

PRIJENOS I DISTRIBUCIJA ELEKTRIČNE ENERGIJE

**9. PRIJELAZNE POJAVE I PRENAPONI NA
ELEKTROENERGETSKIM VODOVIMA**

dr.sc. Vitomir Komen, dipl.ing.el.

9. PRVE UZNE PRAVKE I PRENARNI
NA EE VODOVIMA

9.1 TEHNIKA VISOKOG NAPONA

9.2 VRSTE PRENARNA

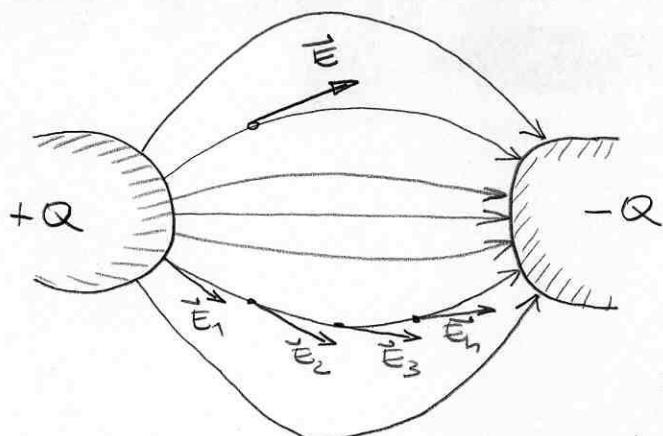
9.3 PUTNI USLOVI NA EE VODOVIMA

9.4 ZASTRIP OD PRENARNA

9.1 TEHNIKA VISOKOG NAPONA

- ELEMENTI TE SUSTAVA IZVEDENI SU TRDNO (RJEDEJEDNOSTNO) I DIMENZIONIRANI ZA:
 - NAPENSKA NAPREZANJA TE MREŽE ODREDENOG NARUNOG NAPONA U_m (kV)
 - ODREĐENI STRUJNI NAPREZANJA I_m (A), I_k (kA)
- DIMENZIONIRANE ELEMENTE TEKUĆE NAPENSKA NAPREZANJA TE MREŽE NARUNOG NAPONA U_m (kV) PRODUJI SE IZBORNIM I DIMENZIONIRANIM:
 - IZOLACIJE IZMEđU POZNIH VODIČA
 - IZOLACIJE POZNIH VODIČA PREMA ZEMLJI I UZEMLJENIM DISKLADIMA
- NAPENSKA NAPREZANJA U TE MREŽI U_m (kV) SU:
 - TRAJNI RJEĐENICI NAPON $U_p < U_m$ (kV), $f = 50\text{Hz}$
 - PRENDANI - NAPONI PO IZMOSU, YAKNOM OBILJE I FREKVENCIJI RAZLIČITI OD PREDNEKOG NAPONA
- UZ NAPENSKU DIMENZIONIRANU IZOLACIJU ELEMENTA TE MREŽE U_m (kV), U TE MREŽI SE PRODUJI I DODATNA ZAŠTITA OD PREMORA, UGRADNOM DODATNIM ZAŠTITnim UREĐAJOM OD PREMORA.
- TEHNIČKI VISOKOG NAPONA SE BAVI:
 - METODAMA PROPOĐANJA ELEKTRIČNOG POLJA U RAZLIČITIM STRUKTURAMA NAPENSKIH NAPREZANJA ELEMENTA
 - METODAMA EKSPERIMENTALNOG/LABORATORIJSKOG MERENJA ELEKTRIČNOG POLJA, DIELEKTRIČNIH KARAKTERISTIKA RAZLIČITIH IZOLACIJA, VN ISPODNOVANIMA ($N = 1$ = MOPOM) ELEMENTA
 - METODAMA ISPODNOVANIM I UVRADIVIMA DIELEKTRIČNIM KARAKTERISTICIMA RAZLIČITIH PROIZVODA IZ MATERIJALA I PROCESSA PRIZGOJA / PRESEKTA I SLIMAS
 - METODAMA PROPOĐANJA I UVRADIVANJA PREMORNA
 - METODAMA PROPOĐANJA PRIDELAZNIH RODAVA I PUTNIH VODA
 - RAZLOZENIM I METODAMA OSIBRO ZAŠTITNIH UREĐAJA ZA ZAŠTITU OD PREMORA
 - METODAMA DELOVITE ZAŠTITE OD PREMORA TE MREŽE I POSTROJENJA, TE METODAMA UVRADIVANA NOVIJE MOTNJKOVITOSTI.

ELEKTRIČNO PLODOVITSTVO



IZROCI EL. PLODOVITOSTI: EL. NABOJI
+Q, -Q

EL. PLODOVITOST: PRISTRENE U KJEM
DELUJUJU SILE SIVE

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q} [V/m]$$

SILNICE EL. PLODOVITOSTI: OBLIK EL. PLODOVITOSTI

GUSTOĆA SILNIČE EL. PLODOVITOSTI: JAKOST EL. PLODOVITOSTI

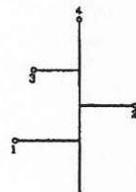
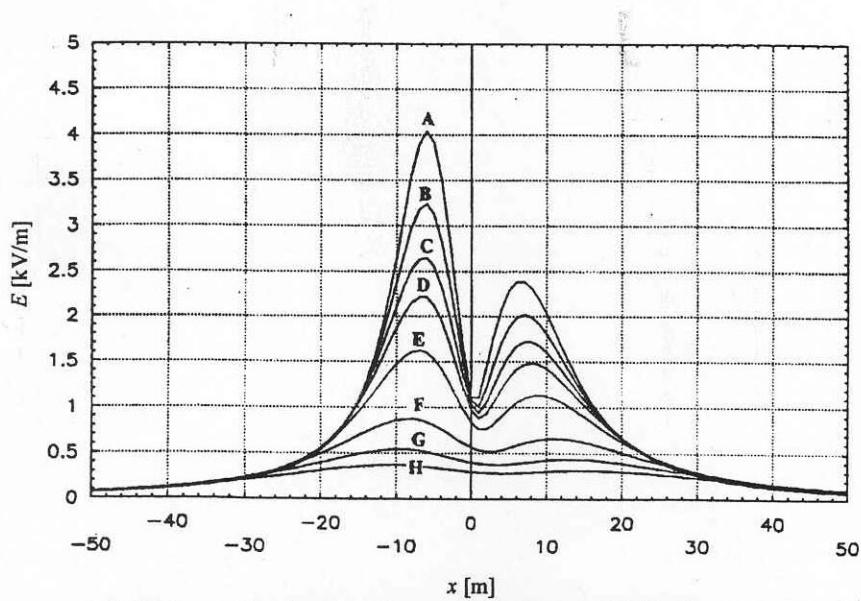
SILNICE EL. PLODOVITOSTI: OBOMITE NA TEKU POTENCIJSALNE PLOHE A. PLODOVITOSTI

PRIMARNI ELEKTRIČNIH PLODOVITOSTI:

- METODA KONSONNIH ELEMENTA (DIFERENCIJACIJA)
- METODA NADMOČNOG NABOJA
- GRAFIČKE METODE

MJERENJE ELEKTRIČNIH PLODOVITOSTI:

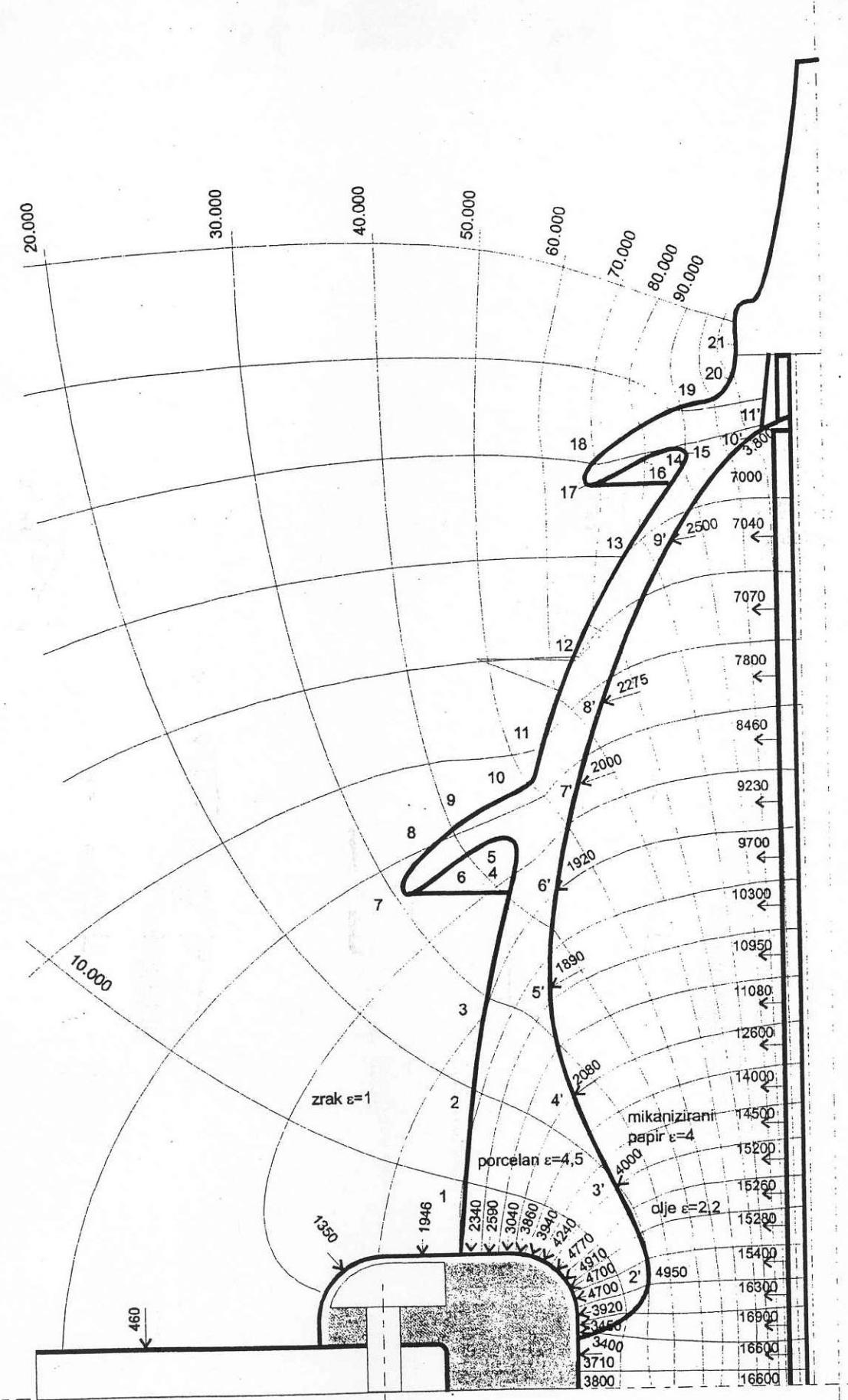
- KAPACITIVNE SONE
- KOMPENZACIJSKE METODE



Veličina spodnjega vodnika:

A	- varnostna višina (6,75 m)
B	- +1 m
C	- +2 m
D	- +3 m
E	- +5 m
F	- +10 m
G	- +15 m
H	- +20 m

SLIKA ELEKTRIČNOG PLODOVITOSTI ISPOD NADZEMNOG EE VODA



SLIKO EL. Podelj 120 LESTO RAZ

VRSTE DIELEKTRIKA (IZOLATORA)

