

Upotreba kritične temperature dolazi u obzir samo za raspone veće od kritičnih.

31. Podaci za užeta od bakra, aluminija i aldreja

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Nazivni presjek mm^2	Dodatni teret $18o\sqrt{d}$ g/m,	Dodatni teret reduciran $\frac{g/m}{mm^2}$,	Bakar, $\sigma_{max} = 19 kg/mm^2$			Aluminij, $\sigma_{max} = 7 kg/mm^2$			Aldrej, $\sigma_{max} = 12 kg/mm^2$		
			Ukupni teret reduciran $\frac{g/m}{mm^2}$,	Kritični raspon m	Kritična temperatura °C	Ukupni teret reduciran $\frac{g/m}{mm^2}$,	Kritični raspon m	Kritična temperatura °C	Ukupni teret reduciran $\frac{g/m}{mm^2}$,	Kritični raspon m	Kritična temperatura °C
16	4o7	25,6	34,8	44	58,8	-	-	-	-	-	-
25	452	18,7	27,9	59	52,8	21,5	3o	42	21,5	52	71
35	493	14,5	23,7	69	47,9	17,3	4o	4o	17,3	67	69
5o[1]	54o	11,2	2o,4	84	42,3	14,o	47	39	14,o	79	66
7o	583	8,85	18,o	99	36,9	11,6	57	37	11,6	97	62
95	636	6,85	16,o	115	32,o	9,6	7o	34	9,6	119	58
12o	673	5,76	14,9	129	28,3	8,55	8o	32	8,55	137	55
15o	715	4,87	14,o	143	25,o	7,65	91	3o	7,65	155	51
185	753	4,14	13,3	157	22,o	6,94	1o2	28	6,94	174	48
24o[2]	811	3,34	12,5	177	18,o	6,14	119	25	6,14	2o3	43

1) S 19 žica

2) S 61 žicom.

32. Podaci za užeta od alučela 1:6

1	2	3	4	5	6
Nazivni presjek mm^2	Dodatni teret $18o\sqrt{d}$ g/m	Dodatni teret reduciran g/m, mm^2	Ukupni teret reducirani g/m, mm^2	σ_{max} = 1o kg/mm^2	
				Kritični raspon m	Kritična temperatura °C
16/2,5	418	23,5	27,o	32	56
25/4	467	16,8	2o,3	41	52
35/6	512	12,8	16,3	52	5o
5o/8	558	9,9	13,4	64	47
7o/12	613	7,9	11,4	75	44
95/15	662	6,3o	9,85	9o	4o
12o/21	716	4,99	8,55	1o5	37
15o/25	748	4,29	7,85	118	34
185/32	788	3,65	7,2	13o	31
24o/4o	838	3,o3	6,58	145	28
21o/36	815	3,33	6,88	137	29
3oo/5o	887	2,58	6,13	161	26

33. Podaci za užeta od alučela 1 : 4

1	2	3	4	5	6
Nazivni presjek mm^2	Dodatni teret $18o\sqrt{d}$ g/m,	Dodatni teret reduciran g/m mm^2	Ukupni teret reduciran g/m, mm^2	σ_{max} = 11,5 kg/mm^2	
				Kritičan raspon m	Kritična temperatura °C
125/29	722	4,7o	8,5o	12o	39
17o/4o	783	3,7o	7,5o	141	34
21o/5o	825	3,15	6,95	157	3o

34. Podaci za užeta od alučela 1 : 3

1	2	3	4	5	6
Nazivni presjek mm^2	Dodatni teret $18o\sqrt{d}$ g/m,	Dodatni teret reduciran $g/m\ mm^2$	Ukupni teret reduciran g/m mm^2	σ_{max}=12 kg/mm^2	
				Kritični napon m	Kritična temperatura °C
3lo/loo	927	2,27	6,35	193	23
34o/11o	961	2,12	6,2o	2ol	22

35. Tok proračuna. U prvom redu treba ustanoviti, je li stvarni raspon veći ili manji od kritičnoga, jer je time određeno početno stanje. Podaci za početno stanje uvrste se u jednadžbu stanja, i to ako je stvarni raspon manji od kritičnoga:

$$\vartheta_1 = -20°C, \quad \sigma_1 = \sigma_{max}, \quad g_1 = g_o;$$

a ako je stvarni raspon veći od kritičnoga:

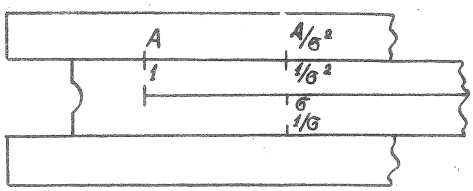
$$\vartheta_1 = -5°C, \quad \sigma_1 = \sigma_{max}, \quad g_1 = g_z.$$

Za drugo stanje uvrstiti $g_2 = g_o$, a za ϑ_2 zadana temperatura, pa se izračuna σ_2. Time je određeno naprezanje, a provjes se zatim može izračunati pomoću formule u tački 27.

Izračunavanje σ_2 je otežano, jer je jednadžba stanja obzirom na σ_2 kubna. Ako se svede na oblik

$$A/\sigma^2 = \sigma + B,$$

može se lako riješiti pomoću logaritamskog računala. Početak jezika postavi se ispod veličine A na gornjoj skali računala (slika 22);



Sl. 22. Rješavanje jednadžbe stanja

tada naprezanju σ na recipročnoj skali odgovara iznos A/σ^2 na gornjoj skali. Pokušavanjem se može lako naći σ koji udovoljava jednadžbu.

Često se proračun vrši tako, da se u jednadžbu stanja uvrste razne vrijednosti za σ_2, te se izračunaju odgo-

varajući ϑ_2 (što je lako, jer je jednadžba obzirom na ϑ_2 linearna). Zatim se nacrta dijagram za ϑ_2 u ovisnosti od σ_2, iz kojeg se mogu očitati vrijednosti σ_2 za željeni ϑ_2. Provjes se zatim računa kao i prije.

Ako nas interesira samo maksimalni provjes, onda pomoću kritične temperature ustanovimo, da li je provjes maksimalan kod -5^oC uz dodatni teret ili kod $+40^oC$. U prvom slučaju možemo provjes odmah izračunati, ako u formulu za provjes uvrstimo vrijednosti g_z i σ_{max}. U drugom slučaju moramo prije svega odrediti σ pomoću jednadžba stanja, kao što je gore opisano.

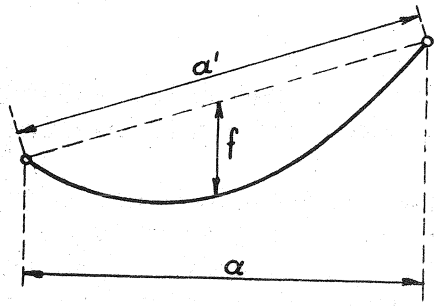
36. Mehanički stepen siguranosti definiran je višekratnikom nazivnog dodatnog tereta, kod kojega naprezanje u vodiču dosegne vrijednost trajne čvrstoće. Pri tome treba uzeti u račun naprezanje u točki, gdje je vodič ovješen na stup. To se naprezanje može izračunati po formuli

$$s = \sigma + f.g.$$

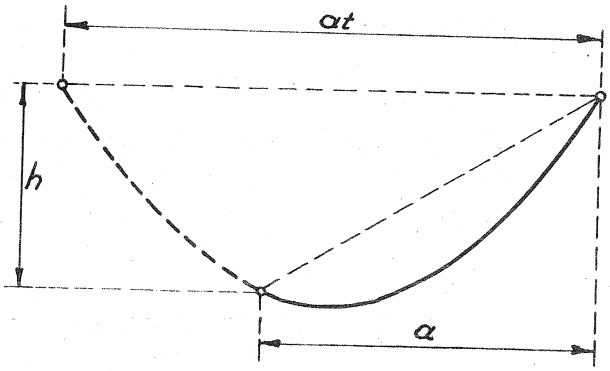
Mehanički stepen sigurnosti mora iznositi najmanje 2. Za kontrolu se obično izračuna granični raspon, t.j. onaj raspon kod kojeg je stepen sigurnosti upravo jednak 2, pa stvarni raspon ne smije biti veći od graničnoga.

37. Kosi raspon. Provjes u kosom rasponu (slika 23) može se izračunati prema formuli

$$f = \frac{a \cdot a' \cdot g}{8\sigma} .$$



Sl. 23 Kosi raspon



Sl. 24. Kosi i totalni raspon.

Kod kontrole mehaničkog stepena sigurnosti u kosom rasponu mora se kosi raspon dopuniti na t.zv. totalni raspon (slika 24) koji se određuje po formuli

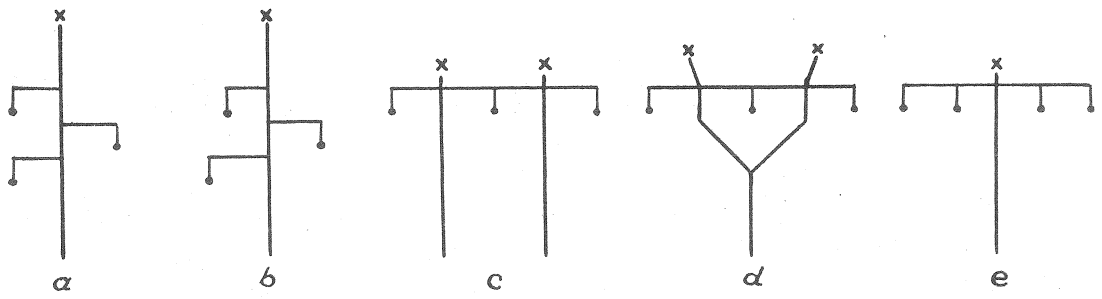
$$a_t = a + \frac{2h\,6}{ag}$$

Stepen sigurnosti je veći od 2, ako je totalni raspon manji od graničnoga.

38. Grafičke metode proračuna provjesa i naprezanje razvile su se iz težnje da se za praksu tok proračuna što je moguće više ubrza i pojednostavi. Od mnogih metoda jedna od najprikladnijih je metoda pomoću tzv. PN-krivulje, koja daje odnose relativnih veličina za provjes i naprezanje, te ista krivulja vrijedi za sve slučajeve proračuna.

RASPORED VODIČA NA STUPU

39. Raspored vodiča može biti različit, te o njemu ovisi i oblik stupa. Kod trofaznih vodova najčešće se upotrebljavaju slijedeći rasporedi.

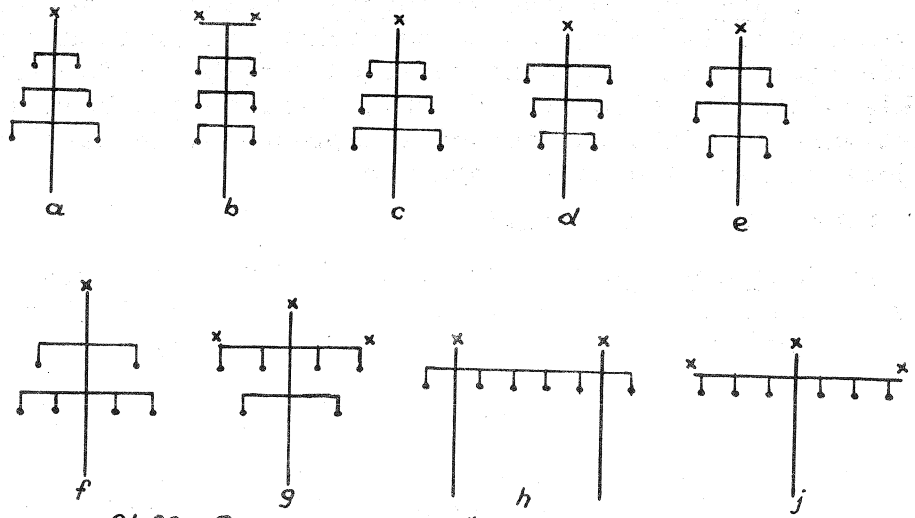


Sl. 25. Raspored vodiča kod jednostrukog voda.

Slika 25 prikazuje jednostruki vod s jednim ili dva dozemna užeta. Raspored (a) i (b) ima vodiče u trokutu, što ujednačuje induktivitet i kapacitet pojedinih faza. Ovi rasporedi zahtijevaju nadalje samo jedno dozemno uže, ali zato stupovi moraju biti viši. Upotrebljavaju se za čelične i betonske stupove, i za drvene kod nižih napona. Kod rasporeda (c), (d) i (e) su vodiči u istoj visini. Dobra zaštita zahtijeva dva dozemna užeta, ali su stupovi niži i vodiči bliže zemlji, što je povoljnije zbog upliva atmosferskih prenapona. Donji dio stupa može se izvesti različito. Najjednostavniji je portalni oblik (c), koji se redovito upotrebljava kod drvenih stupova, ali dolazi i kod

betonskih pa rjeđe i kod čeličnih stupova. Oblik Y (d) primjenjuje se za čelične stupove, ali je zbog nesimetričnog oblika nepovoljan.

Za dvojne vodove na istim stupovima prikazani su oblici rasporeda na slici 26. Najčešće se upotrebljava raspored vodiča u tri visine (a) do (c), i to redovno s jednim



Sl.26. Raspored vodiča kod dvojnog voda.

dozemnim užetom. Stupovi dakako zahtijevaju veliku visinu. Upotrebljavaju se za čelične i betonske stupove, a i za drvene stupove nižih napona,gdje dolazi u obzir raspored (c) pri čemu se stup redovno izvodi u obliku slova A. Raspored vodiča u dvije visine (f) i (g) zahtijeva niže stupove i duže konzole, ali i veći broj dozemnih užeta, obično tri. Upotrebljava se obično za čelične stupove. Raspored u jednoj visini (h) i (j) daje niske, ali široke stupove, te zahtijeva dva do tri dozemna užeta. Oblik (h) primjenjuje se za čelične i betonske stupove, ali je nepovoljan za težak teren.Oblik (j) upotrebljava se samo za čelične stupove.

Ako se za dvostruki vod želi imati veća pogonska sigurnost, grade se pojedini sistemi odvojeno, svaki na svojim stupovima, što je dakako skuplje. S druge strane mogu se izvesti komplicirane konstrukcije (redovito čelične) i za veći broj paralelnih vodova. Kod velikih raspona, na pr. prepona rijeke ili doline, gdje su potrebni veliki razmaci među vodičima uz relativno niske stupove, upotrebljava se često posebni stup za svaki vodič.

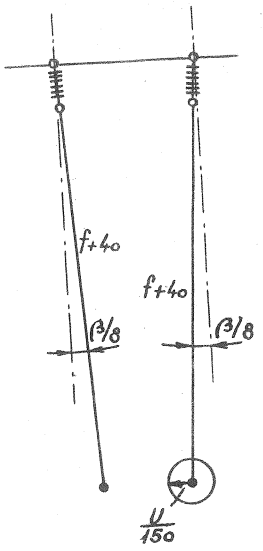
40. Međusobni razmak vodiča mora biti takav da se vjerojatnost međusobnog dodira ili prevelikog približenja svede na minimum. U tu svrhu provodi se kontrola njihanja vodiča, pri čemu se vodiči ne smiju međusobno približiti na udaljenost manju od sigurnosnog preskočnog razmaka, koji iznosi

$$\frac{U}{150}\ \text{m}$$ (U je linijski napon u kV).

Približavanje dvaju vodiča na istoj visini treba kontrolirati na slučaj otklona vodiča jednog prema drugome (slika 27) na mjestu najvećeg provjesa kod + 40°C. Za otklon se uzima 1/8 kuta (β), koji bismo dobili kod punog pritiska vjetra, i to prema formuli

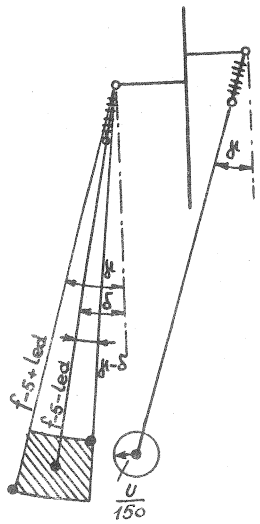
$$\operatorname{tg}\beta = \frac{0{,}67 \cdot V_0 \cdot d}{g}$$

Tu je V_0 - osnovno djelovanje vjetra na ravnu plohu u kg/m^2 (vidi točku 52), d - promjer vodiča u m, g - težina golog vodiča kg po m dužine. Ako su vodiči razmaknuti po visini barem za $\frac{U}{150}$ m, onda ova kontrola sama po sebi otpada.



Sl. 27. Kontrola približenja.

Općenito treba provesti i kontrolu njihanja, i to za slučaj da su vodiči zaleđeni i otklonjeni vjetrom jakosti 40% od pune vrijednosti, te da jednom od njih otpadne led, uslijed čega će se taj vodič njihati prije nego što se smiri na novom položaju. Njihanje će se zbivati i u horizontalnoj i u vertikalnoj ravnini, pa treba kontrolirati da ni za jedan položaj unutar područja njihanja ne dođe do prevelikog približenja (slika 28). Težina leda se računa sa $0{,}18\sqrt{d}$ kg/m (d = promjer vodiča u mm), pa se pomoću specifične težine 0,9 kg/m^3 može izračunati promjer zaleđenog vodiča, d_1. Kut otklona je



Sl. 28 Kontrola njihanja.

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{0{,}4 \cdot 0{,}67 \cdot V_o \cdot d_1}{g_o + 0{,}18\sqrt{d}}$$

a provjes se uzima za temperaturu $-5^{\circ}C$, Kut otklona nezaleđenog vodiča se izračuna iz izraza

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{0{,}4 \cdot 0{,}67 \cdot V_o \cdot d}{g_o} ;$$

tome odgovara provjes kod $-5^{\circ}C$ ali za nezaleđeni vodič.

Kod vodova s naponom ispod 11o kV, ako se radi o rasponima manjim od 15o m, smatra se da je razmak vodiča dovoljan (i ne treba ga kontrolirati na približenje odnosno njihanje) ako je veći od

$$\sqrt{f} + \frac{U}{15o} \quad m$$

za vodiče od aluminija i njegovih legura, odnosno

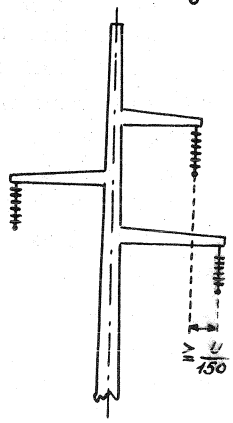
$$0{,}75\sqrt{f} + \frac{U}{15o}$$

za ostale vodiče. Tu je f - provjes vodiča kod + $4o^{\circ}C$, a U - linijski napon u kV.

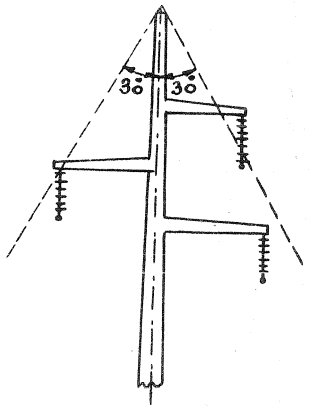
Kod velikih raspona iznad dolina obično trebamo veće razmake vodiča nego u ostalim rasponima. Da ne gradimo posebne stupove s povećanim razmakom, često možemo poteškoću riješiti time, da pojedine vodiče različito zategnemo. Time dobijemo različite provjese i tako povećamo razmak vodiča u rasponu.

Nadalje treba kontrolirati da se vodiči zbog odskoka uslijed otpadanja leda međusobno previše ne približe. Smatra se, da je ovaj uslov ispunjen, ako horizontalni razmak vodiča barem je

$$\frac{U}{15o} \quad m \text{ (slika 29)}$$



Sl.29. Horizontalni razmak vodiča.



Sl.30. Zaštitno područje dozemnog užeta.

41. Položaj dozemnih užeta treba također kontrolirati analogno kao i međusobni razmak vodiča, kako ne bi uslijed njihanja dozemno uže došlo preblizu vodičima. Uslovi zaštite od atmosferskih prenapona zahtijevaju nadalje da vodiči budu unutar kuta zaštite, t.j. unutar područja omeđenog pravcima koji prolaze kroz dozemno uže, a otklonjeni su od vertikale za kut od 30^{o} (slika 30). Ovaj uslov treba kontrolirati ne samo na stupu nego i u rasponu za područje temperature između o i $40^{o}C$.

42. Razmak vodiča od stupa također ne smije biti manji $\frac{U}{150}$ m, ako se vodič uslijed otklona izolatorskog lanca približi stupu. Kut otklona se računa iz formule

$$tg\ \beta_i = \frac{V + Vi/2}{G + Gi/2}.$$

Tu je V - pritisak vjetra na vodiče do polovine raspona s jedne i druge strane, V_i - pritisak vjetra na izolatorski lanac, G - sila kojom vodič vuče lanac prema dolje, a G_i - težina izolatorskog lanca. Kod vertikalnog položaja izolatorskog lanca mora udaljenost vodiča do stupa iznositi najmanje

$$\frac{U}{150} + o,1\ m.$$

43. Visina vodiča nad tlom ne smije iz sigurnosnih razloga biti premalena, te mora iznositi najmanje 6 m, a kod vodova iznad 110 kV i više. Kod prelaza cesta povećava se visina na 7 m. Kod tla nepristupačnog za vozila smanjuje se na 5 m, a kod tla nepristupačnog ljudima smanjuje se na 4 m.