1. PLINOVITI DIELEKTRICI

- a) UZDUH (ZRAK) - NADZEMNI VODNI, ZRAČNI TE PREDENI
- b) DRUGI PLINOVITI DIELEKTRICI - ZAUVRENI POD
PREDNIM VISOKIM I LIJKIM TLAČEM

2. KRUTI DIELEKTRICI

- a) ANORGANSKI - PERKUVAL, STAKLO, TINJOC
- b) ORGANSKI - GUMA, PAPIR, UMEŠNE MASE

3. TEČAJI DIELEKTRICI

- a) MINERALNO ULJE
- b) DEMGI TEČAJA DIELEKTRICA - SINTETIČKE IZOLATORSKE
TEČAJINE

9.2 VRSTE PRENAPONA

9.2.1 KLASIFIKACIJA PRENAPONA

NORMALNI POGON JE TREĆE NARAVNE NAPONE $U_m(kV)$
- TRADICIONALNE POGONSKE FREKVENTE

NARAVNI NAPONI / NOVIJI POGONSKI NAPONI (NOVIJI NAPONI OPREME)

	NARAVNI NAPON $U_m(kV)$	DODJELJENA DODSTUPANJA	NOVIJI POGONSKI NAPON $U_m(kV)$
NISKI NAPON $U_m < 1kV$	230 V 400 V	$\pm 10\%$ $\pm 10\%$	- -
SREDNJI NAPON $1kV < U_m < 10kV$	3 kV 6 kV 10 kV 20 kV 35 kV	$\pm 10\%$ $\pm 10\%$ $\pm 10\%$ $\pm 10\%$ $\pm 10\%$	3,6 kV 7,2 kV 12 kV 24 kV 38 kV
VISOKI NAPON $10kV \leq U_m < 245kV$	110 kV 220 kV		123 kV 245 kV
VELIČINSKI NAPON $U_m > 245kV$	400 kV		420 kV

VRSTE PRENAPONA

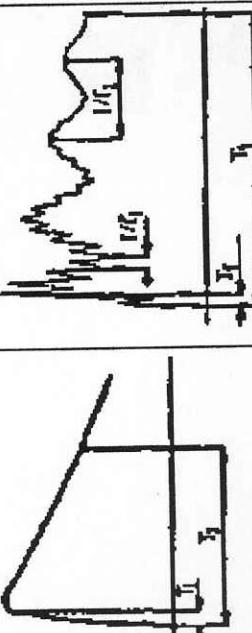
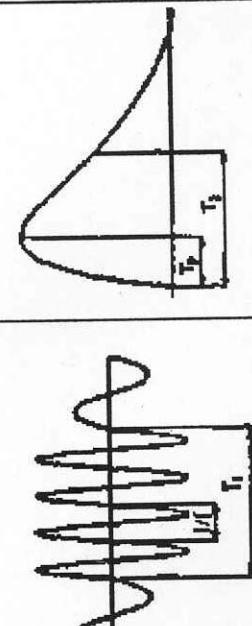
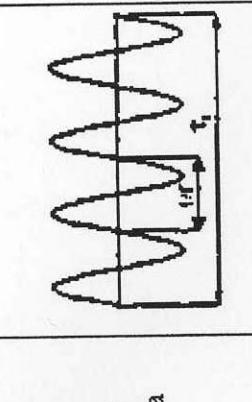
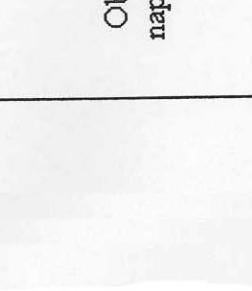
1. KLASIFIKACIJA PRENAPONA IEC
2. Povišenje napona
UNUTARNJI PRENAPONI,
VANJSKI PRENAPONI
3. ATMOSFERSKI PRENAPONI
SKLOPNI PRENAPONI,
DUGOGRADNI PRENAPONI

KLASIFIKACIJA PREMA IEC 71-1 /1/

Naponi i prenaponi klasificirani su prema njihovom obliku i trajanju, te su podijeljeni u sljedeće klase:

- **Trajni napon pogonske frekvencije:** ima konstantnu efektivnu vrijednost i trajno je priključen na stezaljke opreme.
- **Privremeni prenapon:** je prenapon pogonske frekvencije relativno dugog trajanja. Može biti neprigušen ili slabo prigušen. U nekim slučajevima njegova frekvencija može biti nekoliko puta manja ili veća od pogonske frekvencije.
- **Prijelazni prenapon:** ja kratkotrajni prenapon trajanja nekoliko milisekundi ili kraći, oscilatoran ili neosциlatoran, obično jako prigušen. Prijelazni prenaponi podijeljeni su na:
 - a) **Prenapone polaganog porasta čela:** To su prijelazni prenaponi obično jednog polariteta sa vremenom trajanja čela od $20 \mu s < T_p < 5000 \mu s$, i trajanjem hrpta od $T_2 < 20 ms$.
 - b) **Prenapone brzog porasta čela:** To su prijelazni prenaponi obično jednog polariteta sa vremenom trajanja čela od $0.1 \mu s < T_i < 20 \mu s$, i trajanjem hrpta od $T_2 < 300 \mu s$.
 - c) **Prenapone vrlo brzog porasta čela:** To su prijelazni prenaponi obično jednog polariteta sa vremenom trajanja čela od $T_f < 0.1 \mu s$, ukupnog trajanjem $< 3 ms$. Oni su obično superponirani oscilacijama frekvencija $30 kHz < f < 100 MHz$.
- **Kombinirani** (privremeni, polaganog porasta čela, brzog porasta čela, vrlo brzog porasta čela) **prenaponi** sastoje se od dvije ili više komponenti istovremeno, a opterećuju izolaciju opreme priključenu između zemlje i faze. Klasificiraju se prema komponenti više vršne vrijednosti.

Tabela 12-1. Vrste napona i ispitivanja

VRSTI NAPONA	NISKA FREKVENCija		POLAGANI (sklopni)	BRZI (atmosferski)	PRIJELAZNI	VRILO BRZI
	TRAJNI	PRIVREMENI				
Oblik napona						
Područje oblike napona	$f = 50 \text{ ili } 60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3600 \text{ s}$	$10 < f < 500 \text{ Hz}$ $3600 \geq T_t \geq 0.03 \text{ s}$	$5000 > T_p > 20 \mu\text{s}$ $20 \text{ ms} \geq T_2$	$20 > T_p > 0.1 \mu\text{s}$ $300 \text{ ms} \geq T_2$	$100 > T_f > 3 \text{ ns}$ $0.3 > f_1 > 100 \text{ MHz}$ $30 > f_2 > 300 \text{ kHz}$ $3 \text{ ms} \geq T_t$	
Standardni oblik napona	$f = 50 \text{ ili } 60 \text{ Hz}$ $T_t (*)$	$48 < f < 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	$T_t = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \mu\text{s}$	$T_1 = 1.2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$		
Standardno ispitivanje podnosištvi	(*)	Ispitivanje kratkotraјnim naponom 50 Hz	Ispitivanje sklopniim impulzom	Ispitivanje atmosferskim impulzom	(*)	(*)

9.2.2 KARAKTERISTIKE PRENAPONA

Osim pogonskog napona u nekoj mreži pojavljuju se i prenaponi koji mogu dostići zнатне iznose. Svaka vrsta prenapona napreže izolaciju na poseban način. Na slici su prikazani prenaponi prema iznosu i dužini trajanja. To su:

1. Najviši pogonski napon, izražen kao efektivna vrijednost odgovarajućeg naponskog nivoa.
2. Privremena povišenja napona.

Prijelazni prenaponi:

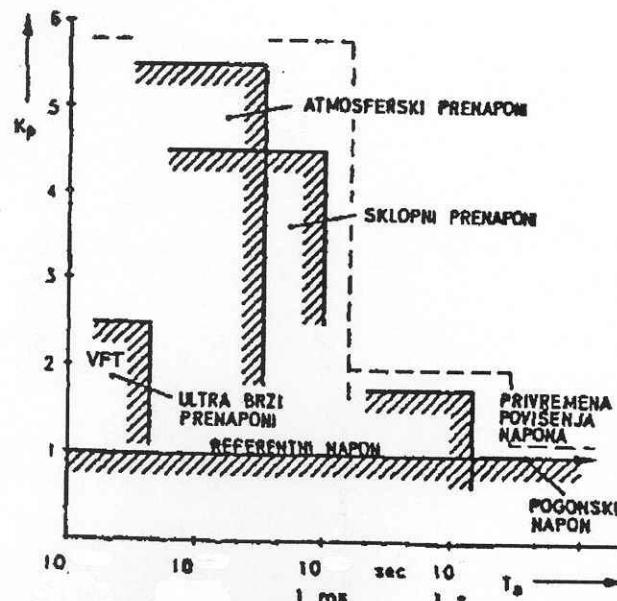
3. Polaganog porasta čela (sklopni prenaponi)
4. Brzog porasta čela (atmosferski prenaponi)
5. Vrlo brzi (VFT-very fast transients)

Sklopni, atmosferski i ultra brzi prenaponi imaju prijelazni karakter. Oni dostižu amplitudu poslije kratkog vremena, nakon čega se prigušuju i nestaju. Privremena prigušenja napona traju znatno dulje, a njihovo trajanje ima red veličine sekundi ili čak sati.

Na ordinati je dan faktor prenapona K_p , koji se iskazuje u odnosu na faznu vrijednost maksimalnog pogonskog napona, tj.:

$$K_p = \frac{U_{MAX}}{\sqrt{2} \frac{U}{\sqrt{3}}} = 1.225 \frac{U_{MAX}}{U}$$

gdje je: U_{MAX} amplituda prenapona,
 U efektivna vrijednost pogonskog napona (linijski napon).



Slika 91. Klasifikacija prenapona prema trajanju i faktoru prenapona

9.2.3 PRIVREMENI PRENAPONI

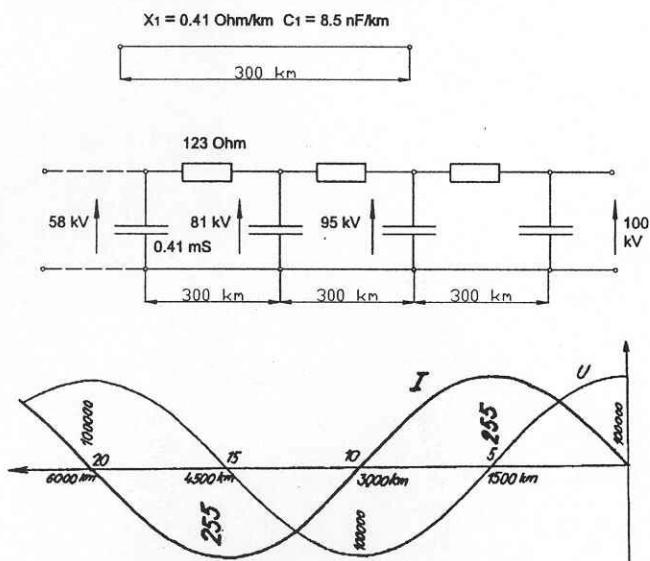
Privremeni (dugotrajni) prenaponi su oscilatori prenaponi relativno dugog trajanja na nekom mjestu, koji su neprigušeni ili samo slabo prigušeni, za razliku od sklopnih, atmosferskih i ultrabrzih prenapona, koji su obično jako prigušeni i kratko traju.

Prema nekim klasifikacijama u kategoriju privremenih prenapona ulaze oni prenaponi kod kojih povišenja napona traju dulje od pet perioda pogonskog napona. Trajanje prenapona je važno zato jer proboj izolacijskih plinova (ukujući i zrak), isto kao tekućina i krutih dijeljektrika zavisi o duljini trajanja naponskog opterećenja.

a) Ferrantijev efekt

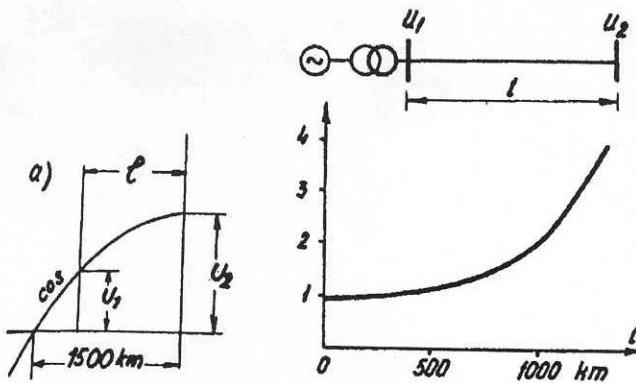
Ferrantijev efekt je pojava da neopterećeni vod ima viši napon na svom kraju nego li na početku. Ova se pojava prvenstveno manifestira na vodovima većih duljina, a to su dalekovodi najviših napona. Ona se može javiti ako zaštita iskopča oštećeni transformator, priključen na drugi vod, pa vod ostane neopterećen.

Pojavu ćemo objasniti na idealnom dugom vodu u praznom hodu slijedećim primjerom:
Zadan je vod sa svojim induktivitetom i kapacitetom kao na slici. Napon na kraju voda iznosi 100 kV. Uz korištenje nadomjesne π -sheme voda, pri čemu se svakih 300 km voda nadomešta jednom π -shemom, mogu se izračunati naponske i strujne prilike za vod proizvoljne duljine. Raspodjela efektivnih vrijednosti napona i struja duž voda prikazana je slikom. Treba reći da se radi o teoretskom slučaju voda vrlo velike duljine kakav ne postoji u praksi. Uočljivo je da se struja duž voda mijenja po krivulji koja odgovara sinusoidi, a napon prema kosinusoidi. Na mjestima gdje efektivna vrijednost napona poprima vrijednost nula, efektivna vrijednost struja poprima maksimalnu vrijednost i obrnuto. Maksimalna vrijednost napona je konstanta, a isto tako i amplituda struje je konstantna i iznosi 255 A. Na udaljenosti 6000 km od kraja voda napon i struja poprimaju istu vrijednost kao i na početku.



Slika 92. Raspodjela struje i napona duž voda (efektivne vrijednosti)

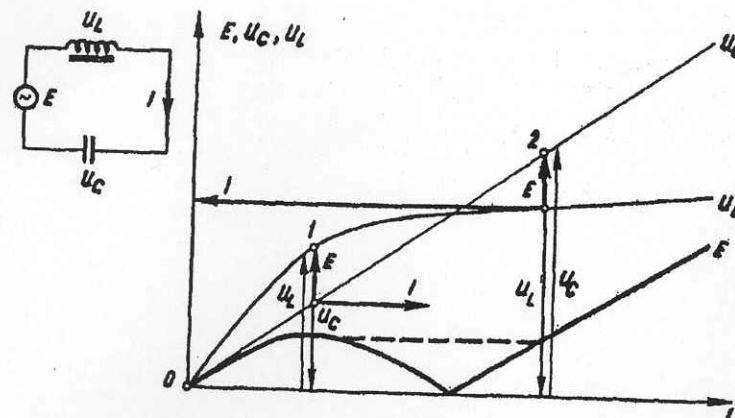
Ako se pokaže raspodjela napona duž voda za dužinu 1500 km od kraja, napon na desnom kraju krivulje prikazuje napon na kraju voda, a napon na bilo kojoj točki krivulje prikazuje napon na početku voda. Napon na kraju voda je uvijek viši od napona na početku i ova se pojava naziva Ferrantijev efekt. Kod manjih duljina vodova povišenje napona uslijed Ferrantijevog efekta nije od naročitog značenja: za vod duljine od 135 km iznosi tek 1%, za 271 km 4%, a za 1000 km čak 100%.



Slika 93. Povišenje napona uslijed Ferrantijevog efekta

b) Ferorezonancija

Ova se pojava može desiti u električnim krugovima koji sadrže kapacitet i nelinearni induktivitet. U praksi ferorezonanciju mogu izazvati kapaciteti vodova i nelinearni induktiviteti transformatora ili prigušnica. Objasnjenje ove pojave prikazano je na dijagramu. Napon na kapacitetu U_C je linearno proporcionalan struci, dok je promjena napona s povećanjem struje na nelinearnom induktivitetu uslovljena krivuljom magnetiziranja željeza. Naponi na kapacitetu i induktivitetu su protufazni, pa njihova razlika drži protutežu naponu izvora. Kod manjih struja u krugu je napon na induktivitetu veći od napona na kapacitetu, pa je struja induktivna, dok je kod većih struja obrnuta. Ukoliko se iz stanja označenog sa točkom 1. malo poveća napon izvora, tada se struja u krugu kao i naponi neće mijenjati kontinuirano, već dolazi do naglog prelaza u stanje označeno točkom 2. U stanju 2. je napon izvora isti kao u stanju 1., ali su struja I kao i naponi U_C i U_L znatno veći. Osim promjene iznosa struje mijenja se i njen fazni kut za 180° , tako da ona umjesto induktivnog poprima kapacitivni karakter. Ovakva nagla promjena stanja stvara prelazne pojave s njihanjem u strujnom krugu i tako dolazi do prenapona.



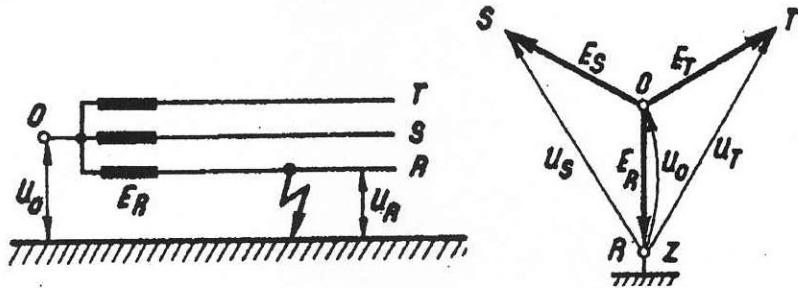
Slika 94. Objasnjenje ferorezonancije

c) Prenaponi uslijed kvarova

Zemljospoj

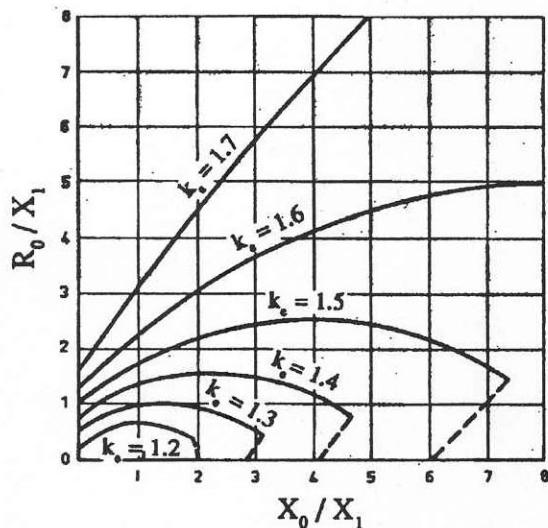
Ako u neuzemljenoj mreži ili u mreži uzemljenoj preko velikog otpora ili prigušnice dođe do spoja jedne faze sa zemljom, tada napon u ostale dvije zdrave faze poraste s fazne na linijsku vrijednost. Pri tome nul točka poprimi fazni napon prema zemlji. Ako se na mjestu zemljospaja uzme u obzir otpor,

onda je pomak napona nešto manji, pa je manje i povišenje napona. Uz čvrsti spoj sa zemljom javlja se stalna nesimetrija i povišenje napona zdravih faza prema zemlji. U slučaju intermetirajućeg zemljospoja kod kojeg u svakoj periodi dolazi do gašenja i ponovnog paljenja električnog luka javljaju se dodatni prenaponi.



Slika 95. Zemljospoj

Amplituda prenapona se dobiva množenjem $U_m / \sqrt{3}$ sa koeficijentom zemljospoja k_e , koji ovisi o načinu uzemljivanja nul točke. Sa slike 96. može se očitati vrijednost koeficijenta k_e u ovisnosti o omjeru reaktancija i otpora sistema za najnepovoljniji otpor zemljospoja. Ako su ti parametri nepoznati, prepostavlja se da k_e ima vrijednost 1.4 za kruto uzemljenu mrežu ili 1.73 za izoliranu mrežu ili mrežu uzemljenu preko rezonantne prigušnice.



R_o - nulti otpor sustava
 X_o - nulta reaktancija
 X_1 - direktna reaktancija

Slika 96. Ovisnost R_o/X_1 kao funkcija od X_o/X_1 za konstantne vrijednosti koeficijenta zemljospoja k_e

Trajanje prenapona ovisi o trajanju samog kvara i za učinkovito uzemljene VN sisteme iznosi između 1 i 3 sekunde. Za izoliranu mrežu ili mrežu uzemljenu preko rezonantne prigušnice, je trajanje zemljospoj važno jer može biti od nekoliko sekundi do nekoliko sati, ovisno o vrsti zaštite samog sistema.

Privremeni prenaponi uzrokovani ispadom tereta

Trajanje i iznosi privremenih prenapona uzrokovanih ispadom tereta su:

- kod umjerenog razvijenih sustava s relativno kratkim vodovima i jakom mrežom $k_{it}=1.05$ p.u.
 - kod slabe mreže s dugim vodovima (uz rezonanciju) $k_{it} \geq 1.05$ p.u
- Faktor k_{it} obično ne prelazi 1.2 p.u.

Trajanje privremenih prenapona u svezi je s regulacijom napona posredstvom regulacijskih sklopki energetskih transformatora i kreće se u području:

$$T_{TOV} \in [10s, 100s]$$

9.2.4 SKLOPNI PRENAPONI

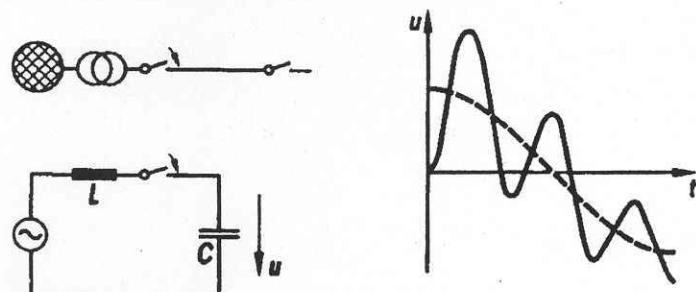
Svaki elektroenergetski sustav predstavlja ujedno i titrajni krug u kojem postoje induktiviteti, kapaciteti i otpornici. Sklopne operacije u takvom sustavu mogu izazvati prenapone.