S T U P O V I

44. Materijal koji se upotrebljava za stupove dalekovoda je čelik, drvo i armirani beton.

45. Čelični stupovi se obično grade kao rešetkaste konstrukcije i to prvenstveno od kutnog profilnog čelika, ali se upotrebljavaju i druge vrste profilnog čelika, a isto tako i čelične cijevi. Konstrukcija se danas većinom svaruje, pri čemu se čitav stup izradi u komadima prikladnim za transport, koji se na terenu sastave vijcima. Za zaštitu od rđe treba stupove premazati bojom otpornom protiv vanjskih upliva. U novije vrijeme se stupovi ili njihov gornji dio pocinčavaju, čime se izbjegava potreba redovitog bojenja u pogonu. Čelični stupovi se najbolje mogu prilagoditi svim potre-

bama izgradnje, pa se u velikoj mjeri upotrebljavaju. U posljednje vrijeme grade se stupovi od čeličnih cijevi ispunjenih betonom, što smanjuje vitkost štapova i dovodi do znatne uštede na čeliku.

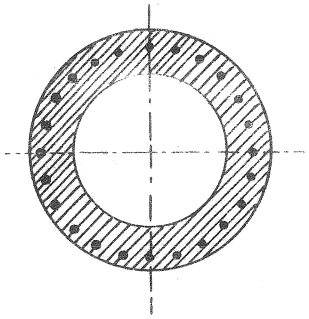
46. Drvo kao materijal za stupove upotrebljava se za vodove s naponom sve do 22o kV, ali mu je glavna upotreba ipak kod vodova manjeg napona. U prvom redu dolazi u obzir borovina koja ima pravilni oblik i dade se dobro impregnirati, ali se upotrebljavaju i ostale vrste crnogorice . Kesten se može upotrebiti i neimpregniran, ali mu nepravilnost oblika otežava upotrebu kod složenijih konstrukcija stupova. Za razliku od crnogorice i kestena, koji se upotrebljavaju kao obla građa, hrastovina dolazi kao tesana i rezana građa te se uzimlje obično samo spojne klinove i za temeljne pragove, no može se upotrebiti i za prečke.

Izolaciona moć drveta često se iskorišćuje kao dodatna izolacija, pa se zato na drvenim stupovima ne uzemljuju nosači izolatora, niti upotrebljavaju rogovi protiv luka. S druge strane da se postigne isti nivo izolacije, trebalo bi kod stupova s uzemljenim nosačima (kao što je to kod željeznih i betonskih stupova) uzeti jaču izolaciju, na pr. u lancu jedan članak više.

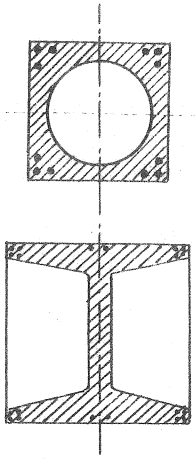
Impregnacija treba da zajamči trajnost drveta bar 15 do 2o godina. Za impregnaciju se upotrebljava kreozot ili razne otrovne soli.

47. Armirani beton se u posljednje vrijeme upotrebljava sve više za stupove, jer betonski stupovi trebaju znatno manje čelika od čeličnih rešetkastih stupova, a veoma su solidni i ne trebaju nikakovog uzdržavanja. Što se tiče izrade stupovi se mogu izrađivati u tvornicama ili radionicama i gotovi odnositi na teren, gdje se samo sastavljaju i podižu. Za sastavljanje se obično upotrebljavaju betonske manšete. No tu je opet poteškoća transporta, koji stavlja svoja ograničenja. Najpoznatiji te vrste su centrifugirani stupovi (slika 31) koji zbog šupljine relativno laki su, a beton im je naročito na površini gust i otporan. Međutim, izvode se i stupovi lijevani u kalupima, pri čemu se opet uzimaju t.zv. štedni presijeci (slika 32).

Drugi način izvedbe je da se samo pojedini manji elementi (na pr. pojedini štapovi ili pojedine etaže armiranobetonske rešetkaste konstrukcije) izrađuju fabrički, jer se time izbjegavaju poteškoće transporta. Ti se elementi na terenu sastavljaju i tako grade stupovi. Ovakvih je pokušaja



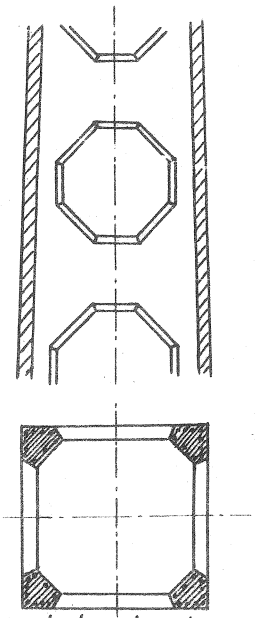
Sl.31. Presjek centrifugiranog stupa.



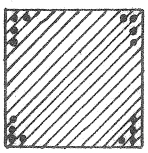
Sl.32. Štedni presjek betonskih stupova.

bilo i kod nas, ali se nisu udomaćili.

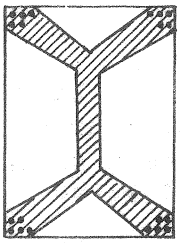
Nadalje se mogu stupovi u potpunosti izgraditi na terenu i to bilo da se izliju ležeći pa podignu, bilo da se izliju u vertikalnom položaju. Kod stupova koji se lijevaju ležeći mora se smanjenjem kubature betona smanjiti težina stupa na minimum, pa se grade stupovi koji su ne samo šuplji, nego i u stijenama imaju otvore (slika 33). Kod stupova za vodove višeg napona, koji su glomazni i teški, povoljnija je izgradnja u vertikalnom položaju, makar da u tu svrhu treba imati veći građevni inventar. Štedni presjek s rupom se pri tome ne može postići, pa se stupovi grade ili s punim presjekom (slika 34) ili s vanjskim šupljinama (slika 35).



Sl.33. Šuplji betonski stup s otvorima.



Sl.34. Puni presjek betonskog stupa

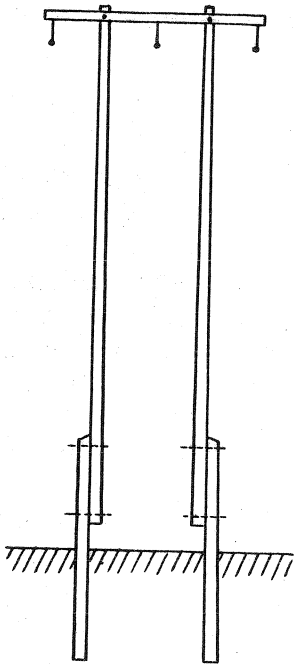


Sl.35 Presjek s vanjskim šupljinama.

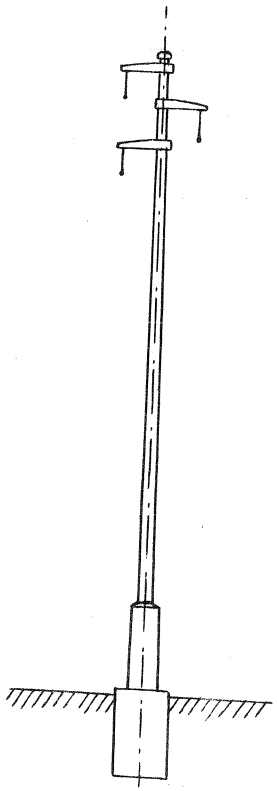
Puni presjek ima prednosti masivne i jednostavne izvedbe, pa ne treba primjenjivati posebne metode za poboljšanje kvalitete betona, ali treba mnogo betona. Štedni presjek zahtijeva pažljivu izvedbu i vibriranje betona, ali je kubatura betona mnogo manja.

48. U Jugoslaviji se u posljednje vrijeme uglavnom upotrebljavaju slijedeće izvedbe stupova.

Za 35 kV-ne vodove upotrebljavaju se drveni stupovi u obliku portala (slika 36) i centrifugirani betonski stupovi (slika 37).



Sl.36. Portalni stup za 35 KV



Sl. 37. Centrifugirani betonski stup za 35 KV. (Duga Resa - Karlovac)

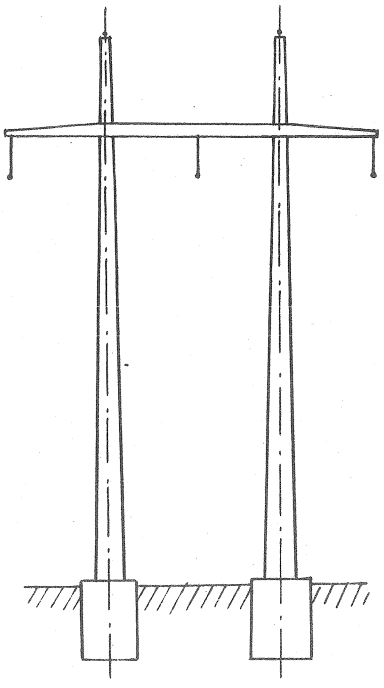
Za 110 kV-ne vodove se upotrebljavaju čelični, betonski i drveni stupovi. Betonski stupovi s punim presjekom izvedeni su kao portali (sl. 38) ili kao jednostavni stupovi (slika 39).

Drveni stupovi za 110 kV-ne vodove grade se u obliku portala i to s nogarima koji su redovito drveni, budući da su betonski nogari za ove stupove preglomazni. Da se dobije

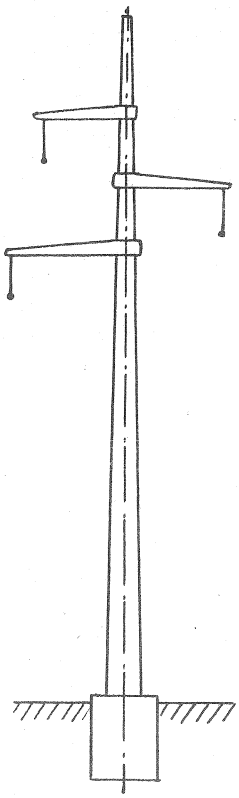
dovoljna čvrstoća izvode se noge od dvostrukih jarbola (slika 4o). Tipska konstrukcija stupa ima učvršćenje dijagonalama (slika 41), što daje potrebnu čvrstoću uz velku uštedu materijala.

49. Ukop. Drveni stupovi se mogu direktno ukopati u zemlju ili se ukopaju nogari na koje se stup nastavlja. Nogari pojačabaju ukop, a osim toga čuvaju gornji dio stupa od trulenja. Drveni nogari kad istrunu mogu se lakše zamijeniti nego čitavi stup. Zbog veće trajnosti upotrebljavaju se i betonski nogari. Kod zateznih stupova, i u posebnim slučajevima, dolazi u obzir i pričvršćenje stupa na betonske temelje, ali se stupovi ne smiju direktno ubetonirati u temelj.

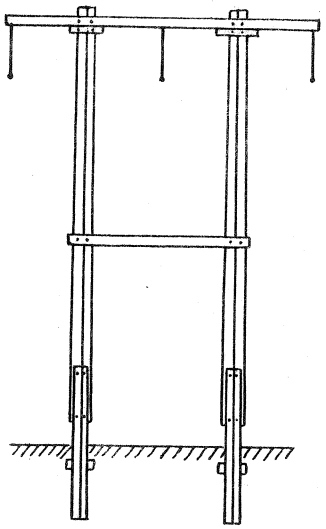
Ukop betonskih stupova se također može izvršiti direktnim ukapanjem u zemlju, što dolazi u obzir na pr. kod centrifugiranih nosnih stupova za niže napone. Ipak se redovno najprije izradi posebni temeljni bok s rupom, u koju se kasnije ubetonira stup (slika 42). Temeljni blok izvodi se redovito od nearmiranog betona, i to s 2oo kg portland cementa na m^3 betona.



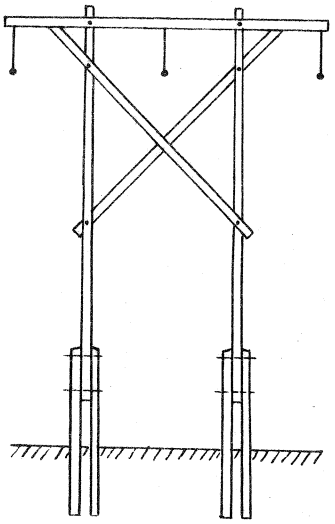
Sl.38. Portalni stup s punim presjekom za 110 KV. (vod Vinodol - Zagreb)



Sl.39. Jednostavni stup s punim presjekom za 110 KV. (vod Zenica - Doboj)



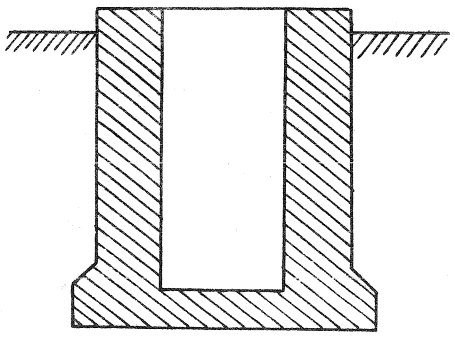
Sl. 40. Drveni portal za 110 KV (vod Rajhenburg-Zagreb).



Sl. 41. Drveni nosni stup za 110 KV (vod Velenje-Ljubljana).

Ukop čeličnih stupova se redovno vrši također putem betonskih temeljnih blokova, kao i kod betonskih stupova. Ako je konstrukcija stupa pri zemlji jako raskrečena, izvodi se ukop preko nekoliko temeljnih blokova (obično četiri). Nosni stupovi mogu se i direktno ukopati u zemlji, pri čemu se ukop pojačava hrastovim pragovima.

5o. Vrste stupova. Po namjeni mogu stupovi biti nosni ili zatezni. Nosni stup ima zadatak da nosi vodiče na dovoljnoj visini iznad zemlje, a zatezni stup osim toga mora preuzeti sile zatezanja vodiča. Po položaju se stup može nalaziti u pravcu ili u lomu trase. Nosni stup u pravcu trase naziva se linijski stup, a nosni stup u lomu trase zovemo kutni stup. Zatezni stup na kraju voda zove se krajnji stup, ali se najmanje svaka 3 do 5 km mora i u trasu umetnuti zatezni stup, koji ima svrhu da rasterećuje vod kod montaže i u slučaju prekida vodiča; to je rasteretni stup. Od ovih osnovnih vrsta mogu se izvesti kombinirani stupovi, kao na primjer kutno-rasteretni stup i sl. Nadalje dolaze u upotrebi specijalni stupovi, na pr. prelazni stupovi za prelaz željezničke pruge, prepletni stup za ispreplitanje voda i t.d.



Sl. 42. Temeljni blok za betonski stup.

51. Opterećenje stupova, na temelju kojega se vrši proračun stupa na čvrstoću, definirano je propisima. Pri tome se

naprezanje s pojedinim dijelovima stupa mora kontrolirati za nekoliko slučajeva opterećenja, koji približno imitiraju stanja koja mogu nastati u prirodi. Ti su slučajevi opterećenja za pojedine vrste stupova slijedeći:

Linijski stup: (1) maksimalne vertikalne sile, (2) vertikalna sila uslijed nezaleđenih provodnika i vjetar na stup i vodiče u smjeru okomito na vod, (3) isto ali vjetar u smjeru voda, (4) maksimalne vertikalne sile i polovina jednostranog maksimalnog vlaka jednog vodiča.
Kutni stup:(1) maksimalne vertikalne sile i rezultante maksimalnog vlaka vodiča, (2) vertikalne sile uslijed nezaleđenjih vodiča, rezultante maksimalnog vlaka vodiča i vjetar na stup u smjeru rezultante, (3) isto, ali vjetar okomito na rezultantu, (4) isto kao za linijski stup.

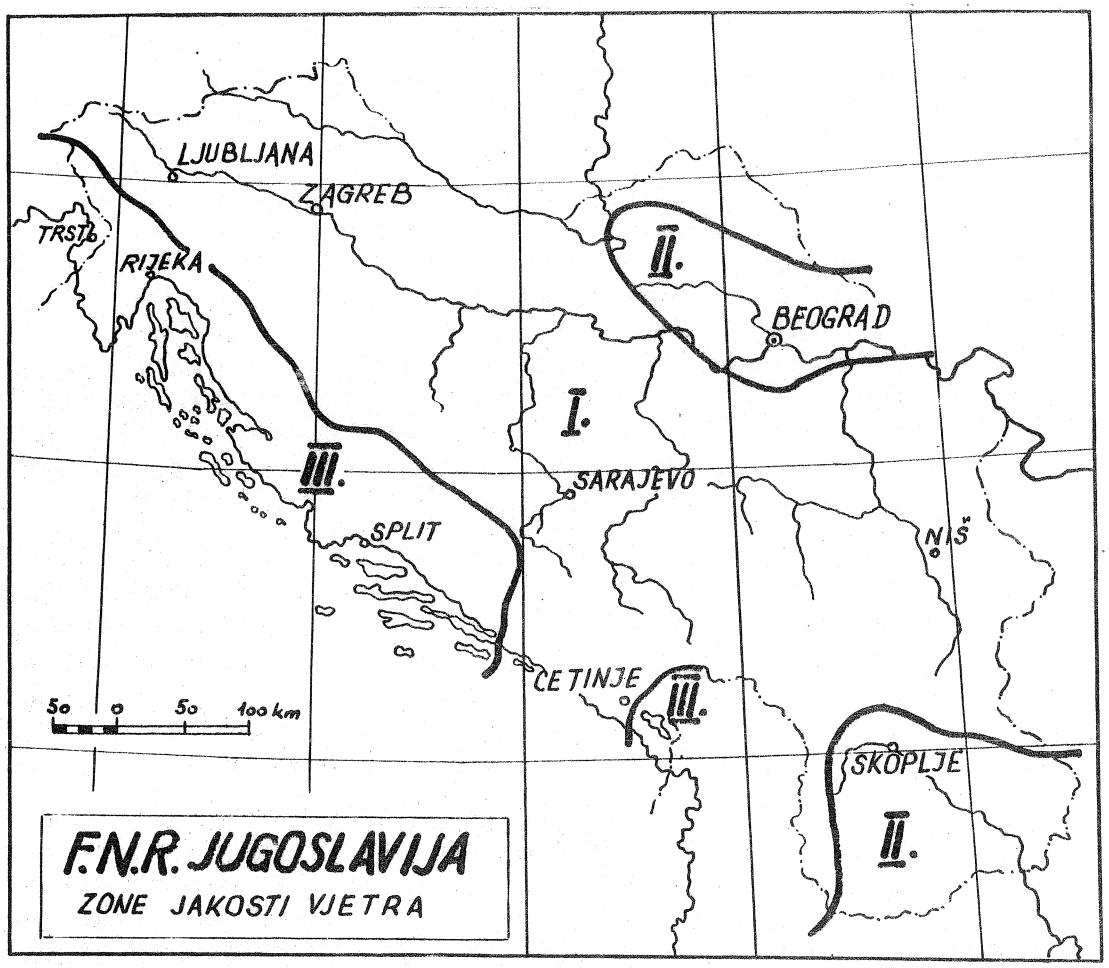
Rasteretni stup: (1), (2) i (3) isto kao za linijski stup, (4) 2/3 jednostranog maksimalnog vlaka svih užeta, (5) maksimalne vertikalne sile i puni jednostrani maksimalni vlak jednog vodiča. Krajnji stup: (1), (2) i (3) isto kao za linijski stup, (4) puni jednostrani maksimalni vlak svih užeta,(5) maksimalne vertikalne sile i puni jednostrani maksimalni vlak preostalih vodiča osim jednoga (prekinutoga).

Kombinirani stup mora udovoljiti uslovima za osnovne vrste od kojih je sastavljen. Prelazni stup za prelaz željezničke pruge mora u pravcu prelaznog polja biti dimenzioniran kao krajnji (u prelaznom polju se maksimalno radno naprezanje provodnika smanjuje na 5o%), a u pravcu susjednog polja kao rasteretni.

52. Pritisak vjetra za proračun opterećenja stupova određuje se prema osnovnom djelovanju vjetra na ravnu plohu (v_o). Za stupove do 3o m visine u I zoni v_o = 6o, u II zoni v_o = 9o i u III zoni v_o = 13o kg/m^2. Zone su prikazane na slici 43. Za objekte preko 3o do 5o m visine uzima se za I zonu v_o = 7o, za II zonu v_o = 1o5, i za III zonu v_o = 15o kg/m^2. Kod objekata cilindrične površine računa se pritisak vjetra sa 2/3 v_o , a kod žica i užeta računa se sa 1,2 v_o .

PROJEKTIRANJE I IZGRADNJA

53. Projekat dalekovoda u velikom opsegu obuhvaća terenske radove, koji se već mogu smatrati pripremnim radovima gradnje. To se u prvom redu odnosi na izbor trase i geometarske radove, ali i na druge, istodobno obuhvaćene poslove (krčenje, utvrđivanje odštete vlasnicima zemljišta i slično)



Sl. 43. Geografske zone jakosti vjetra

Pravilni izbor trase je veoma važan i njemu treba posvetiti veliku pažnju, jer je to temelj svih daljnjih radova na projektiranju i izgradnji voda. Geometarski radovi moraju biti savjesno izvedeni i pažljivo kontrolirani, jer naknadno ustanovljene pogreške dovode do velikih i suvišnih troškova.

54. Izbor trase u velikoj mjeri ovisi o konfiguraciji terena, o komunikacijama, o materijalu i načinu kako je vod izgrađen, te o mogućnostima i potrebama održavanja voda u pogonu. Najbolje rješenje pri izboru trase je stvar procjene, pa je za taj posao potrebno dugogodišnje iskustvo. Nastojanje, da se dužina voda što više skrati polaganjem trase u pravcu, treba svesti na racionalnu mjeru, jer će često trasa po lakšem terenu i bliže komunikacijama biti ekonomičnija od trase u pravcu zbog lakšeg transporta materijala i zbog jednostavnijeg uzdržavanja. Isto tako ne treba težiti za dugim potezima u pravcu zbog uštede kutnih stupova, jer ionako u trasu treba postaviti rasteretne stupove, koji mogu ujedno biti i kutni. Osim toga se za manje kuteve mogu upotrebiti

nosni kutni stupovi, koji ne će biti mnogo skuplji od linijskih. Pogotovu u teškom terenu ne treba pretjerano težiti za trasom u pravcu.

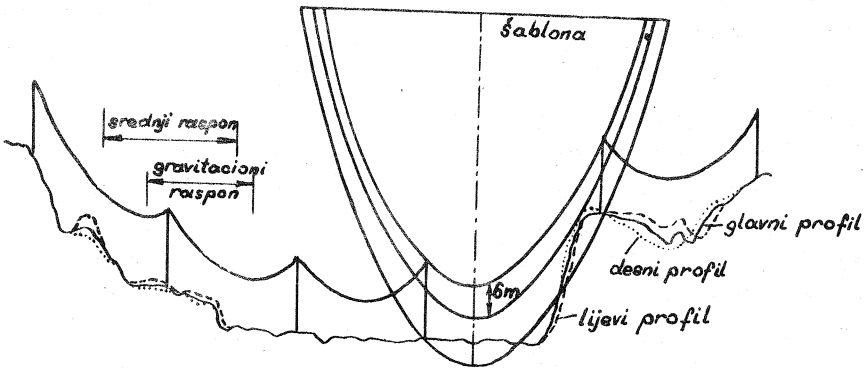
Kao prvo vrši se opći pregled trase na terenu(obično automobilom), pri čemu se treba služiti najboljim geografskim kartama, koje se mogu pribaviti. Tom zgodom se tačno pregledaju kritična područja, te prodiskutiraju svi problemi, kako bi se utvrdilo, da vod zaista može proći odabranom trasom. Po potrebi vrši se prethodno snimanje kritičnih dijelova trase.

55. Iskolčenje trase i snimanje profila Nakon što je usvojen tok trase, vrši se definitivno polaganje trase na teren. Pri tome se pomoću geodetskog instrumenta odrede, a zatim iskolče fiksne točke (kutevi, prelazi željezničke pruge i sl.). Iza toga se iskolči trasa između fiksnih tačaka, kako bi se kasnije mogla lako indentificirati na terenu. Kolčići se zabiju na mjestima gdje se lako mogu naći i gdje nije vjerojatno da će biti izvađeni (uz ceste i puteve, na granicama parcela i sl.).

Zatim se pristupa snimanju uzdužnog profila, pri čemu se istodobno izrađuje i skica situacije. Kod terena, koji imaju i okomito na trasu znatnu strminu, snimaju se osim glavnog profila u simetrali trase i bočni profili lijevo i desno od simetrale trase, redovito na udaljenosti jednakoj udaljenosti vanjskog vodiča od simetrale stupa. Profil se iscrtava u karikiranom mjerilu, jer je za visine potrebna veća tačnost nego za dužine. Kod nas je uobičajeno mjerilo 1:2ooo za dužine i 1 : 5oo za visine. Za važnije raspone (na pr.prelaz željezničke pruge) crta se profil obično u većem mjerilu.

56. Određivanje položaja stupova vrši se na uzdužnom profilu pomoću celuloidne šablone za krivulju maksimalnog provjesa. Krivulja se obično izradi kao parabola i to na temelju provjesa za prosječni raspon. Redovito se na šabloni iscrtaju 3 paralelne krivulje: jedna koja prikazuje položaj vodiča, druga na udaljenosti od 6 m koja služi za kontrolu visine vodiča nad zemljom i treća na udaljenosti normalne visine stupa koja olakšava određivanje položaja stupova (slika 44).

Prilikom razmještaja stupova treba paziti:(1) dà vodič svugdje ima dovoljnu visinu nad zemljom, (2) da stupovi nemaju visinu mnogo različitu od normalne, (3) da rasponi budu podjednaki i (4) da se strmine raspona smanje na najmanju mjeru. Profil s ucrtanim krivuljama provjesa daje nam: (1)



Sl. 44. Uzdužni profil s krivuljama provjesa.

položaj stupova, (2) visinu stupova, (3) stvarni raspon od stupa do stupa (4) srednji raspon, t.j. polovinu sume susjednih raspona, (5) gravitacioni raspon, t.j. udaljenost najnižih točaka vodiča. Srednji raspon pomnožen s pritiskom vjetra po metru dužine daje silu, koju stup trpi zbog djelovanja vjetra na vodič. Gravitacioni raspon pomnožen težinom po dužnom metru daje vertikalnu silu, koju stup trpi zbog težine vodiča i dodatnog tereta.

Na temelju ovih podataka možemo konstruirati stupove (ili odabrati stupove iz postojećih tipova), te odabrati izolatore s priborom i ostalu opremu. To pak čini podlogu za sastav materijala, predmjer i predračun radova i razradu ostalih dijelova projekta.

57. Izgradnja voda mora biti savjesno pripremljena, da se sve faze rada odvijaju bez smetnja. U tu svrhu treba temeljito razraditi vremenski plan rada i pravovremeno riješiti sva pitanja, kao što su: preuzimanje materijala, izbor i nabavku alata i inventara, osiguranje voznog parka, organizacija građevnog vodstva, uređenje građevnih uprava na terenu, organizacija stanovanja i ishrane za radnu snagu, osiguranje skladišta za inventar i materijal, osiguranje pravilnog priliva radne snage, itd. Za vrijeme gradnje treba usklađivati sva ova pitanja prema napretku radova, koje radi pravovremene i efikasne intervencije treba redovito pratiti putem izvještaja i grafikona.

Pripremni radovi vrše se djelomično već za vrijeme projektiranja. Prije same gradnje treba na trasi izvršiti

detaljno iskolčenje, definitivno iskrčenje trase, te popravak i eventualnu izradu pristupnih puteva.

Iskop jama za stupove se normalno vrši ručno, jer bi transport mehanizacije redovito bio preskup. Ipak se za postavljanje drvenih stupova u lakom terenu s uspjehom upotrebljavaju motorizirana svrdla. U kamenitom terenu se upotrebljava miniranje. Za podvodni teren je potrebno imati pumpe za ispumpavanje vode. Nakon postavljenja stupa zemlju treba dobro nabiti u slojevima debljine oko 30 cm. Kod izrade betonskih temelja redovito sama jama služi kao oplata, a mješanje betona se vrši ručno ili malim priručnim mješalicama.

58. Stupovi. Drveni se stupovi izrađuju u privremenim radionicama na terenu, te se potpuno izrađeni i spremni za sastavljanje dopremaju na mjesto podizanja. Tu se sastave tik iskopanih jama i podižu pomoću ručnog ili motornog vitla preko pomoćnog stupa, a sam stup se pridržava pomoću usidrenih užeta. Nakon podizanja stup se uravnava pomoću užeta i ručnih dizalica, a kontrola uravnanja vrši se teodolitom i viskom.

Betonski stupovi, koji se izrađuju tvornički, podižu se na isti način, ili se uhvate u težištu i podignu, te zatim usade u iskop odnosno temelj. Isto tako se podižu stupovi izrađeni na mjestu podizanja u horizontalnom položaju.Kod stupova, koji se izrađuju u vertikalnom položaju, iznad izrađenog temelja podigne se skela i postavi kalup s armaturom, a zatim se lijeva beton.

Čelični stupovi se izrađuju u radionicama ili tvornicama, te se u dijelovima dopremaju na mjesto podizanja. Osim opisanog načina uspravljanja odnosno podizanja cijelog stupa može se postavljanje stupa izvršiti po etažama ili sastavljanjem pojedinih štapova.

59. Montaža opreme započinje vješanjem izolatorskih lanaca, što se može izvršiti prije podizanja stupa ili prilikom podizanja vodiča na stup. Potporni izolatori se redovno montiraju prije podizanja stupa. Vodiči se dopreme na teren namotani na drvenim bubnjevima, te se razvlače pomoću životinjske sprege ili motornog vozila odnosno pomoću vitla s pomoćnim užetom. Pri tome se bubanj postavlja na posebne nogare i koči, da vodiči budu napeti i da se ne vuku po zemlji, vodiči se vode preko posebnih kotura, obješenih na stupove.

Nakon što su vodiči razvučeni i podignuti na stupove, vrši se zatezanje da se dobije naprezanje vodiča odnosno provjesi koji odgovaraju temperaturi prilikom montaže.

Temperatura se mjeri posebnim termometrom koji se smjesti na sam vodič. Naprezanje se mjeri dinamometrom, a provjes pomoću letvica na stupu ili pomoću teodolita. Kad su vodiči ispravno zategnuti i zatezne stezaljke montirane, pristupa se pričvršćenju na nosnim stupovima; pri tome izolatorski lanci moraju visjeti okomito.

6o. Završni radovi sastoje se u izradi uzemljenja, bojadisanju čeličnih stupova, dotjerivanju vijaka kod drvenih stupova, postavljanju pločica za upozorenje, numeriranju stupova, označivanju faza i sl. Prije stavljanja u pogon izvrši se najprije pregled voda, a zatim mjerenje izolacije induktorom da se utvrde eventualne grube griješke. Nakon toga se vod stavi postepeno pod napon koji se pomalo podiže, i zatim se vod pomalo opterećuje strujom. Ako je sve u redu, može se vod predati pogonu. Prije stavljanja u pogon dobro je mjerenjem utvrditi električne konstante voda.

P R O P I S I

61. Uslovi dimenzioniranja nadzemnih vodova obzirom na sigurnost ljudi, sigurnost pogona i ekonomičnost ne daju se sami po sebi, pa su sve tehnički razvijene zemlje obuhvatile potrebne uslove i odredbe u okviru obaveznih propisa. Kod nas prije rata nisu postojali naši vlastiti propisi, pa su se primjenjivali inostrani. Poslije rata izdani su kod nas neki propisi za nadzemne vodove, i to:

(1) Privremeni propisi za projektiranje i za izgradnju dalekovoda od 11o kV (prilog časopisu Elektroprivreda br. 6. od 1949. godine);

(2) Privremeni propisi za projektiranje i izgradnju dalekovoda s naponom ispod 11o kV (prilog časopisu Elektroprivreda br. 7 od 1949. godine);

(3) Privremeni tehnički propisi za armirano-betonske stupove za dalekovode (časopis Elektroprivrede broj 11 od 1949. godine);

(4) Tehnički propisi za fundiranje stupova električnih vodova (časopis Elektroprivreda br 1 od 195o. godine);

(5) Tehnički propisi za građenje električnih vodova na mjestima ukrštanje na željezničkim prugama (prilog br. 1o Službenom listu FNRJ broj 68 od 13. decembra 195o. godine);

(6) Zaštita vodova elektroveza od električnih vodova (publikacija Glavne direkcije PTT, Beograd 1952).

U pripremi se nalaze naši novi propisi za nadzemne vodove.

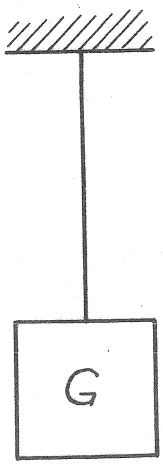
II MEHANIČKI STEPEN SIGURNOSTI VODIČA

1. Uvod

Kod svih tehničkih konstrukcija izvodi se proračun obzirom na mehaničku čvrstoću. Kao podloga za ovaj proračun uzima se nazivno opterećenje konstrukcija s jedne strane, i dozvoljeno naprezanje u pojedinim dijelovima konstrukcije s druge strane. Konstrukcija se dimenzionira tako, da kod nazivnog opterećenja naprezanje u pojedinim dijelovima konstrukcije ne bude veće od dozvoljenoga. Dozvoljeno naprezanje pak uzimamo znatno niže od prekidne čvrstoće materijala. Time dobijemo izvjesnu sigurnost u konstrukciji jer se opterećenje mora znatno povećati iznad nazivnoga, da dođe do loma konstrukcije. Višekratnik nazivnog opterećenja, kod kojeg naprezanje u konstrukciji dosiže vrijednost prekidne čvrstoće materijala, zovemo mehaničkim stepenom sigurnosti.

2. Mehanički stepen sigurnosti kod jednostavnih konstrukcija

Kao primjer jednostavne konstrukcije uzmimo slučaj, da na kraćem užetu visi uteg G (slika 1). Težina samog užeta bit će u usporedbi s težinom utega neznatna, pa je možemo zanemariti. Naprezanje u užetu σ bit će veće što je veća težina utega te će između njih postojati linearna proporcionalnost. Radi što boljeg iskorištenja dimenzionirat ćemo uže tako, da kod nazivnog tereta G naprezanje u užetu postigne vrijednost dozvoljenog naprezanja σ_d. Ako pak želimo, da se naprezanje u užetu poveća na vrijednost prekidne čvrstoće užeta σ_p, morat ćemo uteg povećati na neku vrijednost G_p. Zbog proporcionalnosti vrijedi



$$\frac{G_p}{G} = \frac{\sigma_p}{\sigma_d} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

Lijevi izraz u jednadžbi (1) nazvali smo mehaničkim stepenom sigurnosti. Iz iste jednadžbe (1) vidimo da je me-

hanički stepen sigurnosti brojčano jednak omjeru prekidne čvrstoće i dozvoljenog naprezanja. Ova se izvedba definicija često upotrebljava kod tehničkih konstrukcija, jer je jednostavnija. Ali ne smijemo zaboraviti, da ona vrijedi samo kod jednostavnih konstrukcija, kad postoji proporcionalnost između opterećenja i naprezanja.

3. Specifične prilike kod vodiča nadzemnih vodova

Kod vodiča nadzemnih vodova ne postoji linearna proporcionalnost između opterećenja i naprezanja. Razlike prema prije uzetom slučaju jednostavne konstrukcije su slijedeće:

a) vlastita težina se ne može zanemariti.

Vodiči nadzemnih vodova napeti su između stupova, te u mehaničkom pogledu nemaju ulogu, da nose neki teret, nego u prvom redu sami sebe. Doduše, osim vlastite težine onimoraju nositi i dodatni teret snijega i leda, ali je dodatni teret redovito manji od težine samog vodiča. Zato težinu vodiča ne smijemo nipošto zanemariti. Zbog toga se već gubi proporcionalnost između dodatnog tereta (koji se jedini može povećati, jer težina vodiča ostaje nepromijenjena) i ukupnog opterećenja vodiča.

b) Naprezanje u vodiču nije proporcionalno ukupnom opterećenju vodiča.

Vodič, napet između dva stupa, poprimi oblik lančanice i za njega ne vrijedi zakon proporcionalnosti niti između ukupnog opterećenja vodiča i naprezanja u vodiču. To se vidi iz slijedećega.

Ako ne uzmemo u račun promjenu temperature, bit će odnos između naprezanja σ i ukupnog opterećenja vodiča dan pojednostavnjenom jednadžbom stanja:

$$\frac{a^2}{24}\left[\left(\frac{g_1}{\sigma_1}\right)^2-\left(\frac{g_2}{\sigma_2}\right)^2\right]=\frac{\sigma_1-\sigma_2}{E} \quad \ldots(2)$$

Tu je: a = raspon,
g = ukupno opterećenje po dužnom metru vodiča reducirano na 1 mm^2 stvarnog presjeka vodiča,
E = modul elastičnosti vodiča,

a indeksi 1 i 2 označuju pojedina stanja vodiča.

Kad bi postojala proporcionalnost između g i σ za razna stanja vodiča, t.j. za razne vrijednosti g odnosno σ,

bila bi lijeva strana jednadžbe (2) uvijek jednaka nuli. Ali kod promjene σ ne može biti desna strana jednaka nuli, i zato se ova pretpostavka ne može održati. Ako je σ_2 veći od σ_1 mora i $\frac{g_2}{\sigma_2}$ biti veća od $\frac{g_1}{\sigma_1}$, ukoliko želimo da jednadžba (2) ostane na snazi. To znači, da se g mora u znatnijoj mjeri promijeniti nego što se mijenja σ. Proporcionalnost, dakle, ne postoji.

Vidimo, da za mehanički stepen sigurnosti ovdje ne možemo primjeniti izvedenu definiciju prema točki 2, nego samo osnovnu definiciju danu u točki 1.

c) treba uzeti u račun razliku između naprezanja u ovjesištu i horizontalnog naprezanja.

Kod vodiča nadzemnih vodova možemo imati velike raspone i razmjerno velike provjese. Naprezanje duž vodiča nije konstantno, nego je najmanje u najnižoj točki vodiča, gdje je jednako horizontalnoj komponenti naprezanja σ. Ova komponenta naprezanja ulazi u račun u jednadžbi stanja (2).

U svakoj drugoj točki je naprezanje u vodiču veće od horizontalnog naprezanja, te je najveća u ovjesištu vodiča. Tu naprezanje dostigne vrijednost

$$\sigma_s = \sigma + f.g, \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

gdje je: f = provjes vodiča.

Obzirom na mehanički stepen sigurnosti moramo dakako uzeti u račun najveće naprezanje u vodiču, dakle naprezanje u ovjesištu σ_s.

4. Definicija mehaničkog stepena sigurnosti kod vodiča nadzemnih vodova.

Sada možemo dati definiciju mehaničkog stepena sigurnosti kod vodiča nadzemnih vodova i pri tome moramo uzeti u obzir momente navedene u točki 3. Osim toga se kod nadzemnih vodova uobičajilo, da se mehanički stepen sigurnosti daje obzirom na trajnu čvrstoću σ_t, a ne obzirom na prekidnu čvrstoću. Prema tome ovdje je mehanički stepen sigurnosti jednak višekratniku nazivnog dodatnog tereta, kod kojeg naprezanja vodiča u ovjesištu dosegne vrijednost trajne čvrstoće.

Prema propisima za gradnju nadzemnih vodova mora

mehanički stepen sigurnosti vodiča biti jednak ili veći od 2. To znači, da kod dvostrukog nazivnog tereta naprezanje u ovjesištu ne smije prekoračiti vrijednost trajne čvrstoće.

5. Ovisnost mehaničkog stepena sigurnosti od veličine raspona

Da razmotrimo ovo pitanje, potražit ćemo pomoću jednadžbe stanja (2) odgovor na pitanje: koliko se puta mora povećati ukupni teret g, da se naprezanje σ poveća n puta? U tu ćemo svrhu u izraz (2) uvrstiti $\sigma_2 = n.\sigma_1$. Dobijemo:

$$\frac{a^2}{24}\left[\left(\frac{g_1}{\sigma_1}\right)^2-\left(\frac{g_2}{n\sigma_1}\right)^2\right]=\frac{\sigma_1-n\cdot\sigma_1}{E}$$

Ako ovo riješimo, dobit ćemo:

$$g_2^2=(ng_1)^2+\frac{n(n-1).24\sigma_1^3}{a^2E} \qquad .....(4)$$

Izraz (4) nam ponovno potvrđuje, da ne postoji proporcionalnost između g i σ, nego da se g brže mijenja od σ. Ali ne samo to! Vidimo, da u drugom članu s desne strane dolazi raspon a u nazivniku. To znači, da će kod manjih raspona ovaj član biti veći, pa će za istu promjenu u naprezanju trebati veća promjena u teretu. Drugim riječima, kod malih će raspona mehanički stepen sigurnosti biti veći, a kod velikih raspona manji, ukoliko ostalo ostane isto.

Rezultat u prvi čas iznenađuje, ali je potpuno logičan i jasan. Kod malih raspona, naime, imamo i relativno malene provjese (provjes je proporcionalan kvadratu raspona!), pa elastično produženje užeta uslijed povećanog naprezanja u znatnoj mjeri poveća provjes. A time se ujedno smanjuje naprezanje (naprezanje je obrnuto proporcionalno provjesu). Zato je kod malih raspona potrebna veća promjena ukupnog tereta, da se horizontalno naprezanje poveća za određeni iznos. Drugim riječima, mehanički stepen sigurnosti je veći kod malih raspona.