Sklopni prenaponi uzrokovani su uklapanjem ili isklapanjem uređaja, gubitkom tereta nastankom ili uklanjanjem kvra. Vjerovatnost njihovog nastanka zavisi o broju kvarova i sklopnih operacija u sustvu. Visina sklopnih prenapona zavisi o postojećoj konfiguraciji električne mreže kao i snazi kratkog spoja, te o karakteristikama opreme. Općenito se može kazati da su u razvijenijem EES sklopni prenaponi manji.

a) Uklapanje neopterećenog dalekovoda

Uklapanje preko transformatora

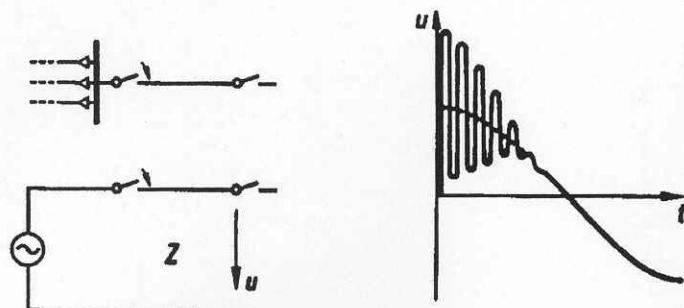
Ovaj slučaj karakterističan je za "slabe" mreže, koji se susreće u početnoj fazi izgradnje EES. U nadomjesnoj električnoj shemi transformator se može predstaviti nadomjesnim rasipnim induktivitetom, a neopterećeni vod kapacitetom. U ovom slučaju prelazna pojava će imati samo jednu frekvenciju oscilacija, koja će biti relativno niska. Ako se uklapanje desilo kod maksimalnog pogonskog napona prva amplituda može dostići dvostruku vrijednost amplitude pogonskog napona.



Slika 97. Prenaponi kod uklapanje preko transformatora

Uklapanje preko većeg broja dugih vodova ili kabela

Neopterećeni vod se uključuje preko sabirnice na koju je priključeno više nadzemnih vodova ili kabela. Njihova ukupna valna impedancija je vrlo mala u usporedbi s valnom impedancijom priključenog voda. Ako vod koji se uklapa nije dulji od već priključenih vodova, tada će prijelazna pojava imati samo jednu frekvenciju, koja će odgovarati prirodnoj frekvenciji voda. Napon na kraju voda dostići će dvostruku vrijednost napona na početku voda. Pri tome se vrijednost napona pogonske frekvencije gotovo uopće nije promjenila, a prigušenje prijelazne pojave ima u početku vrlo malo utjecaja na vrijednost amplitute.

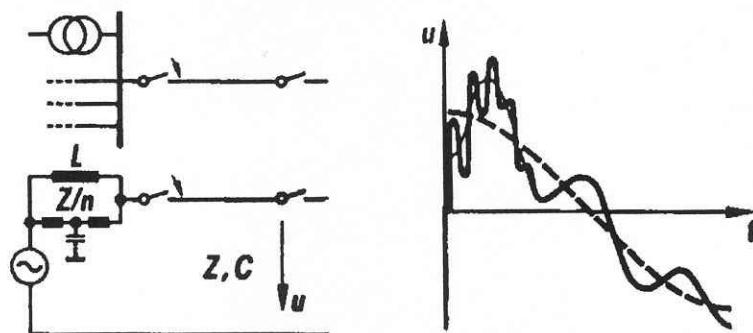


Slika 98. Prenaponi kod uklapanje preko većeg broja dugih vodova ili kabela

Uklapanje preko kompleksnog izvora

Ovaj slučaj karakterističan je za razvijene EES. Na prelaznu pojavu ne utječe samo induktivitet transformatora, već i valne impedancije već priključenih vodova. Prelazna pojava ima više frekvencija,

pri čemu se amplitude pojedinih frekvencijskih komponenti ne javljaju istovremeno. Obično se amplitude viših frekvencijskih komponenti prelazne pojave već prigušene kada se pojavljuju amplitude nižih frekvencijskih komponenti. Faktor prenapona na kraju u ovom slučaju je manji od 2.



Slika 99. Prenaponi kod uklapanje preko kompleksnog izvora

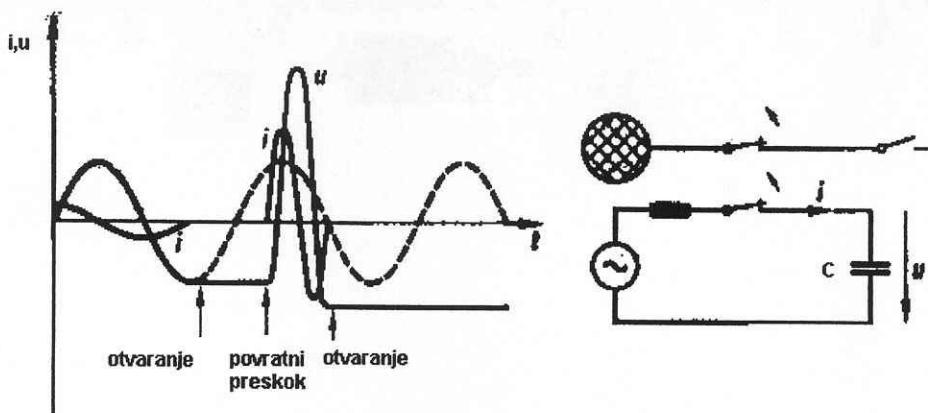
Osnovne karakteristike sklopnih prenapona su da se faktor prenapona smanjuje kako se povećava veličina EES-a, već zbog superpozicije oscilacija različitih frekvencijskih komponenti. Ako se na vodu koristi trofazno ponovno uklapanje nakon prolaznih kvarova, na zdravim fazama se nakon isklapanja može zadržati električni naboje. Kod ponovnog uklapanja na napon pogonske frekvencije prenaponi se superponiraju na preostali napon, što rezultira još višim prenaponima. Za sprečavanje visokih prenapona pri ponovnom uklapanju nekada se koriste prigušni otpornici, preko kojih se najprije ponovno uklapa vod da bi se nakon 10 ms uključila glavna komora prekidača. Preostali naboje na vodu, a time i visina prenapona kod ponovnog uklapanja mogu se smanjiti upotreboom induktivnih naponskih transformatora.

b) Isklapanje malih kapacitivnih struja

Kod isklapanja kondenzatorskih baterija, neopterećenih kabela ili nadzemnih vodova prekidač isklapa kapacitivnu struju pri prolasku kroz nulu. Kod toga vrijednost napona dostiže maksimalnu vrijednost, koji se zadržava na otvorenom vodu, kabelu ili kondenzatorskoj bateriji. U trofaznim sustavima, napon u fazi koja je prva isklopila može dostići vrijednost od 1.5 p.u., budući da struje koje teku u preostale dvije faze do njihova prekidača preko kapacitivnih veza povisuju napon. U jednofaznim sustavima ovaj napon ne može prijeći vrijednost od 1 p.u.

Nakon 10 ms od trenutka isklapanja napon na strani izvora dobiva vrijednost 1 p.u. suprotnog polariteta. Tako u trofaznim sustavima povratni napon na polovima prekidača može dostići vrijednost od 2.5 p.u. fazne vrijednosti pogonskog napona. Ako ovaj relativno visoki napon izazove proboj nakon više od 5 ms radi se o povratnom preskoku na polovima prekidača (engl. "restrike"). Proboj u kraćem vremenu od 5ms nakon isklapanja prekidača naziva se ponovo paljenje (engl. "reignition"). Povratni preskok može uzrokovati visoke prenapone. Kod modernih prekidača se dielektrična čvrstoča između kontakata prekidača uspostavlja tako brzo, da se onemogućava povratni preskok.

U praksi se obični povratni preskok dešava prije nego li povratni napon dostigne maksimalnu vrijednost, a visokofrekventna oscilatorna struja koja se pri tom javlja se ne prekida poslije prve poluperiodne visokofrekventne oscilacije, već poslije druge ili čak kasnije. Na slici 100. je prikazan slučaj povratnog preskoka, pri čemu se struja prekida u drugoj poluperiodi visokofrekventne oscilacije.



Slika 100. Prenaponi kod isklapanja malih kapacitivnih struja

Isklapanje malih induktivnih struja

Prekidači su dimenzionirani za brzo i sigurno prekidanje velikih induktivnih struja, bez absorbcije prevelikih energija u prekidnim komorama. Uslijed izraženog svojstva gašenja luka, do prekidanja malih induktivnih struja može doći prije njihovog prirodnog prolaska kroz nulu. Ovaj se slučaj dešava pri isklapanju transformatora ili prigušnica u praznom hodu, koji uzimaju struju magnetiziranja. Poslije prekidanja struje akumulirana magnetska energija na induktivitetu pretvara se u električnu energiju na kapacitetu transformatora. Kapacitet transformatora sastoji se od kapaciteta između namotaja i kapaciteta između namotaja i zemlje:

$$\frac{1}{2} Cu^2 = \frac{1}{2} Li^2$$

pa slijedi da je:

$$u = \sqrt{\frac{L}{C}} i.$$

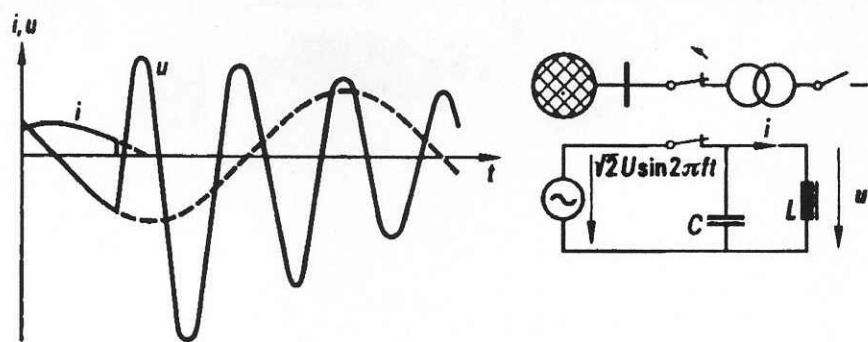
U trenutku prekidanja struja može biti manja ili jednaka vršnoj vrijednosti struje magnetiziranja I_μ . Ona zavisi o veličini induktiviteta L transformatora, o narinutom naponu U, te o frekvenciji f:

$$i \leq \sqrt{2} I_\mu = \frac{\sqrt{2} U}{2\pi f L}$$

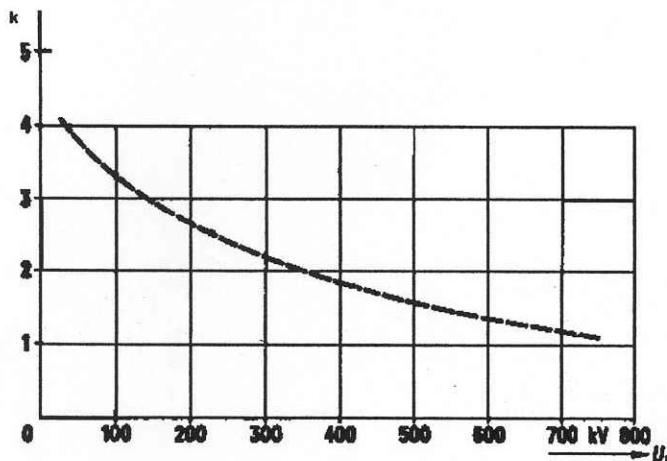
Vršna vrijednost prenapona U_m na induktivitetu koji se isklapa može se izračunati kao funkcija omjera rezonantne frekvencije kruga f_r i pogonske frekvencije f:

$$\frac{U_m}{\sqrt{2} U} \leq \frac{1}{2\pi f \sqrt{LC}} = \frac{f_r}{f}$$

Rezonantna frekvencija transformatora velikih nazivnih snaga i visokih napona su vrlo blizu pogonskim frekvencijama. Osim toga vršna vrijednost prenapona, koja bi se teoretski mogla javiti nakon prekida struje magnetiziranja ne pojavljuje se zbog prigušenja ili izobličenja u magnetskom krugu. Zato u visokonaponskim sustavima faktor prenapona obično ne prelazi vrijednost od 2 p.u. To međutim ne vrijedi za slučaj isklapanja paralelnih prigušnica, ili transformatora opterećenih prigušnicama, kod kojih se javljaju viši prenaponi, tako de je potrebna zaštita odvodnicima prenapona. I kod isklapanja malih induktivnih struja mogući su povratni preskoci na kontaktima prekidača.