Ova se razlika u mehaničkom stepenu sigurnosti kod malih i velikih raspona još pojačava time, što će kod velikih raspona postojati velika razlika između naprezanja u ovjesištu i horizontalnog naprezanja.

Činjenicu, da je kod malih raspona mehanički stepen sigurnosti veći, iskorišćujemo, kad želimo imati veću sigurnost, na primjer kod prepona željeznica ili autostrada, ili kod križanja dojavnih vodova i sl. Ne mijenjajući ostale uslove možemo mehanički stepen sigurnosti povećati na potrebnu vrijednost samim time, što u dovoljnoj mjeri smanjimo raspon.

Iz izraza (4) možemo također vidjeti, kako različite vrijednosti za n, σ i E kod raznih materijala utječu na mehanički stepen sigurnosti, ali se time u okviru ovog razmatranja ne ćemo dalje baviti.

6. Kontrola mehaničkog stepena sigurnosti

Mehanički stepen sigurnosti mogli bismo kontrolirati za svaki raspon, ali bi to kod stvarnih vodova, koji imaju veliki broj raspona, bio dugotrajan i mučan posao. Tim prije, što mehanički stepen sigurnosti nije, kod složenih prilika za vodič u rasponu, tako lako izračunati. Ali srećom to nije ni potrebno.

Kao što smo vidjeli u točki 5, mehanički stepen sigurnosti je manji, što je raspon veći. Postoji dakle neki raspon, kod kojeg je mehanički stepen sigurnosti upravo jednak propisanoj vrijednosti, t.j. jednak 2. Taj raspon zovemo graničnim rasponom. Želimo li, da mehanički stepen sigurnosti našeg vodiča ne bude manji od 2, treba dakle samo kontrolirati da naš stvarni raspon ne bude veći od graničnoga. A granični raspon možemo proračunati za naš vod jedamput zauvijek.

7. Proračun graničnog raspona.

Zbog složenosti problema ne može se postaviti jednostavna eksplicitna formula za proračun graničnog raspona. Zato ćemo pribjeći pojednostavnjenjima, koja će nam omogućiti, da dobijemo srazmjerno jednostavne izraze. Ali moramo biti svjesni, da time uvodimo u račun pogreške.

Budući da će granični rasponi biti razmjerno veliki, to ćemo prvo učiniti pretpostavku, koja odgovara velikim rasponima, to jest, zanemarit ćemo elastičnost vodiča.

a) Prva pretpostavka: vodič uopće nije elastičan. tj. $\frac{1}{E} = 0$.
Uz ovu pretpostavku slijedi iz jednadžbe stanja (2):

$$\frac{a^2}{24}\left[\left(\frac{g_1}{\sigma_1}\right)^2 - \left(\frac{g_2}{\sigma_2}\right)^2\right] = 0.$$

Odatle slijedi dalje

$$\frac{\sigma_2}{g_2} = \frac{\sigma_1}{g_1} .$$

Budući da se radi o graničnom rasponu, koji će naravski biti veći od kritičnog raspona, to možemo postaviti:

$\sigma_1 = \sigma_{max}$ = maksimalno radno naprezanje.

Osim toga je:

$g_1 = g_z$ = reducirana težina zaleđenog vodiča,

$g_2 = g_{2z}$ = reducirana težina vodiča s dvostrukim ledom.

Ako ovo uvrstimo u gornji izraz, dobijemo:

$$\frac{\sigma_2}{g_{2z}} = \frac{\sigma_{max}}{g_z} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (5)$$

Naprezanje u ovjesištu kod dvostrukog leda dobijemo prema izrazu (3), u koji moramo uvrstiti:

$$\sigma = \sigma_2$$

$$f = \frac{a^2 g_2}{8 \sigma_2} = \frac{a^2 g_{2z}}{8 \sigma_2} ,$$

$$g = g_{2z} .$$

Prema izrazu (3) dobijemo dakle:

$$\sigma_s = \sigma_2 + \frac{a^2 g_{2z}}{8 \sigma_2} g_{2z} .$$

Kao uslove za granični raspon moramo uvrstiti:

$a = a_g$ = granični raspon,

$\sigma_s = \sigma_t$ = trajna čvrstoća

Tako dobijemo: $\sigma_t = \sigma_2 + \frac{a^2 g\, g_{2z}}{8\, \sigma_2} g_{2z}$,

$$\frac{\sigma_t}{g_{2z}} - \frac{\sigma_2}{g_{2z}} = \frac{a^2 g}{8} \cdot \frac{g_{2z}}{2} .$$

Ako ovdje upotrebimo izraz (5) i sredimo, dobit ćemo:

$$\left(\frac{\sigma_t}{g_{2z}} - \frac{\sigma_{max}}{g_z} \right) \frac{\sigma_{max}}{g_z} = \frac{a^2 g}{8}$$

$$a_g = \sqrt{8 \frac{\sigma_{max}}{g_z} \left(\frac{\sigma_t}{g_{2z}} - \frac{\sigma_{max}}{g_z} \right)} \quad \ldots\ldots \quad (6)$$

Kod izvoda ove formule zanemarili smo elastično produživanje vodiča uslijed povećanja naprezanja. Kako će se, međutim, vodič u stvari ipak nešto produžiti, dobit ćemo kod dvostrukog leda veći provjes, a većem provjesu odgovara manje naprezanje. Zato naprezanje u ovjesištu neće još postići vrijednost trajne čvrstoće, pa to znači, da izraz (6) daje nešto premalene vrijednosti. Razlika u provjesima (pa prema tome i u naprezanjima) bit će to manja, što se radi o većem rasponu, jer su kod velikih raspona provjesi relativno veliki, pa promjene dužine užeta relativno manje utječu. A velike granične raspone ćemo dobiti kod velikih presjeka vodiča, gdje je udio leda u ukupnom teretu relativno malen. Povećanje leda na dvostruko neće dakle kod velikih presjeka znatno povećati ukupni teret, pa će tek kod velikih raspona naprezanje u ovjesištu moći dostići vrijednost trajne čvrstoće. Formula (6) vrijedi dakle to bolje, što je presjek vodiča veći.

Ali čak šta više! Ona za male presjeke uopće ne daje realan rezultat. Kod malih presjeka će naime udio leda u ukupnom teretu biti toliko velik da ćemo dobiti

$$\frac{\sigma_t}{g_{2z}} < \frac{\sigma_{max}}{g_z} .$$

U ovom pak slučaju dobijemo pod korjenom u izrazu (6) negativni predznak i rezultat je imaginaran. Jasno je dalje i to, da će rezultat biti veoma netočan u području, gdje je

$$\frac{\sigma_t}{g_{2z}} \quad \text{približno jednako} \quad \frac{\sigma_{max}}{g_z} .$$

Kod malih presjeka dakle formula (6) zataji.

Zato ćemo sada pokušati, da dobijemo izraz za granični raspon uz pretpostavku, koja bolje odgovara malim rasponima. Ne ćemo više zanemariti elastičnost vodiča, jer elastično produženje jako dolazi do izražaja kod malih raspona s relativno malim provjesima, ali ćemo zato zanemariti razliku između naprezanja u ovjesištu i horizontalnog naprezanja.

b) Druga pretpostavka: naprezanje u ovjesištu jednako je horizontalnom naprezanju, t.j. $\sigma_s - \sigma = 0$

Opet možemo koristiti jednadžbu stanja (2), ako u nju uvrstimo:

$$a = a_g,$$
$$g_1 = g_z,$$
$$\sigma_1 = \sigma_{max},$$
$$g_2 = g_{2z},$$
$$\sigma_2 = \sigma_t.$$

Dobijemo dakle:

$$\frac{a_g^2}{24}\left[\left(\frac{g_z}{\sigma_{max}}\right)^2 - \left(\frac{g_{2z}}{\sigma_t}\right)^2\right] = \frac{\sigma_{max} - \sigma_t}{E},$$

Odavle možemo dobiti

$$a_g = \sqrt{\frac{24}{E} \cdot \frac{\sigma_t - \sigma_{max}}{\left(\frac{g_{2z}}{\sigma_t}\right)^2 - \left(\frac{g_z}{\sigma_{max}}\right)^2}} \quad \ldots\ldots\ldots (7)$$

Kod izvoda ove formule zanemarili smo razliku između naprezanja u ovjesištu i horizontalnog naprezanja. Kako će u stvari naprezanje u ovjesištu biti veće od horizontalnog to će graničnom rasponu izračunatom prema izrazu (7) odgovarati naprezanje u ovjesištu, koje je veće od trajne čvrstoće. Izraz (7) daje prema tome preveliki rezultat. Razlika u naprezanjima bit će međutim to manja, što se radi o manjem provjesu, dakle i o manjem rasponu. A male granične raspone dobit ćemo kod malih presjeka vodiča. Formula (7) vrijedit će dakle to bolje, što je presjek vodiča manji.

Ali i ovdje opet formula (7) ne vrijedi za velike presjeke, kod kojih je

$$\frac{\sigma_t}{g_{2z}} > \frac{\sigma_{max}}{g_z},$$

jer ćemo u tom slučaju opet dobiti pod korjenom negativan predznak.

Ako je pak $\frac{\sigma_t}{g_{2z}}$ približno jednak $\frac{\sigma_{max}}{g_z}$

rezultat će biti veoma netočan. Za veće presjeke, dakle, formula (7) ne odgovara.

8. Upotreba formula za granični raspon

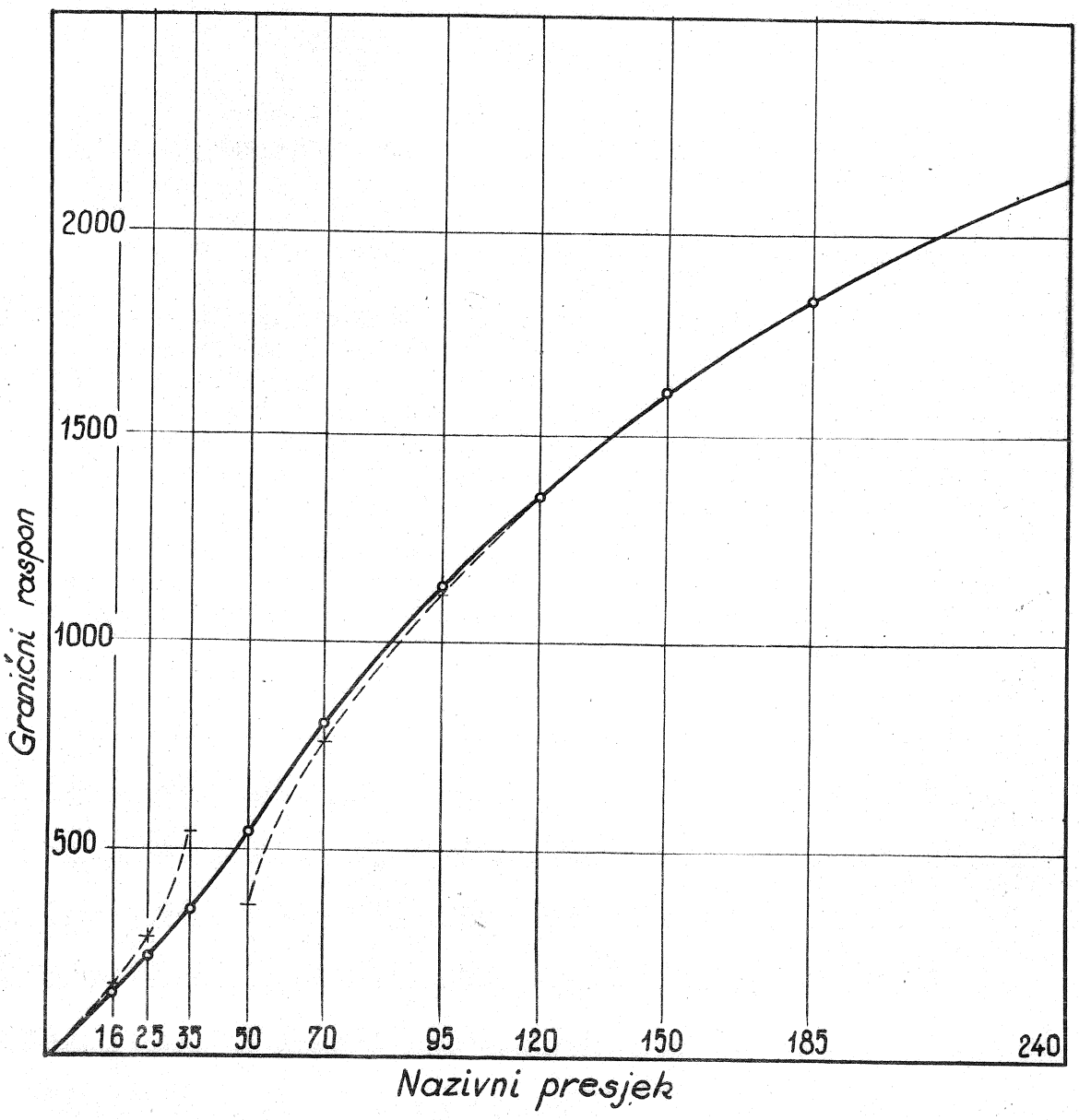
Da ne načinimo pogrešku upotrebom formula (6) i (7) u području gdje one daju netočne rezultate, najbolje je istodobno provesti proračun graničnog raspona za čitav niz presjeka uz iste uslove. Grafičkom interpolacijom mogu se tada dobiti vrijednosti graničnog raspona i za one presjeke, gdje formule ne daju ni približno točne rezultate. Najbolje je, da upotrebu formule pokažemo na primjeru.

Kao primjer uzet ćemo bakrene vodiče s maksimalnim radnim naprezanjem σ_{max} = 19 kg/mm^2 i s nazivnim ledom 18o $\sqrt{d}$ g/m (gdje je d = promjer vodiča u mm). Modul elastičnosti iznosi E = 13ooo kg/mm^2.

Podaci i proračun dani su u slijedećoj tabeli:

nazivni presjek mm^2	16	25	35	5o	7o	95	12o	15o	185	24o
stvarni presjek, mm^2	13,9	24,2	34	48	66	93	117	147	182	243
g_z, kg/m.mm^2 (1o^{-3})	34,8	27,9	23,7	2o,4	18,o	16,o	14,9	14,o	13,3	12,5
g_{2z}, kg/m.mm^2 (1o^{-3})	6o,4	44,6	38,2	31,6	26,85	22,85	2o,66	18,87	17,44	15,84
$\frac{\sigma_{max}}{g_z} = \frac{19}{g_z}$	546	681	8o2	932	1o55	1188	1275	1357	1429	152o
$\frac{\sigma_t}{g_{2z}} = \frac{3o}{g_{2z}}$	497	644	786	95o	1118	1313	1452	159o	172o	1893
a_g prema (6) m	–	–	–	366	763	1117	1344	1591	1822	213o
a_g prema (7) m	172	286	54o	–	–	–	–	–	–	–

Rezultati proračuna ucrtani su u dijagramu (slika 2) gdje su proračunate vrijednosti označene križićima i spojene crtkano. U dijagram je ucrtana interpolirana krivulja (punom crtom), iz koje se mogu očitati vrijednosti za granične raspone kod različitih presjeka (označene kružićem). Rezultat očitanja je u slijedećoj tabeli:

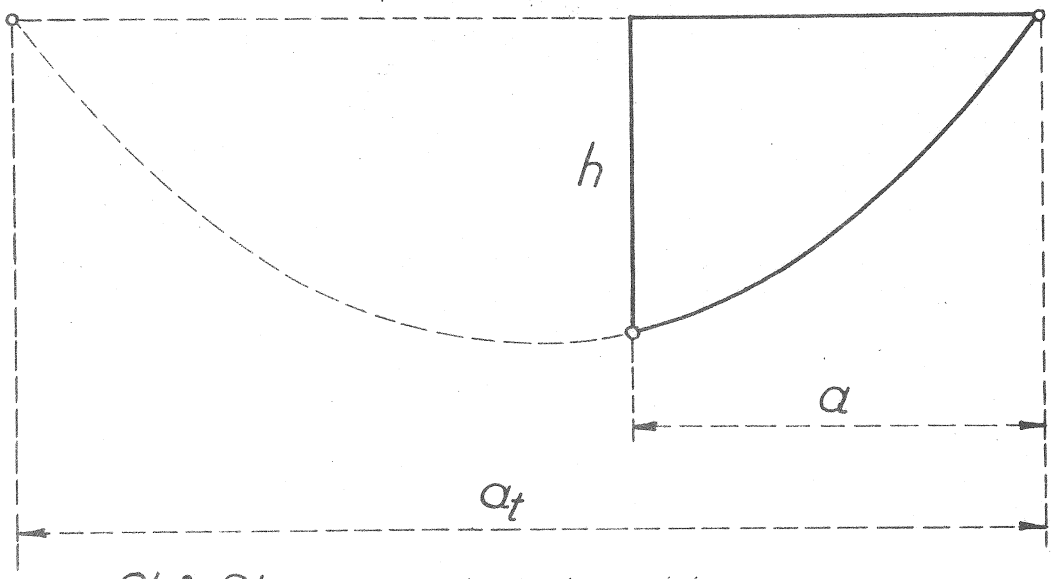


Sl. 2. Dijagram ovisnosti graničnog raspona o presjeku (primjer).

nazivni presjek, mm^2	16	25	35	5o	7o	95	12o	15o	185	24o
granični raspon, mm^2	16o	24o	35o	54o	8oo	113o	135o	16oo	182o	213o

9. Upotreba graničnog raspona kod strmih raspona

Granični raspon je proračunat uz pretpostavku ovjesišta na istoj visini. Ako međutim naš stvarni raspon nije horizontalan nego strm, jer mu ovjesišta nisu na istoj visini, onda ne možemo bez daljnjega upotrebiti kriterij graničnog raspona. Želimo li se kriterijem graničnog raspona i ovdje koristiti, moramo najprije strmi raspon dopuniti na totalni horizontalni raspon, koji uz oznake prema slici 3 možemo dovoljno točno izračunati pomoću



Sl. 3. Strmi raspon i totalni horizontalni raspon.

slijedećeg izraza:

$$a_t = a + \frac{2h \cdot \sigma_{max}}{a \; g_z} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (8)$$

Da mehanički stepen sigurnosti ne bude manji od 2, nije dovoljno, da stvarni raspon bude manji od graničnoga, nego totalni horizontalni raspon mora biti manji od graničnoga. Što je raspon strmiji, to će imati relativno veći totalni raspon, pa će prema tome i mahanički stepen sigurnosti kod strmi-

jeg raspona prije doći u pitanje.

Za praksu je najzgodnije, da se veličina graničnog raspona označi na krivulju provjesa, kojom se služimo kod određivanja smještaja stupova. Ako kod iscrtavanja oblika vodiča ne pređemo izvan označenih granica, bez obzira radi li se o horizontalnom ili o strmom rasponu, mehanički stepen sigurnosti bit će dovoljno velik.

III MEHANIČKI PRORAČUN VODIČA POMOĆU PN KRIVULJE

U v o d

Kod gradnje nadzemnih vodova moramo vodiče pričvrstiti na pojedine stupove. U svakom rasponu između stupa i stupa vodič se uslijed težine (vlastite i dodatne) provjesi, te zauzme oblik lančanice. Zbog toga dođe u vodiču do vlačnog naprezanja, koje ne smije prekoračiti dozvoljenu granicu. S druge strane vodič u sredini raspona niži nego kod ovjesišta na stupu, a iz sigurnosnih propisa opet ne smijemo dopustiti preveliko približenje vodiča zemlji. Zbog toga provjes (t.j. najveća vertikalna udaljenost između vodiča i spojnice ovjesišta) ne smije prekoračiti određenu, proračunom ustanovljenu vrijednost.

Gore postavljena ograničenja djeluju jedno protiv drugoga. Ako naime smanjimo provjes, poveća se naprezanje, pa eventualno može prekoračiti dozvoljenu vrijednost; i obrnuto: ako smanjimo naprezanje, poveća se provjes, pa može doći do opasnog približenja zemlji. Zbog toga je potrebno provesti točne proračune, da i naprezanje i provjesi ostanu u dozvoljenim granicama, te prema tome odrediti visine i razmake stupova. Ovaj se proračun još komplicira time, što treba računati s različitim dodatnim opterećenjima vodiča, koja nastaju u prvom redu zbog zaleđivanja.A svako će dodatno opterećenje, naravno, povećati i provjese i naprezanja. Osim toga se mora računati i s promjenom temperature, što dovodi do produžavanja i skraćivanja vodiča, pa prema tome posredno opet do promjene naprezanja i provjesa.