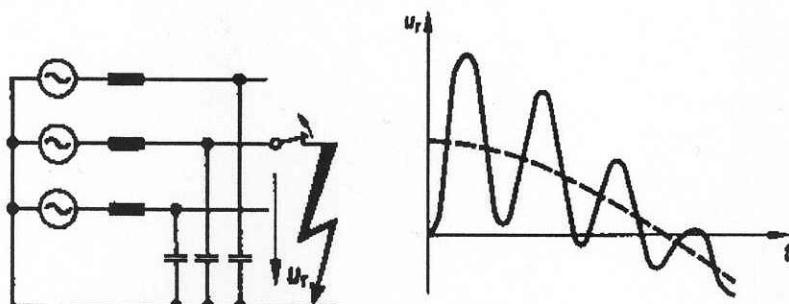
Slika 101. Prenaponi kod isklapanja malih induktivnih struja



Slika 102. Najviši faktori prenapona kod prekidanja struja magnetiziranja VN transformatora

d) Prenaponi kod isklapanja kvarova

Nastanak i isklapanje kvarova u EES-u uzrokuje prenapone. Prilikom isklapanja kvarova (kratkih spojeva) na kontaktima prekidača mogu se javiti opasni povratni naponi, zbog čega je isklapanje kvarova od posebnog interesa. Povratni napon kod isklapanja kratkog spoja mogu biti vrlo strmi i imati visoku frekvenciju. Povratni naponi na prekidaču razmotrit će se kod isklapanja jednopolnog kratkog spoja u krugu na slici 103.



Slika 103. Prenaponi kod isklapanja kvarova

Izvor daje napon:

$$e(t) = E \cos \omega_1 t$$

Prije otvaranja prekidača P je struja kratkog spoja u krugu:

$$i(t) = \frac{E}{\omega_1 L} \sin(\omega_1 t)$$

Struja kratkog spoja ima induktivni karakter, tj. $\omega_1 L \gg R$.

Poslije otvaranja kontakata prekidača vrijedi:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt = E \cos \omega_1 t$$

Za povratni napon na otvarenom prekidaču slijedi:

$$U_P = E \left[\cos \omega_1 t - \exp\left(-\frac{Rt}{2L}\right) \cos \omega_2 t \right]$$

Pri tome je ω_1 kružna pogonska frekvencija, ω_2 rezonantna frekvencija kruga:

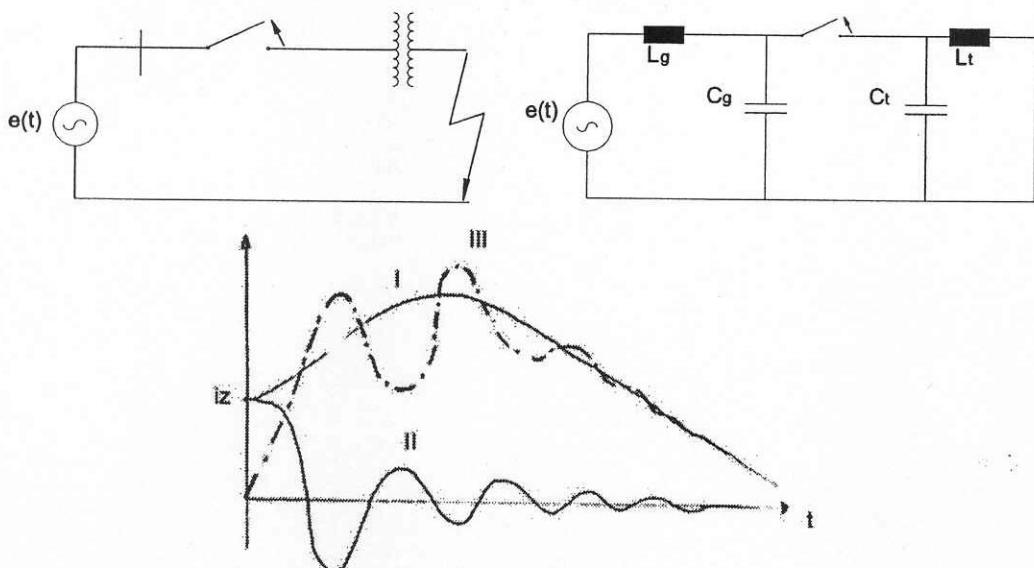
$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Povratni napon na prekidaču mogao bi dostići dvostruki iznos maksimalnog pogonskog napona, no radi postojanja prigušnog otpora u krugu ovaj je iznos nešto manji.

Povratni napon s dvije frekvencije

U slučaju da se nakon otvaranja prekidača formiraju dva odvojena kruga povratni napon na prekidaču će sadžavati dvije frekvencije. Na slici 104. je prikazan slučaj kada se otvara prekidač između generatora i transformatora, poslije nastanka kratkog spoja na vodu. Sa L_g i C_g označen je induktivitet i kapacitet sa generatorske strane, a sa L_t i C_t induktivitet i kapacitet sa transformatorske strane prekidača. Odgovarajuće frekvencije oscilacija su:

$$f_g = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_g C_g}} \quad \text{i} \quad f_t = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_t C_t}}$$



Slika 104. Nadomjesna shema kruga i naponi kod pojave povratnog napona s dvije frekvencije

Naponi u oba kruga, kao i povratni napon na prekidaču prikazani slikom 104. su:

- (I) Napon pogonske frekvencije na generatorskoj strani. Ovaj napon se od vrijednosti iZ (pri čemu je i struja kratkog spoja, a Z impedancija transformatora) podiže na vrijednost napona izvora.
- (II) Napon na transformatorskoj strani prekidača, koji od vrijednosti iZ pada na 0.
- (III) Povratni napon na prekidaču je razlika napona sa generatorske i transformatorske strane prekidača.

9.2.5 ATMOSFERSKI PRENAPONI

Atmosferski prenaponi koji se javljaju na nadzemni vodovima mogu nastati na različite načine. Munja može udariti u zemlju pokraj voda, pri čemu se prenaponi induciraju na vodičima. Najčešće grom udari u zaštitno uže nadzemnog voda ili u vrh stupa, nakon čega može doći do povratnog preskoka na fazni vodič. Najopasniji su direktni udari u fazni vodič, koji nastupaju veoma rijetko, ali su ipak mogući.

U numeričkim proračunima atmosferski prenapon se nadomješta sa strujnim ili naponskim izvorom, ovisno o udaljenosti mjesta udara groma od postrojenja.

S obzirom na udaljenost između mjesta udara i promatranog postrojenja mogu se razlikovati tri osnovna slučaja (slika 105.).

a) Slučaj bliskog udara s preskokom

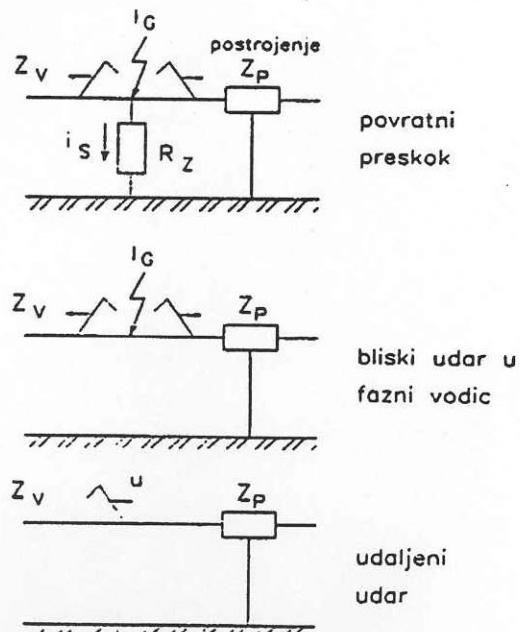
Ovaj slučaj nastaje pri udaru groma u zaštitno uže ili u stup dalekovoda uz preskok na fazni vodič, ili prilikom udara groma u fazni vodič uz preskok na stup dalekovoda. Na visinu prenapona veliki utjecaj pri tome ima iznos otpora uzemljenja stupa dalekovoda.

b) Slučaj bliskog udara u fazni vodič bez preskoka

Bliski udar modelira se strujnim izvorom. Ako je Z_g valni otpor kanala groma, Z_v valni otpor voda, onda pri tome vrijedi $Z_g \gg Z_v$. Valovi se šire na obje strane od mjesta udara, a napon vala dobije se kao produkt dijela struje groma i valnog otpora voda. Ovo je najkritičniji slučaj pri razmatranjima o prenaponskoj zaštiti.

c) Slučaj udaljenog mjesta udara

U ovom slučaju je atmosferski prenapon modeliran naponskim putnim valom koji putuje nadzemnim vodom (i kabelom) prije ulaska u postrojenje. Tjemena vrijednost vala određena je izolacionim nivoom nadzemnog voda. Prilikom prolaska vala duž nadzemnog voda produžuje se čelo vala. Približno se može uzeti da ovo produljenje iznosi $1 \mu\text{s}$ na svaki km duljine voda. Izobličenje i prigušenje upadnog vala naročito je izraženo u električnom kabelu.



Slika 105. Vrste udara u postrojenje

U proračunima se može promatrati bliski udar kao ekstremni slučaj, iako razmjerno rijetko nastupa, jer postavlja znatno veće zahtjeve na pogonsku opremu nego npr. udaljeni udar.

Mehanizmi nastanka groma

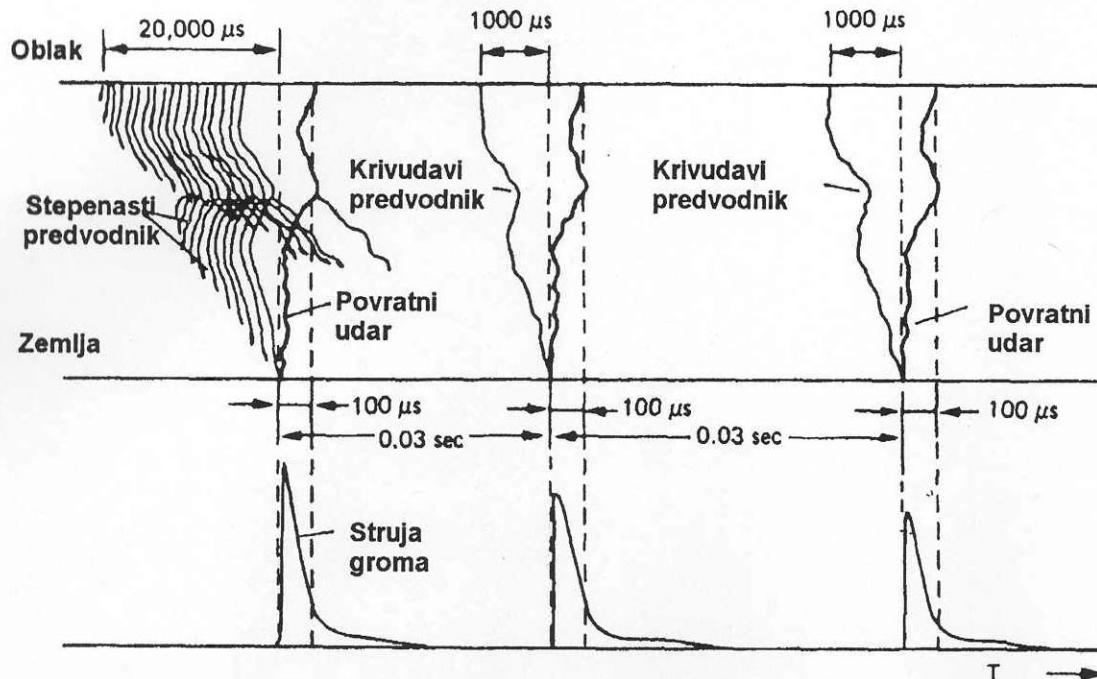
Fizički fenomeni vezani uz gromove su oduvijek opažani, ali smo ih počeli razumijevati tekar nedavno. Još je Franklin eksperimentirao sa munjama 1744-1750, ali je glavnina znanja skupljena u zadnjih 50 godina. Potreba za intezivnijim proučavanjem se javila kada je trebalo zaštiti dalekovode od udara groma. Metode obuhvaćaju mjerjenja struje groma, magnetskih polja, napona i upotrebu vrlo brzih fotografskih tehnika (rotirajućih kamera).

Fundamentalno gledano, munja je zapravo vrlo duga električna iskra. Postoji nekoliko teorija o načinu akumuliranja naboja u oblacima, ali će se ovdje više govoriti o procesu izbijanja.

U grmljavinskom oblaku veće čestice su obično negativne, dok su manje pozitivne. Zbog toga je donji dio oblaka uglavnom negativno nabijen, a gornji dio pozitivan. Gledano u cijelosti oblak je neutralan. Također može postojati više mjesta unutar oblaka koja sadrže naboje. Tipično negativna središta naboja mogu biti bilo gdje između 500 m i 10,000 m iznad zemlje. Izbijanja prema zemlji uglavnom počinju na rubovima negativnih središta naboja.

Naše oko zapaža munju kao jedno jedinstveno izbijanje, iako se povremeno zapažaju i grane različitog intenzitata, koje završavaju u atmosferi, dok se svjetli glavni kanal proteže u cik-cak liniji prema zemlji. Vrlo brze fotografске tehnike otkrivaju da je najveći broj udara praćen uzastopnim udarima, koji putuju po vodljivoj stazi koju je uspostavio prvi udar. Uzastopni udari se uglavnom ne granaju i njihova staza je sjajno osvjetljena.

Faze razvoja munje između oblaka i zemlje su shematski prikazane na slici 105., zajedno sa strujama prema zamlji. Udar započinje u području središta negativnog naboja gdje vrijednost polja poprima vrijednost polja potrebnog za ionizaciju ($\approx 30\text{ kV/cm}$ u zraku, $\approx 10\text{ kV/cm}$ ako su prisutne kapljice vode).

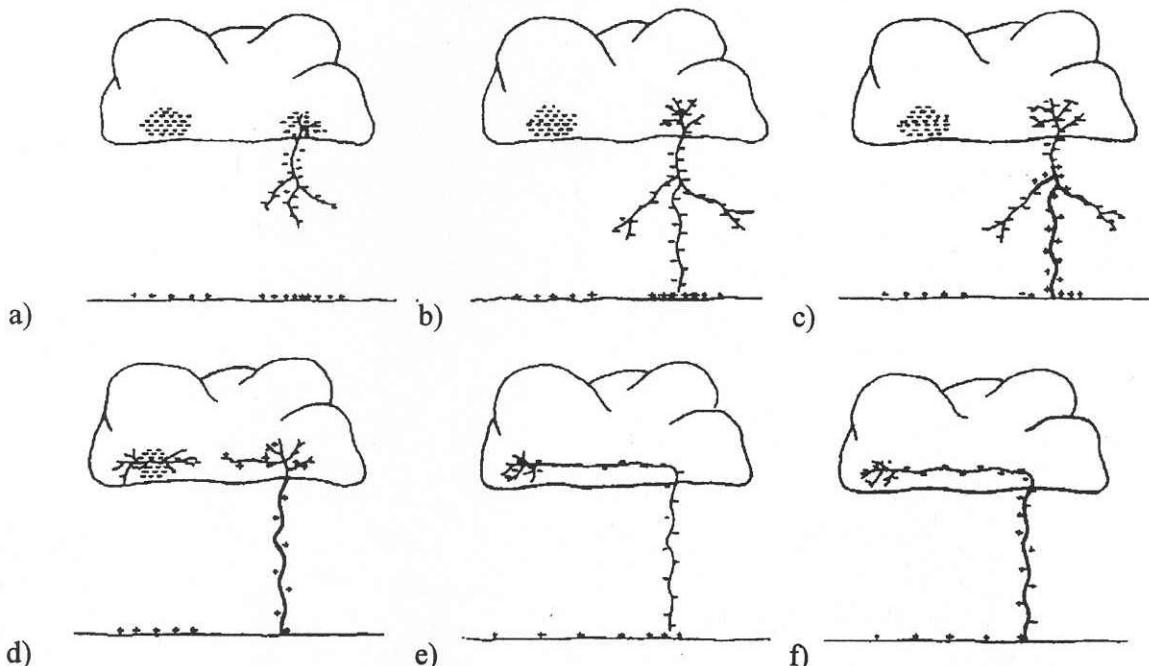


Slika 106. Faze razvoja munje i struje groma

Tokom prve faze "stepenasti predvodnik" naboja se brzo pomiče prema dolje u koracima od 50 m do 100 m, i miruje nakon svakog koraka nekoliko desetinki mikrosekundi. Ovisno o tipu izbijanja predvodnici izbijanja tzv. "grane" niskog sjaja i struja od nekoliko A se širi u još neprobijeni i malo ionizirani zrak brzinom od 1×10^5 m/s. Ova izbijanja su zatim praćena sa "stepenastim predvodnikom" s brzinom od 5×10^5 m/s i strujom od nekoliko 100 A. Vodljivom kanalu treba 60 ms da prevodi put do zemlje od oblaka udaljenog 3 km. Kako se "glava" groma primiče zemlji, razlika potencijala inducira naboje na površini zemlje.

Naboj se povećava izbijanjima s objekata na zemlji kao npr. visokih zgrada, drveća, itd. Nakon nekog vremena je koncentracija naboja na nekom objektu na zemlji dovoljno velika da prouzroči pozitivno uzlazno izbijanje. U trenutku kada se ta dva predvodnika spoje, počinje glavno pražnjenje. Uzastopna pražnjenja od zemlje prema oblaku putuju mnogo brže ($\sim 50 \times 10^6$ m/s) po već prije uspostavljenom ioniziranom kanalu. Struje povratnog udara su reda nekoliko kA do 250 kA i temperature unutar kanala su $15,000^\circ\text{C}$ do $20,000^\circ\text{C}$ i uzrok su destruktivnih učinaka groma, svjetlosti i eksplozivne ekspanzije zraka koja se manifestira kao zvuk. Povratni udari zapravo imaju destruktivne učinke koje inače pripisuјemo munjama.

Povratni udar je praćen sa nekoliko udara u vremenskom intervalu od 10 do 300 ms. Predvodnik drugog i ostalih uzastopnih udara zbog svoje krivudave putanje se naziva "krivudavi predvodnik". Krivudavi predvodnik ima putanju po ioniziranom kanalu prvog stepenastog predvodnika ali sa 10 puta većom brzinom. Njegova putanja najčešće nije razgranata i vrlo je svijetla.



Slika 107. Shematski prikaz faza razvoja groma od oblaka prema zemlji

Slika 107. daje prikaz različitih faza razvoja groma od oblaka prema zemlji. U oblaku može postojati više središta s velikom koncentracijom naboja. Na slici su prikazana samo dva. Na slići a) je prikazan nastanak stepenastog predvodnika koji se zajedno sa predvodnicima izbijanja širi prema tlu, te smanjuje koncentraciju negativnog naboja u oblaku. U ovoma trenutku mjesto udara je još neodređeno. Na sl. b) predvodnici izbijanja su pred samim kontaktom sa pozitivnim uzlaznim izbijanjem; c) Udar je završen, jak povratni udar se vraća prema oblaku i negativni naboj se počinje izbijati; d) Prvo središte se potpuno izbilo i predvodnik se počinje razvijati iz drugog središta naboja; e) Drugo središte naboja se prazni preko prvog središta i krivudavog predvodnika, negativni naboj se razmješta duž kanala. Počinju pozitivna uzlazna izbijanja koja će se spojiti sa krivudavim predvodnikom; f) dolazi do kontakta sa uzlaznim izbijanjima sa zemlje, jaki povratni udar putuje prema gore i izbija negativno nabijen prostor ispod oblaka i drugog središta naboja u oblaku.

Udari groma između oblaka i zemlje čine samo 10 % svih gromova. Većina pražnjenja tokom oluje se dešava između oblaka.

Energija groma

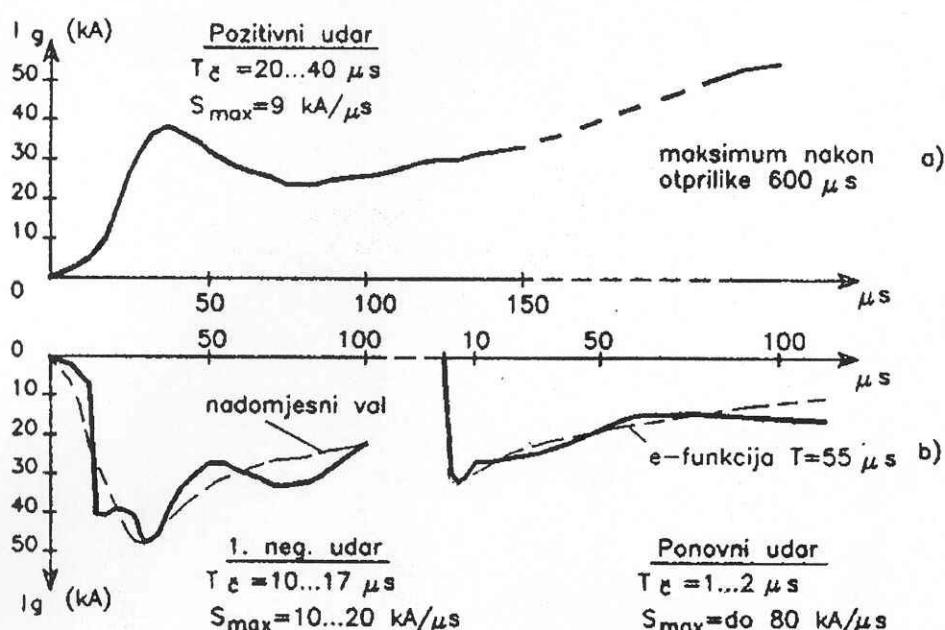
Kako bi smo procijenili energiju tipičnog pražnjenja kod udara groma, prepostavimo potencijalnu razliku od 10^7 V za proboj između oblaka i zemlje i ukupni naboj od 20 C. Tada je disipirana

energija 10×10^7 Ws ili otprilike 27,8 kWh u jednom ili više udara koji čine pražnjenje. Disipirana energija u zračnom kanalu se troši na nekoliko procesa. Male količine energije se troši na ionizaciju molekula, pobuđivanje molekula, radijaciju, itd. Najveći dio energije se troši na naglo širenje zračnog kanala, a dio uzrokuje zagrijavanje pogodjenih objekata na zemlji. Energija oslobođena tijekom pražnjenja odgovara onoj potrošenoj za stvaranje naboja unutar oblaka.