Uslovi, prema kojima treba izvršiti mehanički proračun vodiča, dani su u propisima za gradnju vodova. Kod nas vrijede "Privremeni propisi za projektiranje i izgradnju dalekovoda", propisani rješenjem Ministra elektroprivrede FNRJ. Ovi su propisi objavljeni kao prilozi časopisa "Elektroprivreda" u broju 6 i 7 od 1949 godine. Teorija mehaničkog proračuna vodiča utvrdila je međusobnu ovisnost pojedinih promjenljljivih veličina, koje pri tome dolaze u obzir, te je dala postupak za rješavanje raznih problema iz ovog područja. Kako su međutim odnosi među promjenljivicama dosta kompliciran, to se teorija služi pojednostavljenjima, koja se kod manjih raspona mogu dopustiti

ali koja kod većih raspona dovode do netočnih rezultata. Pa ipak, usprkos tih pojednostavljenja, postupak je još uvijek dosta kompliciran.

Zbog toga su mnogi autori tražili drugi način za dolaženje do rezultata. Da se pri tome uglavnom pošlo putem grafičkog računanja, to je samo po sebi razumljivo. Tako su nastali razni grafički postupci za mehanički proračun vodiča, kojima se uglavnom postiglo pojednostavljenje računanja. Ako, međutim, takav postupak ne samo pojednostavi proračun, nego pri tome još i svede upotrebljena zanemarenja na minimum, onda je pogotovo postigao svoju svrhu. Takav je postupak, koji je predložio F. Besser, te ga objavio u časopisu ETZ od 1938.godine (strana 751 i 774) i u posebnoj brošuri pod naslovom "Durchhange und Zugspannungen von Freileitungen, DZ-Kurve". Basser crta t.zv. PN-krivulju (krivulja provjes-naprezanje, njemački DZ-Kurve; krivulja Durchange-Zugspannungen), koja prikazuje reducirane i relativne veličine, pa prema tome jedamput nacrtana vrijedi za sve vrste, presjeke i materijale vodiča, za razna dodatna opterećenja, razne veličine raspona i druge razne prilike, u kojima se vodič nalazi. Basserov ćemo postupak u ovom članku objasniti, te ga donekle modificirati i dopuniti, kako bi bolje i potpunije odgovarao stvarnim potrebama.

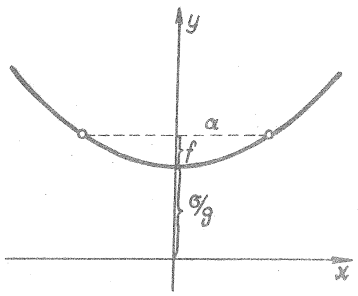
Izvod PN-krivulje

Kao što je poznato, vodič obješen između dva stupa zauzima oblik lančanice (vidi sliku 1), za koju teorija daje slijedeći izraz:

$$y = \frac{\sigma}{g} \quad \text{Cosh} \quad \frac{x}{\sigma/g}$$

Tu je: σ - vlačno naprezanje vodiča u najnižoj točki, u kp/mm^2

g - reducirano opterećenje vodiča, t.j. težina vodiča i dodatnog opterećenja (ako ga ima) po dužnom metru vodiča, reducirana na 1 mm^2 presjeka vodiča.



Sl. 1. Lančanica

Provjes je prema tome jednak:

$$f = \frac{\sigma}{g} (\text{Cosh} \frac{x}{\sigma/g} - 1).$$

Ako raspon označimo sa a, pri čemu je a = 2x , onda dobijemo:

$$f = \frac{\sigma}{g} (\text{Cosh} \frac{a}{2\,\sigma/g} - 1) \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

U izrazu (1) dolaze do izražaja različite vrijednosti za naprezanje, opterećenja i raspone. Da se dobije izraz, koji općenito vrijedi, uvodi Basser pojam reduciranog naprezanja, koje je jednako:

$$\sigma' = \frac{\sigma}{ag} .$$

Odavle slijedi:

$$\frac{\sigma}{g} = a\sigma' \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

Uvrstimo li ovo u izraz (1), dobijemo:

$$f = a\,\sigma' \left(\mathrm{Cosh}\ \frac{1}{2\sigma'} - 1\right).$$

Da eliminiramo još i upliv raspona, računat ćemo s relativnim provjesom, koji je jednak:

$$\varphi = \frac{f}{a} = \sigma' \left(\mathrm{Cosh}\ \frac{1}{2\sigma'} - 1\right) \ldots\ldots\ldots (3)$$

Izraz (3) daje nam, dakle, mogućnost, da prikažemo ovisnost relativnog provjesa φ o reduciranom naprezanju σ'. Sve ostale su promjenljive veličine iz ovog izraza eliminirane, pa tako na temelju ovog izraza možemo grafički prikazati međusobnu ovisnost provjesa i naprezanja jedamput zauvijek. U konkretnim slučajevima proračuna moramo dakako izračunati stvarni provjes iz izraza:

$$f = a\varphi \quad , \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

i stvarno naprezanje iz izraza:

$$\sigma = a\,g\,\sigma' \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (5)$$

Krivulja nacrtana prema izrazu (3), makar da bi vrijedila za sve slučajeve, ne bi ipak bila prikladna za rješavanje onih zadataka, kod kojih treba računati i s promjenom dužine lančanice, a koja promjena nastaje zbog elastičnog i toplinskog rastezanja. U tu će svrhu biti mnogo prikladnije da radimo s dužinom lančanice umjesto s provjesom.

Dužina lančanice za polovinu raspona iznosi prema teoriji mehaničkog proračuna vodiča:

$$\frac{1}{2}l = \frac{\sigma}{g} \mathrm{Sinh}\ \frac{x}{\sigma/g}$$

Za čitav raspon dobijemo dakle (uz a = 2x):

$$l = 2\,\sigma/g\ \mathrm{Sinh}\ \frac{a}{2\,\sigma/g}$$

Ako ovamo uvrstimo izraz (2), dobijemo:

$$l = 2\,a\,\sigma'\,\mathrm{Sinh}\ \frac{1}{2\sigma'}$$

Otpust vodiča, t.j. razlika između dužine vodiča i dužine raspona, iznosi dakle:

$$l - a = a\,(2\,\sigma'\,\mathrm{Sinh}\ \frac{1}{2\sigma'} - 1),$$

a relativni otpust, obzirom na dužinu raspona, iznosi:

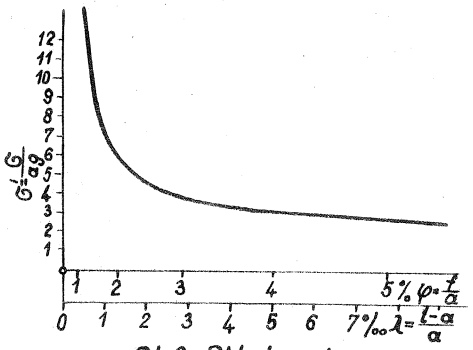
$$\lambda = \frac{l - a}{a} = 2\,\sigma'\,\mathrm{Sinh}\ \frac{1}{2\sigma'} - 1 \quad \ldots\ldots\ (6)$$

Izraz (6) daje nam, dakle, mogućnost, da prikažemo ovisnost relativnog otpusta λ o reduciranom naprezanju σ', pri čemu smo ostale veličine eliminirali. Kako ćemo kasnije vidjeti, veoma je prikladno grafički prikazati izraz (6), jer ćemo u tu krivulju vrlo lako moći unositi stezanja i rastezanja, koja nastaju zbog promjene naprezanja i temperature. Očito je međutim, da uz skalu za relativni otpust λ možemo nacrtati i skalu za relativni provjes φ, jer je njihova međusobna ovisnost jednoznačno određena izrazima (3) i (6). Budući da skalu za λ crtamo kao linearnu skalu, to razumljivo skala za φ neće biti linearna. A kako nas u prvom redu zanima provjes, to ćemo kao glavnu narisati skalu za , a kraj nje kao sporednu skalu za φ. Tako dobijemo našu PN-krivulju (vidi sliku 2). Sve veličine u PN-krivulji su naravno bez dimenzije, jer su to relativne veličine. Zbog lakšeg baratanja brojčanim vrijednostima prikladno je, međutim, relativni provjes unijeti u postocima, a relativni otpust u promilima.

Za svrhe proračunavanja iscrtana je PN-krivulja u prikladnom mjerilu i pridodana kao posebni prilog ovom broju časopisa. U prvom, strmom dijelu krivulje bilo bi teško točno odrediti presjecište vertikalne linije sa PN-krivuljom. Zbog toga su na samoj PN-krivulji označene točke, koje odgovaraju pojedinim vrijednostima za φ. Analogno su radi tačnijeg očitanja u drugom, položitom, dijelu krivulje označene točke, koje odgovaraju pojedinim vrijednostima za σ'.

PN krivulja izrađena je na osnovu točnih izraza za provjes i dužinu vodiča, dok kod računskog postupka računamo

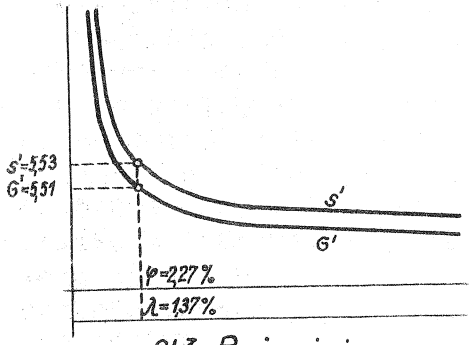
samo s jednim odnosno s dva člana u red razvijenih hiperbolnih funkcija. U tom pogledu, dakle proračun pomoću PN-krivulje je točniji.



Sl.2. PN-krivulja

P r v i p r i m j e r

Upotrebu PN-krivulje dat ćemo najprije na jednom jednostavnom primjeru. Neka je zadan raspon a = 25o metara s bakrenim vodičem od 15o mm^2. Tražimo provjes kod -.°C s dodatnim opterećenjem.



Sl.3. Prvi primjer

Iz tablice o izvedbi užeta izvadimo: stvarni presjek 147 mm^2 promjer vodiča d = 15,8 mm i težinu golog vodiča po dužnom metru 1,3o8 kp/m.

Dodatno opterećenje iznosi prema propisima:

$$o,18\sqrt{d} = o,18\sqrt{15,8} = o,715 \text{ kp/m.}$$

Ukupno opterećenje po dužnom metru je dakle:

$$1,3o8 + o,715 = 2,o23 \text{ kg/m.}$$

Opterećenje reducirano na 1 mm^2 iznosi:

$$g = \frac{2,o23}{147} = o,o13\ 8 \text{ kp/m,mm}^2$$

Maksimalno naprezanje za bakar iznosi prema propisima 19 kp/mm^2. Reducirano horizontalno naprezanje je dakle:

$$\sigma' = \frac{19}{ag} = \frac{19}{25o.o,o13\ 8} = 5,51.$$

Tu veličinu unesemo u dijagram i očitamo vrijednost relativnog provjesa (slika 3)

$$\varphi = 2{,}27\ \%$$

Veličina provjesa iznosi dakle:

$$f = \frac{2{,}27}{100} \cdot 250 = 5{,}68\ \text{m}$$

Zanima li nas otpust, odnosno dužina vodiča u rasponu, to očitamo:

$$\lambda = 1{,}37\ \%$$

odatle imamo za dužinu vodiča:

$$l = a(1 + \lambda) = 250 \cdot (1 + 0{,}00137) = 250{,}343\ \text{m}.$$

Horizontalno naprezanje i naprezanje u ovjesištu.

Ovdje treba napomenuti, da Besser u svojoj PN-krivulji nije dao ovisnost o naprezanju u najnižoj točki lančanice, nego ovisnost o naprezanju u ovjesištu. Teorija mehaničkog proračuna vodiča daje za naprezanje u ovjesištu izraz:

$$s = g\ y = \sigma \operatorname{Cosh} \frac{a}{2\sigma/g}$$

Uvrstimo li ovdje izraz(2), dobijemo:

$$s = a\ g\ \sigma' \operatorname{Cosh} \frac{1}{2\sigma'},$$

Reducirano naprezanje u ovjesištu iznosi dakle:

$$s' = \frac{s}{a\ g} = \sigma' \operatorname{Cosh} \frac{1}{2\sigma'} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (7)$$

Prema tome, uzevši σ' kao parametar, može se nacrtati krivulja relativnog otpusta (osnosno relativnog provjesa) u ovisnosti o reduciranom naprezanju u ovjesištu, koristeći u tu svrhu izraze (3), (6) i (7). Besser je svoju PN-krivulju postavio tako, i to vjerojatno zato, jer je smatrao, da je važnije naprezanje u ovjesištu, koje je uvijek veće od naprezanja u najnižoj točki lančanice, pa će prema tome prvo biti u opasnosti da prekorači dozvoljenu granicu.

Međutim, naprezanje u najnižoj točki lančanice ujedno je horizontalna komponenta naprezanja. Kod montaže ne možemo montirati vodič tako, da uzimamo u obzir, kolika će biti naprezanja u ovjesištu u svakom pojedinom rasponu. Kod samog zatezanja zatežemo vodič u čitavom zateznom polju, dakle kroz desetak ili više raspona, jednako. A prilikom pričvršćenja vodiča na izolatorske lance pazimo uvijek, da lanci vise okomito.

Sve to uvjetuje, da horizontalna naprezanja u svim rasponima istog zateznog polja budu međusobno jednaka. Zato moramo kao podlogu proračuna provjesa uzeti horizontalno naprezanje a ne naprezanje u ovjesištu. Tako je, uostalom, to predviđeno i u propisima. Zato treba i PN-krivulja crtati na taj način da prikazuje relativni provjes (odnosno otpust) u ovisnosti o reduciranom horizontalnom naprezanju σ'.

Ali s druge strane ipak treba u slučaju veoma velikih ili strmih raspona kontrolirati i naprezanje u ovjesištu, koje - prema propisima - ne smije kod dvostrukog dodatnog opterećenja prekoračiti trajnu čvrstoću vodiča. Zato je prikladno imati na raspolaganju i krivulju u ovisnosti o naprezanju u ovjesištu. Zbog toga ćemo i ovu krivulju - kao pomoćnu - ostaviti na našem crtežu. Imat ćemo prema tome donju krivulju, koja se odnosi na σ' i gornju krivulju, koja se odnosi na s'.

Ako nas zanima, koliko je u prijašnjem primjeru naprezanje u ovjesištu, onda ćemo podići vertikalu do gornje krivulje (vidi sliku 3) i očitati:

$$s' = 5{,}53.$$

Prema tome je

$$s = a\ g\ s' = 250\ .\ 0{,}013\ 8\ .\ 5{,}53 = 19{,}1\ kp/mm^2$$

Uostalom postoji interesantan odnos između s' i σ'. Prema jednadžbi (7) je

$$s' - \sigma' = \sigma' \operatorname{Cosh} \frac{1}{2\sigma'} - \sigma' = \sigma' . (\operatorname{Cosh} \frac{1}{2\sigma'} - 1);$$

a to je prema izrazu (3) upravo jednako φ.

Dakle:

$$s' = \sigma' + \varphi .$$

Da kontroliramo gornji primjer:

$$s' = \sigma' + \varphi = 5{,}51 + 0{,}022\ 7 = 5{,}532\ 7;$$ dakle u redu.

Besser je u svojim publikacijama dao odnos između naprezanja u ovjesištu s i horizontalnog naprezanja σ':

$$n = \frac{s}{\sigma} = \frac{s'}{\sigma'} = \operatorname{Cosh} \frac{1}{2\sigma'}$$

Veličina n je funkcija od σ', a isto tako je prema izrazu (3) i relativni provjes φ funkcija od σ'. To omogućava

Besseru da u tablici dade vrijednosti za n u ovisnosti o raznim vrijednostima za φ . Ovako definiran odnos između s', σ' i φ je međutim mnogo nepregledniji i zahtijeva, da imamo na raspolaganju spomenutu tablicu.

U daljnjim ćemo proračunima u ovom članku uvijek raditi s horizontalnim naprezanjima, pa ćemo prema tome upotrebljavati samo donju PN-krivulju, iako to ne ćemo uvijek posebno naglašavati.

Elastično rastezanje vodiča

Mnogo interesantnija je, međutim , upotreba PN-krivulje kod promjene opterećenja vodiča. Pri tome ćemo poći od vodiča, koji ima dužinu l_o, ali koji nije zategnut u rasponu nego - recimo - leži na zemlji i u njemu vlada naprezanje $\sigma'_o = 0$. Relativnu dužinu vodiča možemo prema izrazu (6) prikazati kao

$$\frac{l_o}{a} = 1 + \lambda_o .$$

U našem crtežu PN-krivulje to stanje vodiča odgovara tački A (vidi sliku 4).

Zamislimo sada, da vodič po čitavoj dužini podignemo na rukama u vis, te da ga pričvrstimo na stupove, a zatim da polako spuštamo ruke. U vodiču će u prvi čas biti naprezanje $\sigma_o = 0$, ali što više ruke spuštamo, to će sve više morati vodič da preuzima opterećenje na sebe i σ će rasti. No istodobno s porastom naprezanja vodič će se zbog elastičnosti rastezati, pa će se povećavati njegova relativna dužina.

U momentu, kad postignemo neko naprezanje σ, imat ćemo po zakonu elastičnog rastezanja relativnu dužinu

$$1 + \lambda = (1 + \lambda_o) \cdot (1 + \frac{\sigma - \sigma_o}{E}) ,$$

ili uz $\sigma_o = 0$

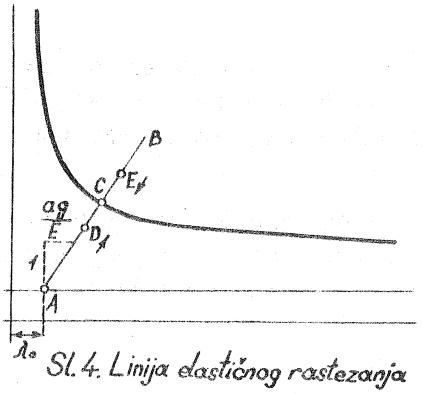
$$1 + \lambda = (1 + \lambda_o) \cdot (1 + \frac{\sigma}{E}) .$$

Tu je E - modul elastičnosti u kp/mm^2.

Izmnožimo li desnu stranu gornjeg izraza, dobijemo

$$1 + \lambda = 1 + \lambda_o + \frac{\sigma}{E} + \lambda_o \frac{\sigma}{E} . \quad (9)$$

Dok se radi o manjim rasponima, do par stotina metara, bit će λ_o relativno maleno (u našem prijašnjem primjeru bilo je $\lambda_o = 1{,}37\ \%$). Isto je tako malen i član $\frac{\sigma}{E}$ (na pr. za



Sl. 4. Linija elastičnog rastezanja

bakreni vodič sa E = 13 ooo kp/mm^2 će za σ = 19 kp/mm^2 biti $\frac{\sigma}{E}$ = 1,46 ‰).

Prema tome će posljednji član u izrazu (9) biti toliko malen, da ga bez daljnjega možemo zanemariti. Ako je na pr. λ_o = 1‰ i $\frac{\sigma}{E}$ = 1‰, onda prema izrazu (9) imamo

$$1 + \lambda = 1 + 0{,}001 + 0{,}001 + 0{,}000\,001 = 1{,}002001 \cong 1{,}002.$$

To zanemarenje primjenjuje uostalom i teorija mehaničkog proračuna vodiča kod računskog postupka, kad postavlja tako zvanu jednadžbu stanja. Prema tome možemo pisati:

$$1 + \lambda = (1 + \lambda_o) \cdot (1 + \frac{\sigma}{E}) \cong 1 + \lambda_o + \frac{\sigma}{E}.$$

Odnosno

$$\lambda = \lambda_o + \frac{\sigma}{E} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (10)$$

Ovaj nam odnos daje liniju elastičnog rastezanja, tj. liniju, po kojoj se kreće točka, koja prikazuje stanje vodiča, ako se mijenja njegovo naprezanje. Budući da je za određeni materijal E = konst., to će izraz (10) biti prikazan pravcem, koji prolazi prijašnjom točkom A (vidi pravac A - B na slici 4).

Da odredimo nagib ovog pravca moramo uzeti u obzir, da je krivulja crtana za reducirano a ne za apsolutno naprezanje. Zato izraz (10) pišemo:

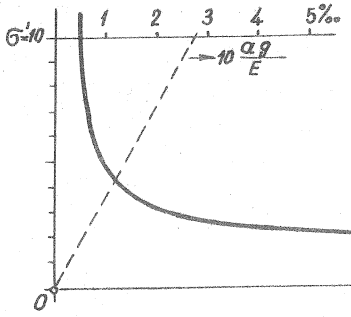
$$\lambda = \lambda_o + \frac{\sigma}{E} = \lambda_o + \frac{\sigma' \cdot ag}{E}$$

Odavle slijedi, da za porast reduciranog naprezanje = 1 imamo porast reduciranog otpusta = $\frac{ag}{E}$ (vidi sliku 4). Radi veće točnosti možemo računati s većim reduciranim naprezanjem (na pr.= 10), pa tome odgovara i toliko veći porast reduciranog otpusta (u ovom slučaju $10\,\frac{ag}{E}$).

Tako radi Besser, te u svom PN-dijagramu crta posebnu skalu reduciranog otpusta na visini σ' = 1o (vidi sliku 5). Spojnica odgovarajuće točke na tom pravcu s točkom O daje nagib linije elastičnog rastezanja.