Parametri struje groma

Pri razmatranju naprezanja električne opreme, jedan od bitnih faktora je poznавање amplitude struje groma i njezine strmine.

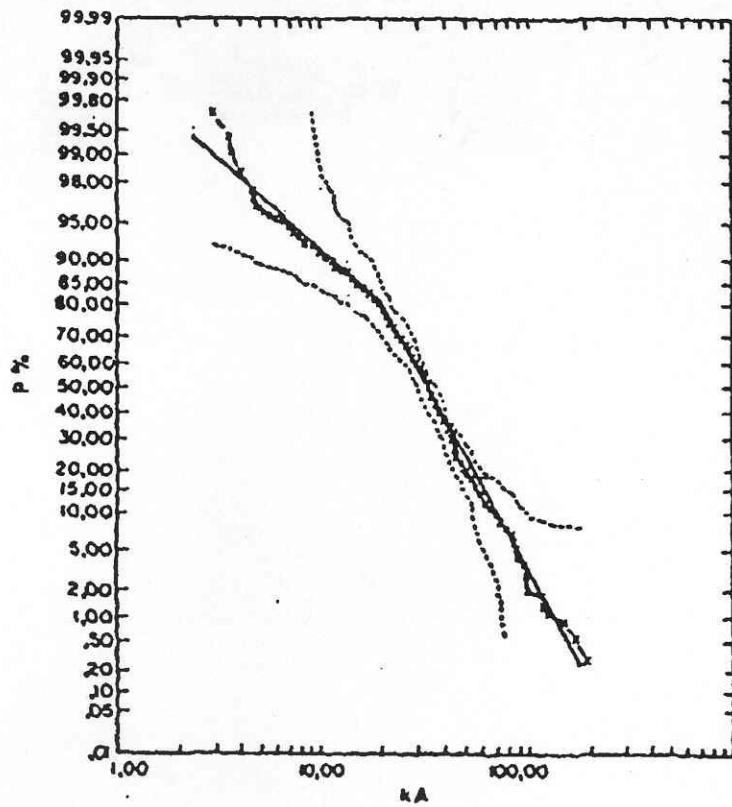
Na osnovu mjerena Berger je dao oscilograme tipičnih struja groma. Najčešća su pražnjenja negativnog polariteta. Njihov prvi udar dostiže maksimum u vremenu između 10 i 20 μs (slika 108.b). Najčešće strmine struje pri tome su između 10 i 20 $kA/\mu s$. Nakon prvog negativnog udara može u vremenu između 10 i 100 ms uslijediti ponovni udar. Ovaj je obično većih strmina, a maksimum se postiže nakon 1-2 μs . Najčešće strmine dostižu vrijednost od $80 kA/\mu s$.



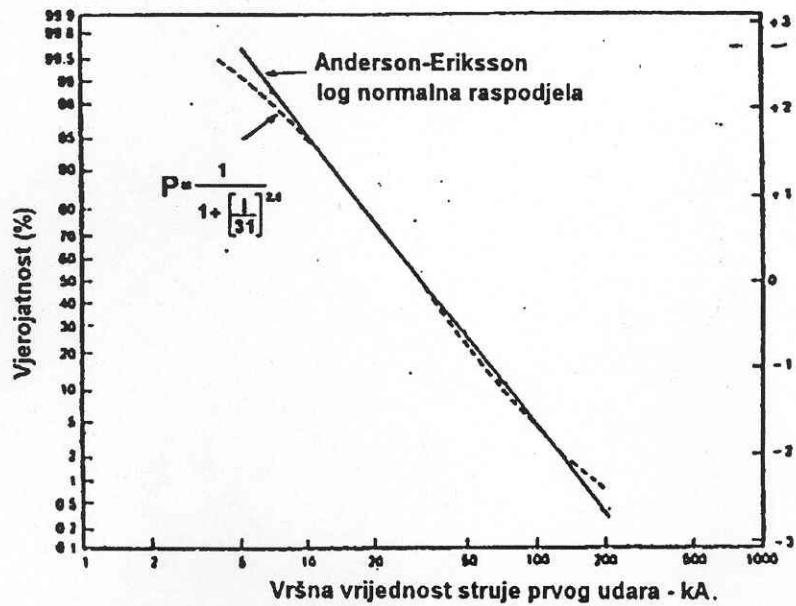
Slika 108. Oscilogram tipičnih struja groma

Pražnjenja pozitivnog polariteta su rijetka (slika 108.a). Struje pozitivnog polariteta imaju trajanje čela 20 do 40 μs , a strmine su im oko $9 kA/\mu s$.

Vjerojatnost učestalosti amplituda struja groma statistički su procjenjenje na osnovi velikog broja mjerena na različitim lokacijama u svijetu i mogu se naći u literaturi. Dvije tipične raspodjele za struje negativnog polariteta prikazane su slikom 109.



a)

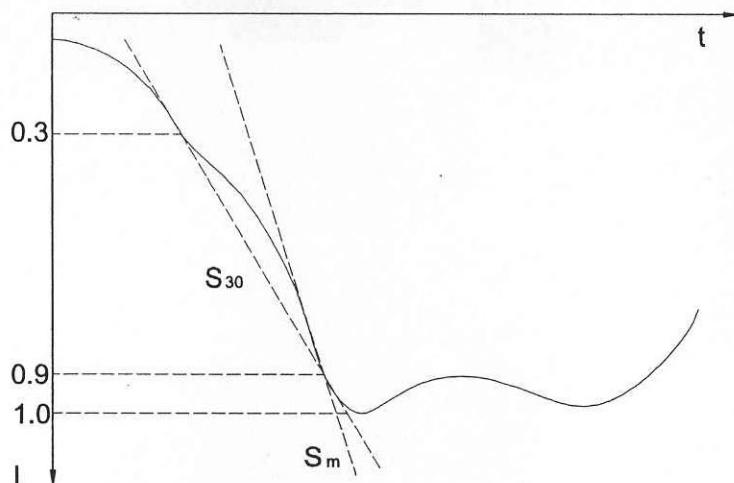


b)

Slika 109. Kumulativna vjerojatnost distribucije struje groma negativnog polariteta prema različitim raspodjelama

Strmne struje groma

Prema rezultatima velikog broja mjeranja svaki udar groma sastoji se od niza uzastopnih pražnjenja koja slijede u kratkim vremenskim razmacima, te razlikujemo prvi udar i uzastopne udare. Prvi udar ima obično veću amplitudu i manju strminu struje. Pokazalo se da u više od 50 % slučajeva broj uzastopnih udara ne prelazi statističkih 2.3 po gromu.



Slika 110. Izgled čela struje groma i strmine vala

Odnos između strmine S i amplitude struje groma I može se dati općom jednadžbom:

$$S = a \cdot I^b$$

Faktori a i b su dani u tablici 12-2. za strmine definirane na slici 110. kao S_{30} i S_m .

Tablica 12-2. Iznosi faktora a i b kod prvog i uzastopnog udara groma

	Strmina	Faktor a	Faktor b
Prvi udar	S_{30}	3.2	0.25
	S_m	3.9	0.55
Uzastopni udar	S_{30}	6.9	0.42
	S_m	3.8	0.93

Gustoća udara groma

Ugroženost neke lokacije od udara groma definirana je brojem udara po jedinici površine tijekom perioda od jedne godine, odnosno gustoćom udara groma. Ova veličina najpouzdanije se može utvrditi uz pomoć korištenja brojača gromova.

U nedostatku mjerenih vrijednosti, srednja gustoća udara groma uz rasipanje 95% može se procijeniti empirijskom relacijom koja je predložena nakon statističke obrade velikog broja podataka dobivenih nizom mjerena na raznim lokacijama u svijetu:

$$N_g = 0.04 * T_d^{1.35} [\text{km}^{-2}\text{god}^{-1}]$$

pri čemu je T_d prosječni broj grmljavinskih dana u godini (keraunički nivo), koji za područje Zagreba iznosi:

$$T_d = 35$$

Podatak o prosječnom broju grmljavinskih dana u godini može varirati na lokalnim područjima, a naročito je zavisan o nadmorskoj visini.

Uz pretpostavku $T_d = 35$ slijedi srednja gustoća udara groma:

$$N_g = 3.4 \cong 4 [\text{km}^{-2}\text{god}^{-1}]$$

Na osnovu ove veličine moguće je procijeniti učestalost udara groma u elemente EES-a.

Broj udara groma u dalekovode

Budući da su postrojenja redovito dobro zaštićena od direktnog udara groma u fazne vodiče, broj prenaponskih valova koji ulaze u postrojenje i mogu ugroziti izolaciju može se procijeniti na temelju zbroja udara gromova u priključene dalekovode.

Broj udara groma u pojedini dalekovod računa se iz empirijske relacije predložene od strane radne grupe IEEE :

$$N_L = N_g * \left(w + 4 * h_z^{1.09} \right) * 10^{-3} [\text{km}^{-1}\text{god}^{-1}]$$

pri čemu je:

- w prosječni razmak između zaštitnih vodiča u [m];
h_z prosječna visina zaštitnog užeta iznad tla u [m], koja se dobije kao razlika prosječne visine te zavješanja na stupovima i 2/3 provjesa, tj.:

$$h_z = H_z - \frac{2}{3} f$$

Može se zapaziti da u gornjem izrazu broj udara groma u pojedini dalekovod N_L u prvom redu zavisi o prosječnoj visini vodiča iznad zemlje h_z, a važan je i podatak o srednjoj gustoći udara groma.

Struje groma kojima je fazni vodič direktno izložen

Struje groma najvećih amplituda mogu pogoditi zaštitno uže dalekovoda, koje štiti fazne vodiče. Međutim ova zaštita nije nikad potpuna, tako da grom svejedno može pogoditi u fazni vodič. Amplituda struje groma koja može udariti u fazni vodič zavisi o geometrijskim dimenzijama dalekovodnog stupa, što se može odrediti iz postupaka prema elektrogeometrijskom modelu. Postupak izračuna najveće, odnosno kritične struje groma koje mogu direktno pogoditi fazni vodič proveden je na temelju elektrogeometrijskog modela. U nastavku je ukratko opisan elektrogeometrijski model gromobranske zaštite.

Udar groma negativnog polariteta razvija se kroz nekoliko faza. Predvodnik groma približava se zemljji ioniziranim kanalom slučajnog, stepenastog (cik-cak) oblika, na koji objekti na zemlji nemaju utjecaja. Kako se vrh predvodnika približava zemljji, na površini naglo raste jakost električnog polja i u jednom trenutku dolazi do uzlaznog izbijanja koje se spaja s predvodnikom i tako nastaje glavno izbijanje ili povratni preskok. Udaljenost r_p na kojoj nastaje proboj između kanala groma i bilo koje najbliže točke na nekom objektu nazivamo posljednji probogni razmak.