Na taj način možemo nacrtati liniju elastičnog rastezanja za svaki konkretni slučaj. Ta nam linija daje međusobni odnos naprezanja i dužine užeta, koji je odnos uvjetovan elastičnim rastezanjem. Kao što vidimo, dobili smo ovu liniju prikazanu pravcem, pa je to i bio razlog, zašto smo kao horizontalnu osovinu odabrali linearnu skalu za otpust, a ne skalu za provjes.

Linija elastičnog rastezanja je,međutim, samo jedan uslov za stanje užeta u rasponu. Drugi uslov je diktiran oblikom lančanice, te prikazan samom PN-krivuljom. Razumljivo je, da oba uslova mogu biti ispunjena samo onda, ako stanje užeta prikazuje točka C (vidi sliku 4), t.j. presjecište linije elastičnog rastezanja sa PN-krivuljom. Uže ne može zadržati položaj koji odgovara kojoj drugoj točki na pravcu A -B Na pr. kod stanja prema točki D, dakle ispod točke C, naprezanje je u užetu premaleno, da se odupre vertikalnom opterećenju. Zato dolazi do spuštanja užeta, t.j. do povećanja provjesa i dužine užeta, pa prema tome i do povećanja naprezanja. Ako bi pak stanje užeta prikazivala točka E, naprezanje bi bilo toliko veliko, da bi nadvladalo nad opterećenjem, uže bi se podiglo, provjes i dužina užeta smanjili, pa bi se prema tome smanjilo i naprezanje. U oba slučaja vidimo, da točka stanja teži prema točki C.



Sl.5. Određivanje nagiba linije elastičnog rastezanja

Drugi primjer

Razmotrimo gornje na primjeru. Uzmimo isti prijašnji raspon od 25o metara i bakreno uže od 15o mm^2. Relativni otpust kod nenategnutog užeta neka iznosi λ = 1‰. Težina vodiča po dužnom metru je 1,3o8 kp/m.

Modul elastičnosti za bakar iznosi E = 13ooo kp/mm^2

Reducirano opterećenje iznosi:

$$g = \frac{1,3o8}{147} = o,oo8\ 9\ kp/m,\ mm^2.$$

Dobili smo, naravno, specifičnu težinu bakra!)

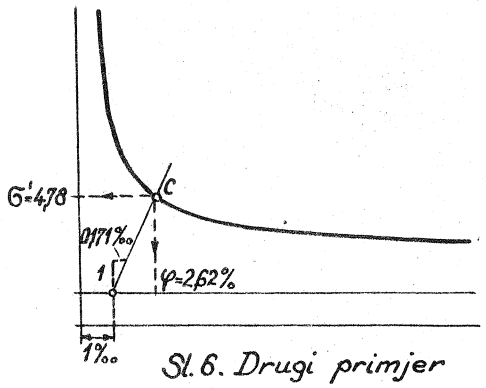
Radi nagiba pravca elastičnog rastezanja računamo:

$$\frac{ag}{E} = \frac{25o \cdot o,oo8\ 9}{13ooo} = o,ooo\ 171 = o,171\ ‰$$

Ucrtamo li pravac elastičnog rastezanja u PN-dijagram (vidi sliku 6), možemo iz njegovog presjecišta s PN-krivuljom očitati

$$\sigma' = 4{,}78,$$
$$\varphi = 2{,}62\ \%.$$

Odatle možemo izračunati:

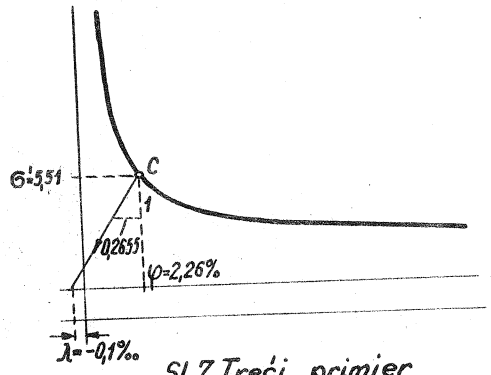


Sl. 6. Drugi primjer

naprezanje: $\sigma = a\ g\ \sigma' =$
$250 \cdot 0{,}008\ 9 \cdot 4{,}78 = 10{,}64$
provjes: $f = a\varphi = 250 \cdot 0{,}026\ \frac{2}{2} =$ 6,55 m

Treći primjer

Kao primjer možemo uzeti i obrnuti slučaj, t.j. da kod prije izračunatog provjesa f= = 5,67 m uz naprezanje σ =19 kp/mm^2 i uz dodatno opterećenje ledom, tražimo, dužinu užeta u nezategnutom stanju. Reduciramo opterećenje smo pri tome imali g = 0,0138 kp/mm^2



Sl. 7. Treći primjer

U ovom slučaju nam je zadana točka C na PN-krivulji vidi sliku 7), definirana sa

$$\varphi = \frac{f}{a} = \frac{5{,}67}{250} = 0{,}022\ 6 =$$

$$= 2{,}26\ \%,$$

odnosno

$$\sigma' = \frac{\sigma}{ag} = \frac{19}{250 \cdot 0{,}013\ 8} = 5{,}51$$

Za nagib pravca elastičnog rastezanja računamo:

$$\frac{ag}{E} = \frac{250 \cdot 0{,}013\ 8}{13\ 000} = 0{,}000\ 265\ 5 = 0{,}265\ 5\ ‰.$$

Iz PN-dijagrama dobijemo (vidi sliku 7)

$$\lambda = -0{,}1‰.$$

Tome odgovara dužina otpusta

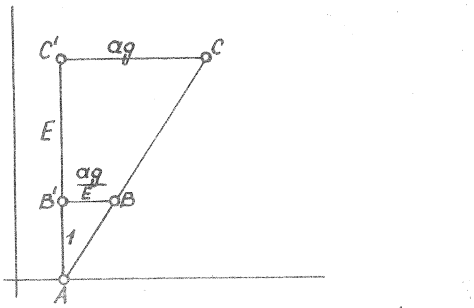
$$\frac{-0,1}{1000} \cdot 250 = -0,025 \text{ m}$$

Dužina nenapetog užeta iznosi dakle

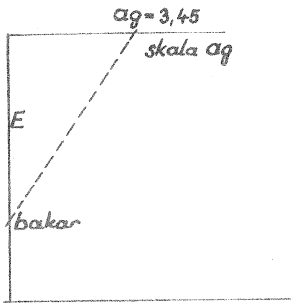
$$l = 250 - 0,025 = 249,875 \text{ m.}$$

Nagib pravca elastičnog rastezanja

Vidjeli smo, da se kao faktor redukcije često ponavlja izraz ag. Zato je dobro veličinu tog izraza u konkretnom slučaju odmah izračunati, te dalje s njom baratati kod proračuna. Veličina ag je neka računska konstanta za svaki primjer proračuna. Ta se konstanta pojavljuje i kod računanja nagiba pravca elastičnog rastezanja. S druge strane na taj nagib utječe modul elastičnosti, koji je opet konstanta za svaki primjer proračuna, jer ovisi samo o materijalu vodiča.



Sl. 8. Određivanje nagiba pravca elast. rastezanja



Sl. 9. Skale za određivanje nagiba pravca elastičnog rastezanja

Ovo možemo iskoristiti za jednostavno određivanje nagiba pravca elastičnog rastezanja. Pri tome polazimo od sličnosti trokuta ABB'i ACC'(vidi sliku 8), gdje smo trokut ACC' dobili množeći stranice trokuta ABB' s modulom elastičnosti E. Kao što je očito, treba na vertikalnoj udaljenosti, jednakoj E, odmjeriti horizontalnu dužinu ag, pa je time određen nagib pravca elastičnog rastezanja. Za brže ćemo određivanje tog nagiba, dakle, (za razliku od Bessera) na povoljnoj visini nacrtati skalu ag (vidi sliku 9). Od te skale prema dolje nanijet ćemo dužine, koje odgovaraju modulu elastičnosti pojedinih materijala. To je i učinjeno, na dijagramu, koji služi za proračun, te je uz označenu dužinu upisan naziv materijala.

U našem smo zadnjem primjeru imali:

materijal vodiča = bakar

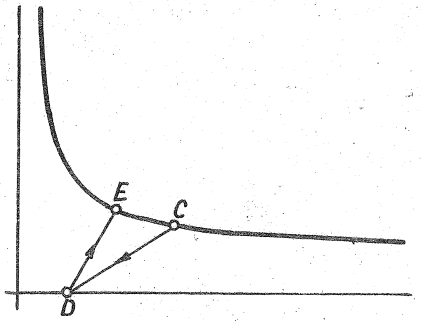
ag = 25o . o,ol3 8 = 3,45 kp/mm^2.

Kako je time definiran nagib pravca elastičnog rastezanja, prikazano je na slici 9.

Time je određen nagib, pa pravac elastičnog rastezanja crtamo iz zadanih točaka kao paralele s ovim nagibom.

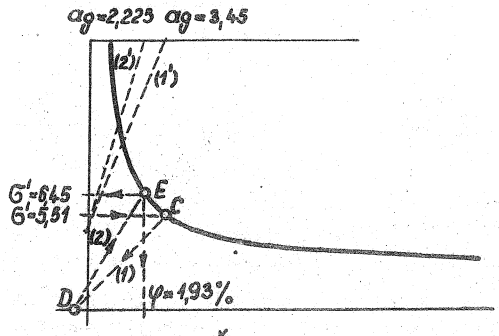
Promjena opterećenja vodiča

Da vidimo sada, kako ćemo koristiti PN-krivulju za ovaj slučaj, koji dolazi na pr. kad maksimalno naprezanje u vodiču nastupa uz dodatno opterećenje, a nas zanimaju naprezanja i provjesi kad dodatno naprezanje nestane. Najprije ćemo promotriti samo prelaz od jednog opterećenja vodiča na drugo bez promjene temperature.



Sl. 10. Promjena opterećenja vodiča

Neka nam točka C (vidi sliku lo) prikazuje stanje vodiča kod stanovitog opterećenja. Da pređemo na stanje s drugim opterećenjem, moramo najprije odrediti osnovnu dužinu užeta, t.j. dužinu užeta u nenapregnutom stanju. To činimo tako, da iz točke C vučemo pravac elastičnog rastezanja do horizontalne osovine dijagrama, analogno drugom primjeru na slici 6. Tako dobijemo na slici lo točku D. Odavle opet vučemo pravac elastičnog rastezanja, ali s nagibom, koji odgovara novom opterećenju vodiča. Sjecište ovog pravca s PN-krivuljom (točkaE) daje nam stanje s novim opterećenjem, pa možemo očitati potrebne vrijednosti.



Sl. 11. Četvrti primjer

Četvrti primjer

Kao primjer uzet ćemo opet prijašnje podatke: a = 25o m, vodič od bakra 15o mm^2, maksimalno naprezanje σ = 19 kp/mm2 nastupa kod -5°C uz dodatno opterećenje. Traži se provjes i naprezanje bez dodatnog opterećenja.

Polazimo od točke C na slici 11, koja nam definira stanje uz $\sigma = 19$ kp/mm^2 i dodatno opterećenje. Kao što smo već prije izračunali, za tu točku imamo:

$$g = 0{,}013\ 8 \text{ kp/m mm}^2,$$

$$ag = 250 \cdot 0{,}013\ 8 = 3{,}45 \text{ kp/mm}^2.$$

$$\sigma' = \frac{19}{3{,}45} = 5{,}51.$$

Sad vučemo pravac elastičnog rastezanja (1) s nagibom, koji odgovara bakrenom vodiču i veličini a g = 3,45 kp/mm^2 i tako dobijemo s horizontalnom osovinom presjecište D. Nagib je određen pravcem (1'), koji dobijemo pomoću pomoćnih skala za E i a.

Dalje nam treba nagib pravca elastičnog rastezanja bez dodatnog opterećenja. U tom slučaju imamo:

$$g = 0{,}008\ 9 \text{ kp/m mm}^2,$$

$$ag = 250 \cdot 0{,}008\ 9 = 2{,}225 \text{ kp/mm}^2$$

To nam za bakreni vodič određuje traženi nagib (2), pa možemo crtati pravac elastičnog rastezanje, te kao presjecište s PN-krivuljom dobijemo točku E. Ta nam točka definira stanje bez dodatnog opterećenja. Iz dijagrama očitamo:

$$\sigma' = 6{,}45,$$

$$\varphi = 1{,}93\ \%.$$

Odatle izračunamo:

$$\sigma = 2{,}225 \cdot 6{,}45 = 14{,}34 \text{ kp/mm}^2,$$

$$f = 250 \cdot 0{,}019\ 3 = 4{,}82 \text{ m}.$$

Promjena temperature

Isto je tako jednostavna upotreba PN-krivulje kod promjene temperature. Ako od stanja s temperaturom ϑ_1 pređemo na stanje s temperaturom ϑ_2 onda ćemo imati:

$$1 + \lambda_2 = (1 + \lambda_1)\left[1 + \beta(\vartheta_2 - \vartheta_1)\right]$$

gdje je β - toplinski koeficijent rastezanja za 1°C.
Izmnožimo li desnu stranu gornjeg izraza, dobijemo:

$$1 + \lambda_2 = 1 + \lambda_1 + \beta(\vartheta_2 - \vartheta_1) + \lambda_1(\vartheta_2 - \vartheta_1),$$

odnosno

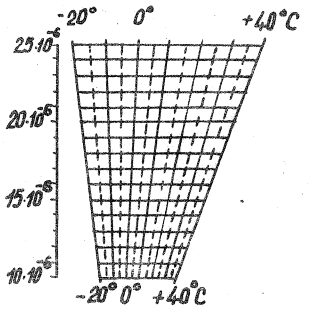
$$\lambda_2 = \lambda_1 + \beta(\vartheta_2 - \vartheta_1) + \lambda_1\beta(\vartheta_2 - \vartheta_1)$$

Kao i prije možemo i ovdje zanemariti treći član, što se vidi na slijedećem primjeru. Aluminij ima - prema drugim materijalima za vodiče - srazmjerno velik toplinski koeficijent rastezanja, i to $\beta = 23 \cdot 10^{-6}$. I uz veliku razliku temperature od - 20 do + 40°C dobijemo kod aluminija toplinsko rastezanje $\beta(\vartheta_2 - \vartheta_1) = 23 \cdot 10^{-6} \cdot 60 = 1{,}38 \cdot 10^{-3}$, dakle nešto više od 1‰. Ako i λ_1 iznosi par promila, onda treći član u gornjem izrazu zaista možemo zanemariti. Tako dobijemo:

$$\lambda_2 = \lambda_1 + \beta(\vartheta_2 - \vartheta_1) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (11)$$

Iz izraza (11) vidimo, da se relativni otpust kod promjene temperature povećava i smanjuje jednostavno tako, da mu se dodaje ili oduzima toplinsko rastezanje. Ovo je opet proporcionalno razlici temperature. Za razne materijale vodiča možemo, dakle, jedamput zauvijek nacrtati skalu toplinskog rastezanja, i to po potrebi dodavati ili oduzimati relativnom otpustu.

Basser je sve ove skale sjedinio zajedno crtajući ih u granicama od $\beta = 10 \cdot 10^{-6}$ do $\beta = 25 \cdot 10^{-6}$, jer se u tim granicama kreću toplinski koeficijenti rastezanja za materijale, koji se upotrebljavaju kod gradnje vodova. Na taj način je dobio slog skala, prikazan na slici 12.



Sl. 12. Skale toplinskog rastezanja

No kod određivanja novog stanja s drugom temperaturom nije dozvoljeno da prema gornjem samo odredimo promjenu relativnog otpusta λ, i da prema njemu očitamo provjes i naprezanje. Ako se, naime, uslijed smanjenja temperature uže skrati, onda je izgubljen uslov ravnoteže, jer ćemo dobiti manji provjes uz isto naprezanje. To se vidi i na PN-dijagramu, jer točka, koja definira stanje užeta ispadne izvan PN-krivulje. Zato se uže mora nešto spustiti, čime će se povećati i provjes i naprezanje, dok opet ne dođemo u stanje ravnoteže. Analogno, ali obrnuto, imamo kod povećanja

temperature.

Ovaj prelaz u stanje ravnoteže ide dakako duž pravca elastičnog rastezanja. Zbog toga kad odredimo povećanje ili smanjenje relativnog otpusta uslijed promjene temperature, onda na toj udaljenosti moramo crtati pravac elastičnog rastezanja, pa će nam tek njegovo presjecište sa PN-krivuljom dati točku, koja odgovara konačnom stanju.

Ako tražimo naprezanje i provjese kod raznih temperatura, onda ćemo skalu toplinskog rastezanje iz slike 1o prenijeti na PN-krivulju, te povući paralele s pravcem elastičnog rastezanje kroz točke svih onih temperatura, koje nas zanimaju. Presjecišta sa PN-krivuljom odredit će nam stanja kod tih temperatura.

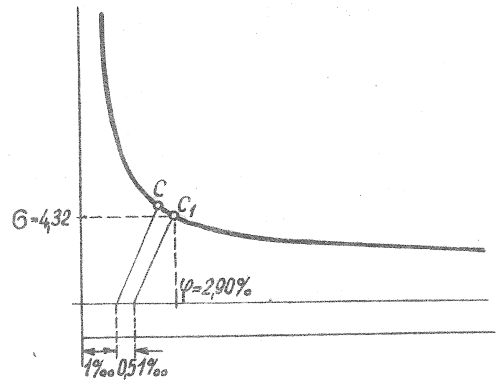
Peti primjer

Uzmimo podatke iz drugog primjera prema slici 6, koji neka odgovaraju stanju kod + 1o°C. Treba odrediti naprezanje i provjes kod + 4o°C.

Toplinsko rastezanje iznosi:

$$\beta(\vartheta_2 - \vartheta_1) = 17 \cdot 1o^{-6} \cdot (4o - 1o) = o,51 \cdot 1o^{-3}.$$

(Ovo smo dakako mogli i direktno odmjeriti na skali prema slici 1o).



Sl.13. Peti primjer

Moramo dakle, nacrtati pravac elastičnog rastezanje pomaknut za gornji iznos u desno(vidi sliku 13). Njegovo presjecište C_1 sa PN-kruvuljom daje nam:

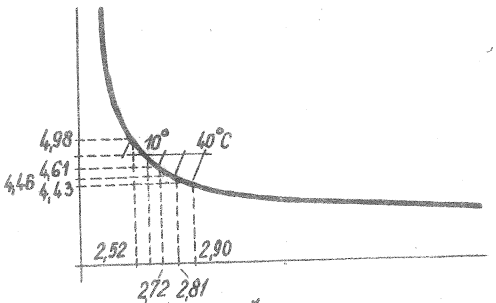
$\sigma' = 4,32,$

$\varphi = 2,9o\ \%.$

Odatle dobijemo:

$\sigma = 25o \cdot o,oo89 \cdot 4,32 = 9,61\ kp/mm^2$

$f = 25o \cdot o,o29o = 7,25\ m.$



Sl.14. Šesti primjer

Šesti primjer

Uzmimo opet iste podatke i tražimo naprezanje i provjese kod raznih temperatura od 0 do 40°C Potrebni grafički postupak prikazan je na slici 14. Iz PN-dijagrama očitamo:

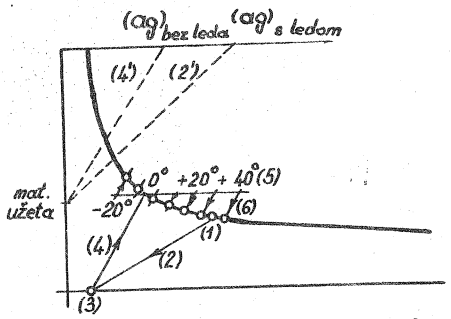
ϑ =	0	1o	2o	3o	4o °C
$6'$ =	4,98	4,78	4,61	4,46	4,32
φ =	2,52	2,62	2,72	2,81	2,9o

Odatle izračunamo:

ϑ =	o	1o	2o	3o	4o °C
6 =	11,1o	1o,64	1o,25	9,92	9,61 kp/mm^2
f =	6,3o	6,55	6,8o	7,o3	7,25 m.

Složeni slučajevi proračuna

Iz gore navedenih pojedinih postupaka možemo sastaviti proračun provjesa i naprezanja za složenije slučajeve, kakvi dolaze u praksi.



Sl.15. Postupak za početno stanje -5°C i zaleđeni vodič.

Jedan takav slučaj imamo, ako maksimalno naprezanje u vodiču nastupa kod -5°C uz dodatno opterećenje, a mi tražimo - osim provjesa kod tog stanja - još naprezanja i provjese kod raznih temperatura. Računski postupak za taj slučaj prikazan je na slici 15. Najprije izračunamo $6'$ za početno stanje, gdje g odgovara dodatnom opterećenju a 6 maksimalnom naprezanju. Izračunati $6'$ određuje nam točku (1) na PN-krivulji, prema kojoj možemo očitati φ i izračnati provjes f.

Zatim odredimo nagib (2) pravca elastičnog rastezanja za zaleđeni vodič, te iz točke (1) crtamo paralelu (2) do horizontalne osi. Time je određena točka (3), koja odgovara nenapregnutom užetu. Iza toga odredimo nagib (4) pravca elastičnog rastezanja na goli vodič bez leda, te iz točke(3) crtamo s tim nagibom pravac elastičnog rastezanja za goli vodič (4). Presjecište ovog pravca s PN-krivuljom daje nam stanje golog vodiča kod temperature -5°C.

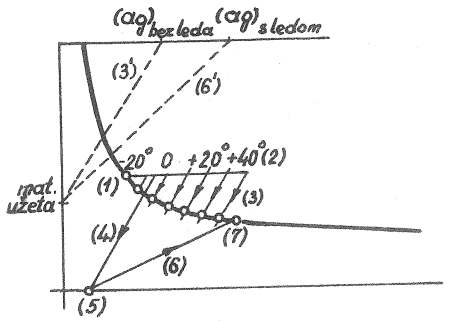
U ovoj točki crtamo horizontalni pravac i na nj prenesemo skalu temperature(5) za materijal našeg užeta. Pri tome nam dobiveno presjecište na PN-krivulji odgovara temperaturi od -5°C. Iz pojedinih točaka za temperature, koje nas zanimaju na pr. za - 2o, -1o, o, +1o, +2o, +3o, +4o°C, crtamo para-

lele (6) usporedno s pravcem (4), te nam njihova presjecišta s PN-krivuljom daju stanja golog užeta kod tih temperatura. Za svako stanje možemo očitati σ', φ a po potrebi i λ, te izračunati naprezanje, provjes i dužinu užeta.

Drugi karakteristični slučaj imamo, kad maksimalno naprezanje nastupa kod $-20^{\circ}C$, i to u nezaleđenom vodiču, a tražimo provjese i naprezanja za razne temperature, kao i za zaleđeni vodič kod temperature, kao i za zaleđeni vodič kod temperature $-5^{\circ}C$. Računski postupak za ovaj slučaj prikazan je na slici 16.

Najprije izračunamo σ' za početno stanje, gdje g odgovara golom vodiču, a σ maksimalnom naprezanju. Izračunati σ' određuje nam točku (1) na PN-krivulji, prema kojoj možemo očitati φ i izračunati provjes za ovo stanje. Zatim u točki (1) nacrtamo horizontalu i na nju prenesemo skalu temperature (2), koja odgovara materijalu našeg užeta, pri čemu točki (1) odgovara $-20^{\circ}C$ na toj skali. Iza toga odredimo nagib (3') pravca elastičnog rastezanja za golo uže bez leda, te iz pojedinih točaka na skali temperature vučemo paralele (3), dok se ne sijeku s PN-krivuljom. Presjecišta nam daju stanja kod raznih temperatura, pa možemo očitati σ', φ i eventualno λ, te izračunati naprezanje, provjese i dužinu užeta.

Da odredimo stanje zaleđenog vodiča kod temperature $-5^{\circ}C$, crtamo iz točke, koja odgovara temperaturi $-5^{\circ}C$, pravac elastičnog rastezanja (4) paralelan s pravcem (3') do presjecišta (5) na horizontalnoj osi . To nam daje dužinu nenapregnutog užeta. Zatim odredimo nagib (6') pravca elastičnog rastezanja za zaleđeni vodič, pa iz točke (5) crtamo s njim paralelu (6) do PN-krivulje. Presjecište (7) određuje nam stanje zaleđenog vodiča kod temperature $-5^{\circ}C$, pa možemo očitati i izračunati tražene veličine.



Sl. 16. Postupak za početno stanje -20°C i nezaleđeni vodič.

Osim navedenih slučajeva može se PN-krivulja vrlo dobro koristiti i za razne druge probleme kod mehaničkog proračuna vodiča. Ako pravac elastičnog rastezanje produžimo preko granice elastičnosti u odgovarajuću krivulju, možemo istraživati slučajeve, kod kojih prekoračujemo granicu elastičnosti sve do loma vodiča. Kod raspona na zateznim lancima možemo uzeti u obzir promjenu raspona

u vezi s nagibom lanaca, te to unijeti u proračun. Nadalje, vrlo lako možemo odrediti, koliko moramo skratiti uže kod naknadnog zatezanja, i tako dalje. Ovo su, dakako, samo neke od primjerna, pa će se,naravno, PN-krivulja moći upotrebiti za proračun i kod mnogih drugih slučajeva.

Kao što vidimo, PN-kruvulja nam daje mogućnost, da veoma pregledno, brzo i točno rješavamo mnoge zadatke, na koje nailazimo kod mehaničkog proračuna vodiča, pa ćemo se njome moći u praksi vrlo dobro poslužiti.

IV IZBOR I DEMENZIONIRANJE IZOLATORA

Izbor izvedbe izolatora

Kod prijenosa električne energije dolaze u obzir jedino ovjesni izolatori, jer se samo oni danas upotrebljavaju za vodove najvišeg napona. Od pojedinih izolatorskih članaka sastavlja se izolatorski lanac. Broj izolatora u lancu ovisi o odabranom nivou izolacije i o veličini pojedinih izolatorskih članaka.

Zahtjevi

Zahtjevi, koji se stavljaju na izolatore, odnosno izolatorske lance jesu ovi:

a) električna čvrstoća na preskok,

b) električna čvrstoća na proboj,

c) mehanička čvrstoća,

d) otpornost na atmosferske utjecaje,

e) otpornost na promjene temperature,

f) postojanost svojstva odnosno trajnost,

g) sigurnost lanca od prekida,

h) laka proizvodnja i mala cijena,

i) lako uzdržavanje u pogonu.

Razmotrimo pojedine od ovih zahtjeva.

Električna čvrstoća na preskok potrebna je, da se dobije dovoljni izolacioni nivo voda. Ona je dana vanjskim oblikom izolatora i dužinom izolatorskog lanca.

Električna čvrstoća na proboj sprečava da ne dođe do kratkog spoja kroz sam porculan. Redovito je čvrstoća na proboj znatno veća od čvrstoće na preskok.

Mehanička čvrstoća je potrebna, jer se preko izolatorskih lanaca prenose sile sa vodiča na stup. Te sile mogu biti težina vodiča i dodatnog tereta (kod nosnih stupova) odnosno vlak vodiča (kod zateznih stupova).

Otpornost na atmosferske utjecaje mora spriječiti ili ublažiti posljedice atmosferskih utjecaja na električna i mehanička svojstva izolatora. Kiša, vlaga i nečistoća, koje se talože na površinu izolatora, smanjuju električnu čvrstoću na preskok i taj se utjecaj može jedino ublažiti. Kvarenje ostalih svojstava i izolatora može se spriječiti, ako se upotrebi takav materijal, koji ne mijenja svoja svojstva uslijed atmosferskih utjecaja, na pr. ako ne upija vlagu i slično.

Otpornost na promjene temperature je potrebna da se izolatori ne oštete, ako na izolatorskom lancu dođe do električnog luka, koji razvija veliku toplinu.

Postojanost svojstva daje trajnost izolatoru, a to znači da će dovoljno dugo u pogonu zadržati svoja početna svojstva, i da neće doći do t.zv. starenja.

Sigurnost lanca od prekida je poželjna, da se spriječi pad vodiča na zemlji, kako bi se izbjegao veći kvar na vodu, ili eventualna nesreća.

Laka proizvodnja je poželjna, da se izbjegne kompliciran proizvodni proces, a s tim u vezi je povezano i pitanje cijene, za koju je jasno, da je poželjno da bude što manja.

Lako uzdržavanje u pogonu je poželjno, jer se time smanjuju troškovi za nadzor, pregled i ispitivanje izolatora za vrijeme pogona voda.

Materijali i izvedbe, koje se danas upotrebljavaju za izolatore vodova najvišeg napona, u manjoj ili većoj mjeri ispunjavaju gore navedene zahtjeve.

Materijal i izvedbe

Materijali, koji se danas upotrebljavaju za izolatore vodova najvišeg napona, jesu:

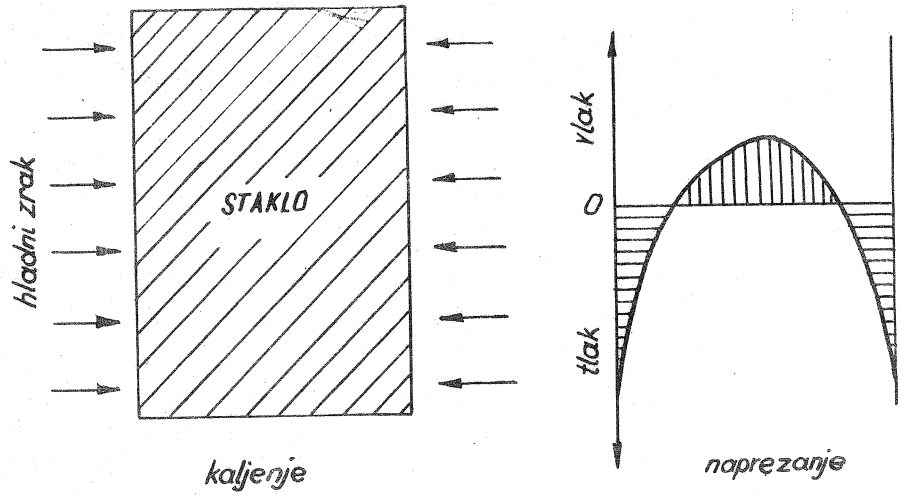
a) elektroporculan,
b) kaljeno staklo.

Elektroporculan se proizvodi od smjese glinenca, kvarca i kaolina, upotrebljenih otprilike u omjeru 1: 1 : 2. O upotrebljenom omjeru ovise i svojstva izolatora, i to: veći postotak glinenca daje veću električnu čvrstoću na proboj, veći postotak kvarca daje veću mehaničku čvrstoću, a veći postotak

kaolina daje veću otpornost prema toplini.

Kaljeno staklo se upotrebljava razmjerno malo, ali u posljednje vrijeme sve i više, pogotovo u nekim zapadnim zemljama. Uslijed kaljenja dobiju se u staklu naprezanja, i to na površini tlačna a unutra vlačna, što staklu daje znatno veću mehaničku čvrstoću, pogotovo na udar i veću otpornost prema promjeni temperature. Osim toga takvo staklo pri najmanjem oštećenju (bilo mehaničkom, bilo uslijed električnog proboja) potpuno se rasprne u sitne komadiće, pa je oštećeni izolatorski članak lako uočljiv i bez posebnog ispitivanja.

Na slici 1. prikazan je način kaljenja stakla i raspodjela naprezanja koja time nastaje.



Sl.1. Kaljenje stakla

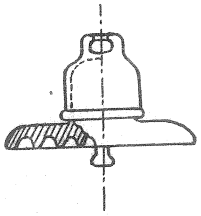
Izvedbe izolatora koji se danas upotrebljavaju za vodove najvišeg napona, jesu ove:

a) kapasti izolatori i magleni kapasti izolatori
b) masivni izolatori,
c) štapni izolatori i magleni štapni izolatori.

Kapasti izolatori se danas proizvode od elektro-porculana i od stakla, dok se masivni i štapni izolatori proizvode zasada samo od elektroporculana.

Kapasti izolatori

Osnovni oblik kapastog izolatora prikazan je na slici 2. Pojedini članci se sastavljaju u lance tako, da se batić gornjeg

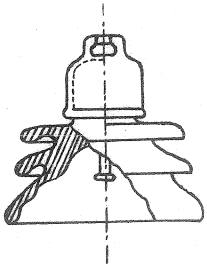


Sl. 2. Kapasti izolator

članka umetne odozgo u kapu donjeg članka. Ova izvedba dobro rješava mehanički problem jer je porculan napregnut uglavnom na tlak, a tlačna čvrstoća porculana je mnogo veća nego vlačna. Nadalje je lanac siguran od prekida, jer će se kod loma porculana slomiti samo vanjski dio, dok će mehanička veza između kape i batića ostati i tako vodič ne će pasti na zemlju. Isto tako ova izvedba dobro rješava i problem proizvodnje, jer se radi o razmjerno malim komadima, bez naročito debelih dijelova.

Međutim, električni problem kod kapastih izolatora nije najpovoljnije riješen, jer može doći do proboja između kapa i batića, pa to zahtijeva ispitivanje izolatora za vrijeme pogona, kako bi se pronašli eventualno oštećeni izolatori i zamijenili novima.

U pogledu električne čvrstoće na preskok mjerodavne su vanjske dimenzije i oblik izolatora, koji mora biti takav, da smanuje štetno djelovanje kiše., vlage i nečistoća iz atmosfere. Ako su u tom pogledu prilike naročito teške (na pr. ako vod prolazi kroz industrijska područja, koja onečišćavaju atmosferu, ili u blizini mora, gdje se sol može taložiti na izolatorima), onda se upotrebljavaju magleni izolatori, Slika 3 prikazuje magleni izolator njemačke izvedbe, a iz slike se vidi kako je dužina klizne staze na izolatoru razmjerno velika.

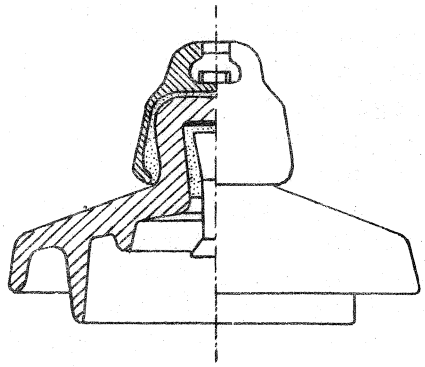


Sl. 3. Magleni kapasti izolator

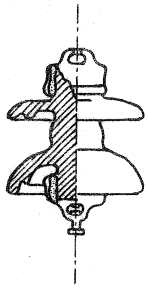
Kao što je rečeno, kapasti izolatori izrađuju se i od stakla. No i u ovom slučaju mogu se upotrebiti izolatori sa dužim kliznom stazom. Na slici 4 prikazan je takav izolator kakav se upotrebljava u Engleskj.

Stakleni kapasti izolatori imaju uglavnom ista svojstva, kao i oni od porculana, samo što imaju pred njima još jednu prednost. Kod staklenih izolatora, naime nije potrebno ispitivanje izolatora u pogonu (jer izolator može biti bilo potpuno

ispravan bilo potpuno skrhan, a to je izdaleka lako uočljivo), pa to znatno olakšava uzdržavanje voda.



Sl.4 Magleni kapasti izolator od stakla



Sl.5 Masivni izolator

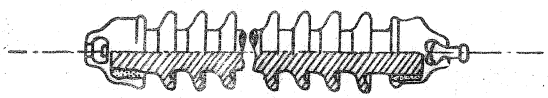
Masivni izolatori

Oblik masivnog izolatora prema njemačkoj izvedbi prikazan je na slici 5. Pojedini članci sastavljaju se u lance tako, da se pomoću dvostrukog batića spoje kape susjednih članaka.

Ova izvedba dobro rješava električni problem, jer je put kroz porculan tako dug, da do proboja izolatora uopće ne može doći. Na taj način uopće otpada svako ispitivanje izolatora u pogonu. Međutim, mehanički problem ovdje nije tako dobro riješen, jer je porculan napregnut na vlak. Osim toga ne postoji sigurnost od prekida lanca, jer se kod jačeg oštećenja izolatora lanac prekida i vodič pada na zemlju. Nadalje je i proizvodnja ovih izolatora nešto teža, zbog masivnijih komada porculana.

Štapni izolatori

Osnovni oblik štapnog izolatora prikazan je na slici 6. Članci se izrađuju razne dužine s različitim brojem rebara, tako da je za vodove do 110 kV dovoljan jedan članak u lancu. Za veće napone sastavljaju se članci od dva ili tri štapna izolatora na isti način kao i kod masivnih izolatora.



Sl.6. Štapni izolator

Svojstva štapnih izolatora su slična kao kod masivnih izolatora, jer to u stvari i nisu drugo nego produženi masivni izolatori. Zbog manjeg broja članaka u lan-

cu utrošak čeličnih dijelova je manji. Iz istog razloga nema mogućnosti da se u slučaju kvara električni luk duž lanca prihvati na neki metalni dio lanca (t.zv. kaskadni luk), čime se lanac termički jače opterećuje.

Za nepovoljne atmosferske prilike i ovdje postoji izvedba s povećanim brojem rebara.

Pregled

Ako se analiziraju svojstva pojedinih izvedbi izolatora, dolazi se do zaključka, da neke izvedbe bolje udovoljavaju jednim zahtjevima, dok druge izvedbe bolje udovoljavaju drugim od prije postavljenih zahtjeva.

Kako pojedine izvedbe udovoljavaju postavljenim zahtjevima prikazano je u tablici I. Prednost pojedine izvedbe u pogledu dotičnog zahtjeva prikazana je oznakom "+", mana znakom "-", a ako je zahtjevu osrednje udovoljeno znakom "0". Pri dnu je načinjena suma ovako grubo prikazanih svojstava za svaku izvedbu izolatora.

Svojstva izolatora — Tablica I

Svojstvo	Porculan					Staklo	
	K	K-magl.	Masiv.	Štap.	Š-mag.	K	K-magl
El.čvrstoća na preskok	0	+	0	0	+	0	+
Elek.čvrstoća na proboj	-	-	+	+	+	-	-
Mehanička čvrstoća	+	+	-	-	-	+	+
Otpornost na atm.utj.	0	0	0	0	0	0	0
Otporn.na prom.temp.	0	0	0	0	0	0	0
Postojanost(trajnost)	0	0	0	0	0	0	0
Sigurnost lanca od prek.	+	+	-	-	-	+	+
Laka proizv.(cijena)	0	-	0	0	-	0	-
Lako uzdrž.u pogonu	-	-	0	0	0	0	0
Rezultat	0	0	-	-	-	+	+

+ znači "prednost"
0 znači "osrednje"
- znači "mana"

Prema rezultatu dobivenom u tablici I izlazi, da najveće prednosti imaju stakleni izolatori, zatim dolaze porculanski kapasti izolatori i na kraju masivni i štapni izolatori. No odlučni zaključak ipak iz ovoga ne smijemo izvući. Prvi razlog tome jest, što su prednosti i mane na previše grubi način unesene u tablicu, pa rezultat ne smijemo smatrati značajnim. Drugi razlog jest, što ne smijemo gledati samo na zadnji sumarni redak u tablici, nego i na to kako pojedini izolatori udovoljavaju pojedinim zahtjevima, pa će baš prema specifičnim zahtjevima u konkretnom slučaju ovisiti, koja izvedba izolatora ima prednost. To nam je ujedno objašnjenje zašto se sve ove izvedbe danas u svjetskoj praksi primjenjuju.

Umjesto na izbor tipova izolatora bolje je položiti veću važnost na kvalitetu, pa makar kvalitetni izolatori bili i prilično skuplji. Izolatori naime čine razmjerno mali dio od ukupne cijene voda pa štednja baš na tom mjestu neće mnogo smanjiti ukupnu investiciju, a pri tome možemo znatno smanjiti vrijednost voda u njegovoj ulozi, koju ima u mreži. Zbog toga se može reći, da ne treba štediti na investiciji za izolatore na vodu, ako time makar i malo povećamo sigurnost pogona.

Brojčani podaci

Brojčani podaci o pojedinim svojstvima raznih tipova izolatora dani su redovito u standardima pojedinih zemalja odnosno u katalozima tvornica. Za izolatore i izolatorske lance prema njemačkim standardima DIN dani su glavni podaci u smjernicama za izbor izolatora VDE 0294, koji podaci ovdje zbog opširnosti nisu citirani.

Za naše prilike interesantno je navesti podatke za kapasti izolator prema prijedlogu jugoslavenskog standarda (JUS). Ti su podaci slijedeći:

oznaka: K 17o/28o
visina: 17o mm,
promjer: 28o mm,
minimalni prekidni teret: 7 tona,
elektromehanički teret: 6,4 tone,
24-satni teret: 4 tone,
Podnosivi preskočni napon industrijske frekvencije na suho: 7o kV,
Podnosivi preskočni napon ind. frekvencije pod kišom: 5o kV,
minimalni probojni napon industrijske frekvencije: 11o kV
5o % preskočni udarni napon pozitivni: 13o kV,
5o % preskočni udarni napon, negativni: 136 kV.

Isto tako će biti interesantno navesti neke podatke staklenih kapastih izolatora. Tako na pr. francuski izolator proizvodnje L'Elecrto-Verre s oznakom 15lo T ima ove podatke:

oznaka: 15lo T
visina: 146 mm,
promjer: 254 mm,
minimalni prekidni teret: 9 tona,
elektromehanički teret: 7 tona,
preskočni napon industrijske frekvencije pod kišom: 45 kV.

Mehaničko dimenzioniranje izolatora

Kod mehaničkog dimenzioniranja razlikujemo dimenzioniranje nosnih i dimenzioniranje zateznih izolatora, jer se njihova mehanička funkcija bitno razlikuje. Kod nas ne postoje propisi za vodove iznad llo kV pa smo u tom pogledu slobodni, da radimo prema uobičajenoj tehničkoj praksi.

Kod nas je prije bila uvedena praksa prema njemačkim propisima, pa su tako sastavljeni i naši Privremeni propisi za vodove do llo kV. Danas se, međutim, i njemački propisi za mehaničko dimenzioniranje izolatora u preradi, pri čemi je bitno da se napušta pojam trajne čvrstoće. Za sadanje naše prilike čini se najprikladnije, da se kao osnova za mehaničko dimenzioniranje uzme stanovište Sekretarijata Tehničkog odbora ll Jugoslavenske elektrotehničke komisije, koji je izradio novi prijedlog propisa za gradnju vodova.

Prema tom prijedlogu kapasti izolatori se dimenzioniraju obzirom na elektromehaničku čvrstoću s faktorom sigurnosti 3, a masivni i štapni izolatori obzirom na minimalnu prekidnu čvrstoću opet s faktorom sigurnosti 3. Kao računsko opterećenje uzima se kod nosnih izolatora težina vodiča sa dodatnim teretom, a kod zateznih izolatora umnožak presjeka i maksimalnog radnog naprezanja.

Mehanička svojstva nekih tipova izolatora, koji dolaze u obzir za vodove najvišeg napona dana su u tablici II. Tu je uzet u obzir kapasti izolator prema prijedlogu JUS (koji je nedavno izrađen), te kapasti, masivni i štapni izolatori prema njemačkim DIN-normama.

Mehaničke karakteristike izolatora — Tablica II

Standard	T i p izolatora	Minimalni prekidni teret	Elektromehanička čvrstoća
JUS(Prijedlog)	K	-	6,4 t
DIN	K 17o/28o	-	8,o t
DIN	VK 75/2	8,o t	-
DIN	VK 85/2	9,6 t	-
DIN	VKL 75/14	8,o t	-
DIN	VKL 85/14	9,6	-

Primjer

Radi ilustracije izvršit ćemo mehaničko dimenzioniranje izolatora za vod, koji ima u svakoj fazi po dva vodiča od alučela 24o/4o mm^2 u snopu. Ti vodiči imaju slijedeće podatke:

promjer vodiča: d = 21,7 mm,
težina vodiča: G_o = 971 kg/km,
težina dodatnog tereta: $G_1 = 18o \sqrt{21,7} = 839$ kg/km
težina zaleđenog vodiča: $G_z = 971 + 839 = 181o$ kg/km,
ukupni presjek vodiča: A = 276,1 mm^2.

Dimenzionirat ćemo prvo nosne izolatore uz pretpostavku, da gravitacioni raspon iznosi:(a)5oo m, (b) 65o m, odnosno (c) 8oo m.

Težina čitavog snopa od dva vodiča u gravitacionom rasponu iznosi:

(a) $G_{gr} = 2 . 181o . o,5oo = 181o$ kg,
(b) $G_{gr} = 2 . 181o . o,65o = 2355$ kg,
(c) $G_{gr} = 2 . 181o . o,8oo = 29oo$ kg.

Kod ovjesnih izolatora moramo računati s faktorom sigurnosti 3, O, kako kod nosnih tako i kod zateznih stupova. Tako dobivena sila mora biti manja od elektromehaničke čvrstoće kod kapastih izolatora, odnosno od minimalne prekidne čvrstoće kod masivnih i štapnih izolatora.

Na taj način dobijemo slijedeće sile, koje su mjerodavne za izbor izolatora:

(a) F = 3 . 1810 = 5430 kg,
(b) F = 3 . 2355 = 7065 kg,
(c) F = 3 . 2900 = 8700 kg.

Usporedimo li to s tablicom II, vidimo da za razne gravitacione raspone možemo upotrebiti ove izolatore:

(a) za 500 m .... sve izolatore navedene u tablici II,
(b) za 650 m .... sve osim kapastog izolatora po standardu JUS,
(c) za 800 m .... samo izolatore VK 85/2 i VKL 85/14.

Za dimenzioniranje zateznih izolatora pretpostavit ćemo maksimalno radno naprezanje vodiča 9 kg/mm^2. Uz poznati presjek vodiča dobijemo da vlačna sila snopa od dva vodiča iznosi:

H = 2 . 276,1 . 9,0 = 4975 kg

Sila, mjerodavna za izbor izolatora, iznosi prema tome:

F = 3 . 4975 = 14920 kg.

Usporedimo li to s tablicom II, vidimo da moramo upotrebiti trostruki izolatorski lanac, ako uzmemo kapasti izolator po standardu JUS, dočim je za sve ostale navedene izolatore dovoljno uzeti dvostruki lanac.

Električno dimenzioniranje

Električno dimenzioniranje izolacije voda vrši se:

a) obzirom na unutarnje prenapone,
b) obzirom na vanjske prenapone.

Unutarnji prenaponi

Unutarnji prenaponi nastaju od izvora unutar same mreže i to radi raznih sklapanja u mreži (namjernih ili nenamjernih), te gdjekada uslijed pojava rezonancije (najčešće uslijed fero-rezonancije). Prema podacima mjerenja u mrežama i na modelima može se računati da unutarnji prenaponi između faza i zemlje ne prelaze iznose od:

a) za kruto uzemljenu mrežu ..... 2 do 3 puta fazni napon,
b) za mrežu koja nije kruto uzemljena .... 3 do 4 puta fazni napon.

U smislu koordinacije izolacije dimenzionira se izolacija električnih postrojenja tako, da može izdržati unutarnje prenapone, te elektrotehnički propisi daju u tom smislu određene upute. Takvi brojčani podaci za kruto uzemljenu mrežu 22o kV primjera radi prikazani su u tablici III. i to prema prijedlogu JUS za koordinaciju izolacije i prema VDE 0294/...56 za izbor izolacije vodova. Pri tome se ispitivanje podnosivim izmjeničnim naponom podrazumijeva pod kišom.

Potrebna izolacija voda 22o kV (za kruto uzemljenu mrežu)

Tablica III

	JUS kV	VDE kV
Stupanj izolacije (redni napon)	Si 245 z	22o E
Maksimalni pogonski napon	245	25o
Podnosivi izmjenični napon	395	4o5
Podnosivi udarni napon	9oo	78o

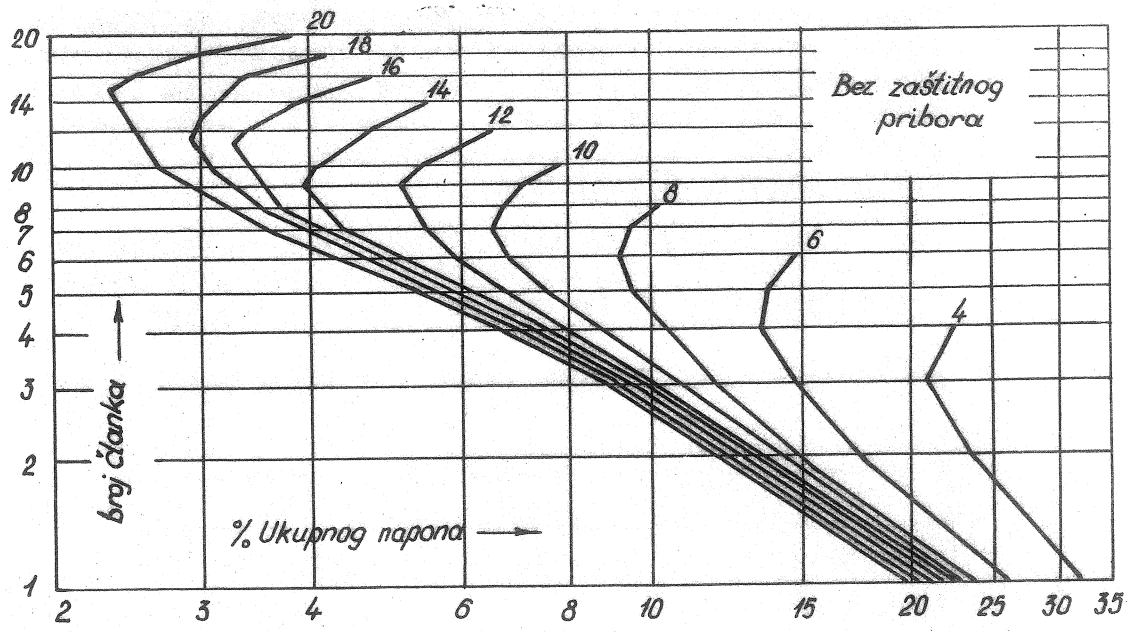
Nakon izbora izmjeničnog i udarnog podnosivog napona za neki vod, treba izolatorski lanac odabrati tako, da on tome zadovolji. Kod nas nema ovjerenih podataka za lance od domaćih kapastih izolatora. Možemo se međutim, poslužiti podacima iz VDE o294, koji takve podatke daju. Ti su podaci za izolatorske lance u području koje odgovara naponu voda 22o kV primjera radi dani u tabeli IV.

Električne karakteristike izolatorskih lanaca Tablica IV

Tip izolatora	Broj članaka	Podnosivi napon kV	
		izmjenični	udarni
K 17o/28o	9	375	782
"	1o	414	864
"	11	452	946
"	12	49o	1o27
VK 75/2,85/2	5	382	818
"	6	45o	964
"	7	519	11o9
VKL 75/14,85/14	2	6oo	1163

Podaci o električnim svojstvima izolatorskih lanaca u tablici IV dani su za lance bez zaštitnog pribora, t.j. bez rogova, odnosno zaštitnih prstena.

Radi zaštite izolatorskog lanca od električnog luka upotrebljavaju se na vodovima najvišeg napona redovito rogovi (osim kod drvenih stupova), a često se upotrebljavaju i zaštitni prsteni, da se dobije povoljnija razdioba napona na pojedine članke. Razdioba napona je to nepovoljnija, što je veći broj članaka u lancu, kao što se to vidi na slici 7.



Sl. 7. Raspodjela napona na izolat. lancu

Upotreba zaštitnog pribora, međutim, u izvjesnoj mjeri smanjuje preskočni napon, pa se prema tome proporcionalno smanjuje i podnosivi napon izolatorskog lanca.

Što se tiče preskočnog napona industrijske frekvencije pod kišom, može se prema VDE o294 uzeti da smanjenje uslijed zaštitnog pribora iznosi oko 3o kV.

Što se tiče udarnog napona, VDE o294 daje za 5o % preskočni napon oblika 1/5o ove formule:

za kapaste i masivne izolatore:

$$U = 65\ kV + 5{,}2\ \frac{kV}{cm} \cdot s,$$

za štapne izolatore:

$$U = 5o\ kV + 5,7\ \frac{kV}{cm}\ .\ s,$$

gdje je s = preskočni razmak u centimetrima.

Primjer

Dimenzionirat ćemo izolatore za vod s naponom 22o kV, koji se nalazi u mreži s kruto uzemljenim zvjezdištem. Pretpostavljamo, da će izolatori na vodu biti opremljeni zaštitnim priborom, pa da će se izmjenično preskočni napon lanca smanjiti za 3o kV. Što se tiče udarnog napona morali bismo znati točne dimenzije zaštitnog pribora, da bismo mogli odrediti preskočni razmak. Kako te dimenzije nisu standardizirane, to će one ovisiti o raznim okolnostima (vrst zaštitnog pribora, proizvođač, i sl.). Za početak ćemo uzeti, da se preskočni udarni napon smanji između 0 % do lo %, ako ga opremimo zaštitnim priborom.

Na temelju gornjih pretpostavki dobijemo zahtjeve, kojima moraju udovoljiti izolatorski lanci dok još nemaju zaštitnog pribora. Ti su zahtjevi navedeni u tablici V.

Zahtjevi za izolatorske lance bez zaštitnog pribora

Tablica V

	JUS	VDE
Podnosivi izmjenični napon	425 kV	435 kV
5o % udarni napon	9oo-99o kV	78o-86o kV

Prema podacima tablice IV možemo vidjeti, koji izolatorski lanci već udovoljavaju tom zahtjevu. Tako dobiveni podaci navedeni su u tablici VI, gdje su dani podnosivi naponi uračunavši zaštitni pribor.

Iz tablice VI vidi se, da je za udovoljenje zahtjeva koordinacije izolacije potrebno da u izolatorskom lancu bude najmanje slijedeći broj članaka:

11 do 12 kapastih izolatora, ili
6 do 7 masivnih izolatora, ili
2 štapna izolatora

Na temelju broja članaka i točnih dimenzija zaštitnog pribora morali bismo sada odrediti točnu vrijednost preskočnog razmaka, te na osnovu prije navedenih formula izračunati preskočni napon. Radi sigurnosti preskočni napon mora biti barem lo % veći od podnosivog napona .

Najmanje potrebni izolatorski lanci (sa zaštitnim priborom)

Tablica VI

Tip izolatora	Broj članaka	Podnosivi napon, kV	
		izmjenični	udarni
JUS K	11	432	851 - 946
JUS K	12	46o	924 -1o27
DIN K 17o/28o	11	432	851 - 946
" K "	12	46o	924 -1o27
" VK 75/2	6	42o	868 - 964
" VK "	7	489	998 -11o9
" VK 85/2	6	42o	868 - 964
" VK "	7	489	998 -11o9
" VKL 75/14	2	57o	1o47- 1163
" VKL 85/14	2	57o	1o47 -1163

Vanjski prenaponi

Vanjski prenaponi nastaju prvenstveno zbog atmosferskih utjecaja, a mogu dostići mnogo veći iznos od unutarnjih prenapona. Izolacija postrojenja zaštićena je od atmosferskih prenapona redovito pomoću odvodnika prenapona, ali to kod izolatora na vodovima nije slučaj. Potrebno je međutim, bar za važne vodove, dimenzionirati izolaciju tako, da atmosferski prenaponi ne dovode prečesto do kratkih spojeva na vodu.

Atmosferski prenaponi u vodu mogu nastati na tri načina: (a) kod udarca munje u okolinu voda, putem električne indukcije, (b) kod udarca munje u uzemljene dijelove vode (bilo u stup, bilo u zaštitno uže), zbog pada napona u otporu uzemljenja, odnosno u valnom otporu zaštitnog užeta, i (c) kod udarca munje u vodič. Dobro je poznato da udar munje u okolinu redovito nije opasan za vod, pogotovu ako se radi o vodu vrlo visokog napona. S druge strane direktni udar munje u vodič dovodi do tako velikih prenapona, da to izolacija nikako ne može izdržati, a povećanje nivoa izolacije na tu visinu bilo bi ekonomski nepodnošljivo. Zbog toga preostaje, da se razmotri samo slučaj udara munje u uzemljene dijelove voda.

Za slučaj da munja udari u stup, dobijemo slijedeći prenapon:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{Zm} + \frac{2}{Z_u} + \frac{1}{R}} \; I_m \cdot k + u,$$

gdje je: Z_m = valni otpor za munju samu,

Z_u = valni otpor zaštitnih užeta,

R = otpor uzemljenja stupa,

I_m = struja munje

k = faktor smanjenja zbog induciranja napona u vodiče

u = momentalna vrijednost pogonskog napona

Za valni otpor munje može se uzeti prosječna vrijednost

Z_m = 4oo oma.

Kao valni otpor zaštitnih užeta može se uzeti:

Z_u = 5oo oma za jedno uže, Z_u = 312 oma za dva, odnosno Z_u = 25o oma za tri zaštitna užeta.

Kao faktor smanjenja može se uzeti k = o,6 do o,9.

Za slučaj da munja udari u zaštitno uže u sredini raspona, dobijemo prenapon, koji je manji od prijašnjega. Želimo li dakle izbjeći smetnju uslijed ovih prenapona, mora izolacija voda biti dorasla naponu, izračunatom prema gornjoj formuli.

Primjer

Pretpostavit ćemo da je naš 22o kV-ni vod snabdjeven jednim zaštitnim užetom. Kao osnovu za proračun uzet ćemo ove vrijednosti:

valni otpor same munje: Z_m = 4oo oma

valni otpor zaštitnog užeta: Z_u = 5oo oma,

otpor uzemljenja: R = 1o,2o, 3o, 4o, 5o, oma,

struja munje: I_m = 3o, 5o, 8o kV

faktor smanjenja: k = o,7

momentalna vrijednost napona: $u = \frac{22o}{\sqrt{3}} \sqrt{2} = 18o$ kV

Napon uslijed udarca munje u stup iznosi

$$U = \frac{1}{\frac{1}{4oo} + \frac{1}{5oo} + \frac{1}{R}} I_m \cdot o,7 + 18o \text{ kV}$$

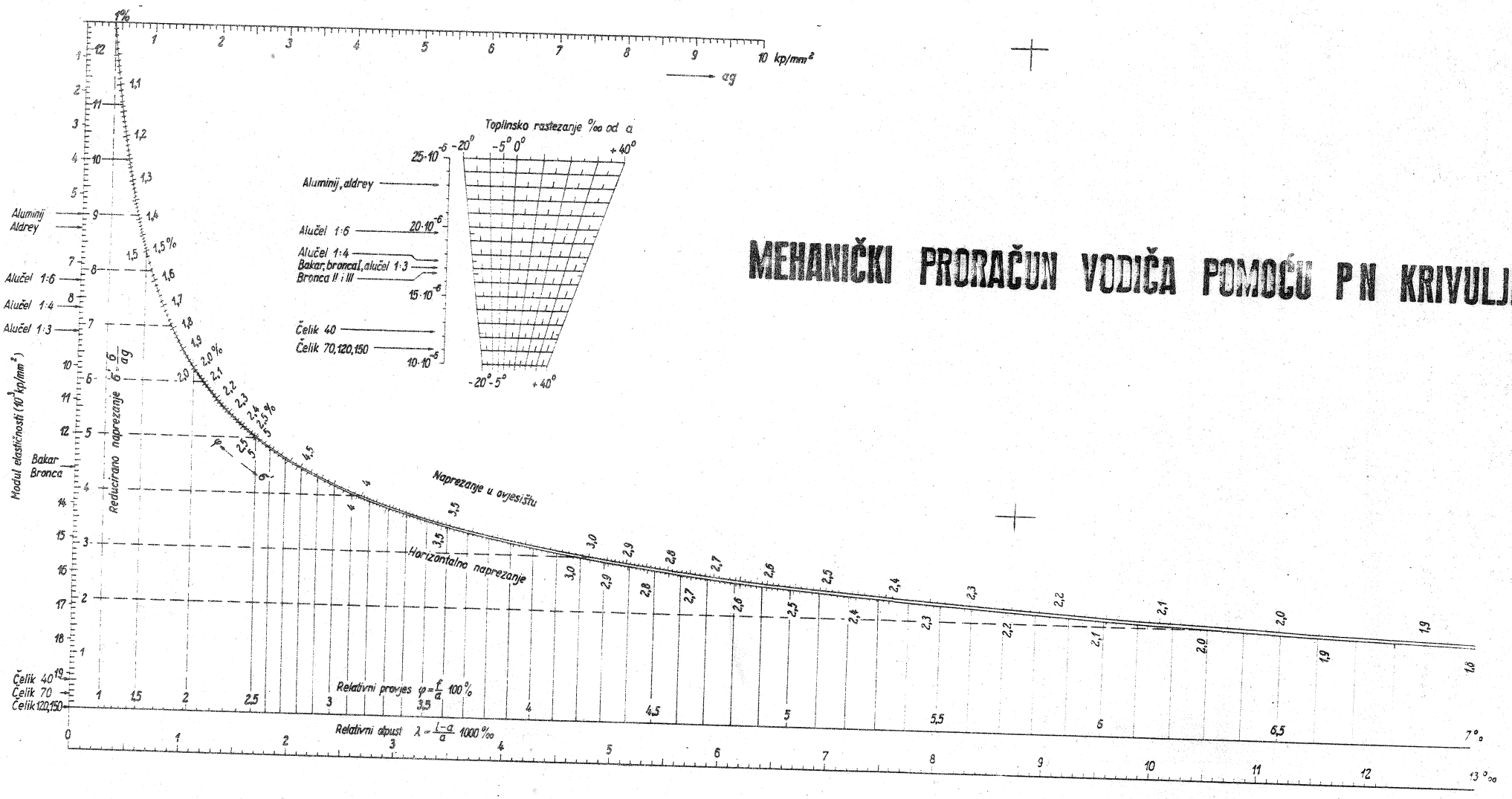
$$U = \frac{18o \cdot R}{145 + R} I_m + 18o \text{ kV}$$

Iznos prenapona za razne vrijednosti otpora uzemljenja i struje munje izračunate su i navedene u tablici VII.

Iznosi prenapona uslijed udarca munje u stup, kV

Tablica VII

Struja munje kA	Otpor uzemljenja, oma				
	10	20	30	40	50
3o	378	553	7o8	848	974
5o	5o9	8o1	1o6o	129o	15o5
8o	7o6	1175	159o	196o	229o

Uzevši u obzir da odabrani lanci mogu izdržati barem 9oo kV, a neki od njih i više, to slijedi da će ti lanci i u ovom pogledu dobro zadovoljiti. Ako računamo na pr. da otpor uzemljenja neće prekoračiti 2o oma, onda još niti struja munje od 5o kV nije opasna, a toliko se obično uzima za proračune.

MEHANIČKI PRORAČUN VODIČA POMOĆU P N KRIVULJE