Električno polje duž posljednjeg probognog razmaka definirano je nabojem Q predvodnika, tj. vrijedi relacija r_p=f(Q).

Prvi povratni preskok neutralizirat će naboј Q, dakle njegova se amplituda može definirati kao I=f(Q). Iz navedenog slijedi da je posljednji probogni razmak funkcija struje povratnog preskoka. Ovaj odnos je razmjerno složen i do sada je predloženo više relacija koje ga definiraju, a i dalje se radi na njihovom preciznijem iznalaženju.

Neke do sada korištenih relacija dane su u:

$$r_p = 2 \cdot I + 30 \cdot \left(I - e^{\frac{I}{6.8}} \right)$$

$$r_p = 10 \cdot I^{0.65}$$

$$r_p = 9.4 \cdot I^{\frac{2}{3}}$$

$$r_p = 3.3 \cdot I^{0.78}$$

U svim navedenim relacijama za određivanje posljednjeg probajnog razmaka struje se uvrštavaju u (kA), a vrijednost posljednjeg probajnog razmaka r_p je u m.

U dalnjem postupku koristiti relacija objavljena od strane IEEE:

$$r_p = 8 \cdot I^{0.65}$$

Posljednji probajni razmak koristi se za konstrukciju krivulje zaštićenog prostora. Kako je ovo geometrijska veličina koja je funkcija električne veličine, model je nazvan elektrogeometrijski. Posljednji probajni razmak je statistička veličina i gore navedena jednadžba predstavlja njegovu srednju vrijednost. Kako bi se izbjegli udari groma u štićeni objekt čija struja I ima posljednji probajni razmak manji od r_p , gromobransku zaštitu treba dimenzionirati za vrijednost posljednjeg probajnog razmaka koja je 2σ manja od srednje vrijednosti. Za $\sigma = 5\%$ slijedi:

$$r_p = 7.2 \cdot I^{0.65}$$

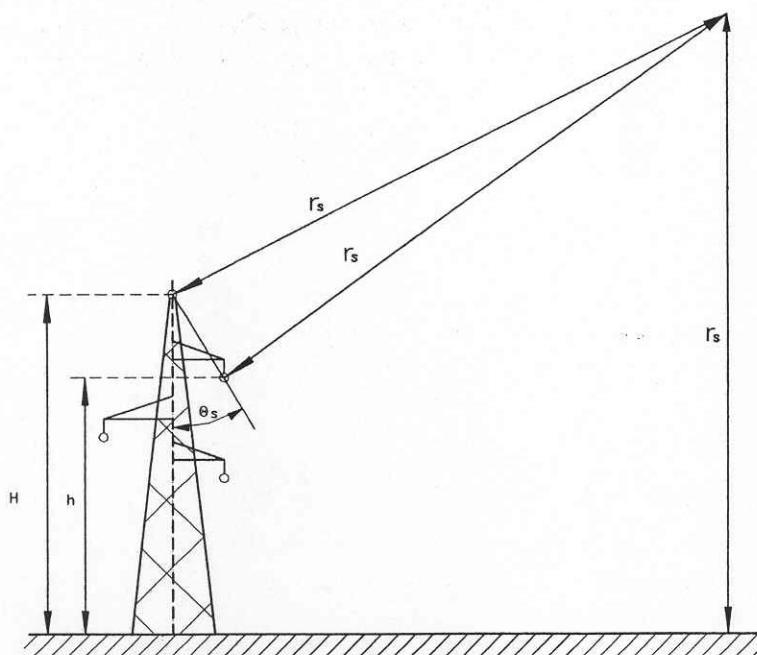
Budući da je posljednji probajni razmak geometrijska veličina, može se izraziti i kao funkcija dimenzija glave stupa, tj.:

$$r_p \cong \frac{H + h}{2(1 - \sin \theta_s)} \quad \text{za } (H - h < r/2)$$

Značenje pojedinih veličina iz gornjeg izraza vidljivo je sa slike 111.

Dalekovod je efikasno zaštićen zaštitnim užetima dalekovoda od direktnog udara groma amplitude struje I_K koja je jednaka ili veća od:

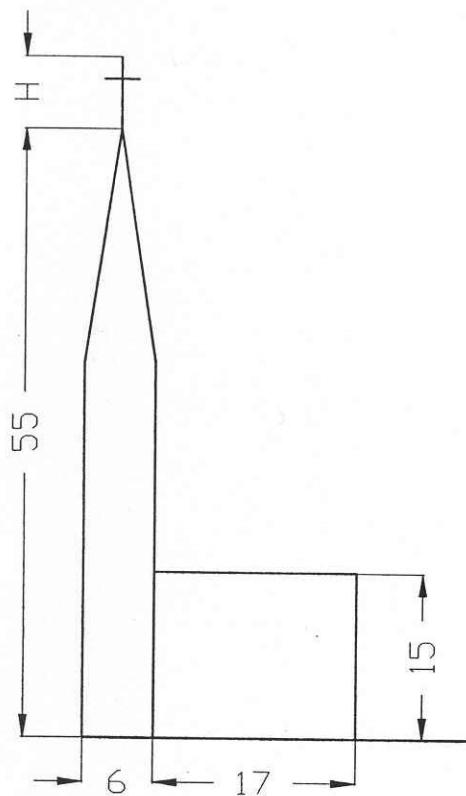
$$I_K = \sqrt[0.65]{\frac{r_p}{7.2}} \quad \text{kA}$$



Slika 111. Određivanje posljednjeg probajnog razmaka.

- Primjer 21:

Kolika treba biti visina križa H, ako pretpostavimo da nam on služi kao hvataljka groma. Izračunati broj udara groma po četvornom kilometru, ako pretpostavimo da se crkva nalazi u području s $N_i=35$ i $\alpha=42^\circ$ sjeverne zemljopisne širine.



Slika 112. Dimenzije crkve u metrima

9.2.6 VRLO BRZI PRENAPONI

Vrlo brzi prenaponi karakteristični su za visokonaponska metalom oklopljena, plinom SF_6 izolirana rasklopna postrojenja ili engleski Gas Insulated Switchgear (GIS), koja su u proteklih više od tri desetljeća našla veliku primjenu. Razvoj ove tehnologije započeo je s postrojenjima nazivnog napona reda 123 kV, a danas u svijetu rade postrojenja svih naponskih nivoa do 800 kV. Njihova je prednost ta što zauzimaju malo prostora, imaju dobra izolaciona svojstva, te su prilagodljiva okolini. Nečistoće u plinu ili defekti u unutrašnjosti postrojenja dovode do izobličenja i porasta gradijenta električnog polja. To može dovesti do proboga unutar postrojenja. Zato se u proizvodnji i montaži oklopljenih postrojenja zahtjeva velika čistoća.

Ova je tehnologija uslovila pojavu vrlo brzih prenaponi za što je engleski naziv Very Fast Transient Overvoltages (VFTO). Taj je problem intenzivno izučavan, a istraživanja su pokazala da su prenaponi uzrokovani različitim poremećajima koji nastaju unutar postrojenja poput:

- a) proboga u postrojenju, između vodiča i oklopa ili između susjednih faza,
- b) sklopne operacije s rastavljačima, prekidačima ili zemljospojnicima.

Navedeni poremećaji izazivaju visokofrekvencijske prijelazne pojave. Uslijed velike izolacione čvrstoće plina SF_6 i malih razmaka dijelova pod naponom čelo naponskog vala koje nastaje pri proboru u plinu ima vrlo veliku strminu, između 5-20 ns. Ovaj strmi val višestruko se reflektira i lomi unutar postrojenja. Prigušenje uslijed skin efekta i radnog otpora vodiča u oklopljenim postrojenjima je slabo izraženo. Na taj način nakon probora u postrojenju razvija se visokofrekvencijska prijelazna pojava. I dok su probori navedeni pod brojem 1. rijetki i predstavljaju neplanirane i nedozvoljene poremećaje, proborji koji se dešavaju pri sklopnim operacijama sasvim su normalna stvar u radu postrojenja. Najuobičajeniji su povratni preskoci preko rastavljača, budući da se pri otvaranju rastavljača njegovi kontakti relativno sporo

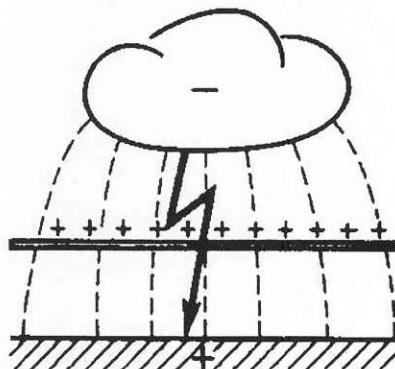
odvajaju (1-2 s) u odnosu na brzinu kontakata prekidača (oko 100 ms). Zato će se i u radu pažnja usmjeriti na ovu pojavu kao najčešću, a prenaponi izazvani drugim vrstama proboja unutar postrojenja po iznosima, frekvenciji i ostalim efektima vrlo su slični prenaponima uzrokovanim povratnim preskocima pri isklapanju rastavljača.

9.3 PUTNI VALOVI NA EE

VODOVINA

9.3.1 PUTNI VALOVI

Nadzemna postrojenja, nadzemni vodovi, rasklopna postrojenja i trafostanice najugroženiji su atmosferskim prenaponima.

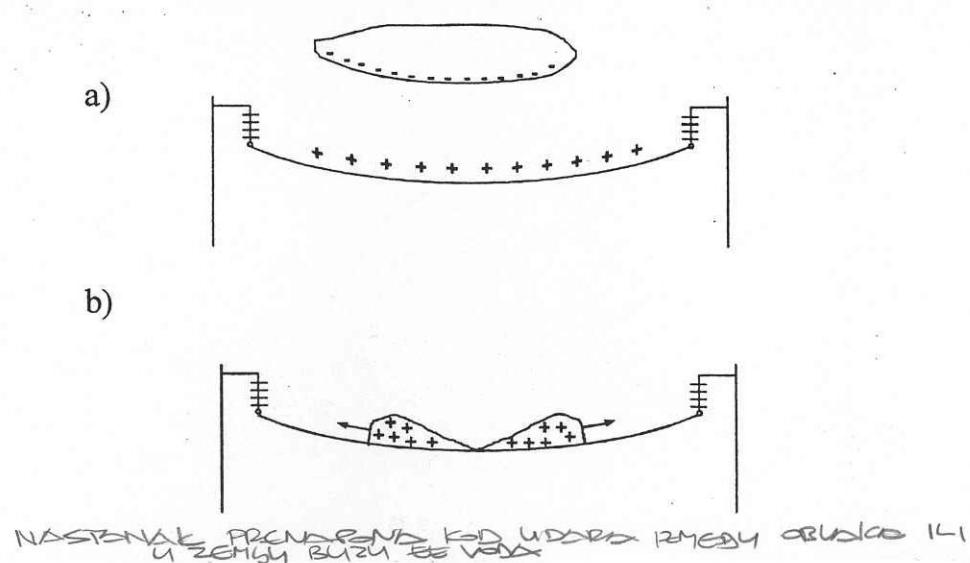
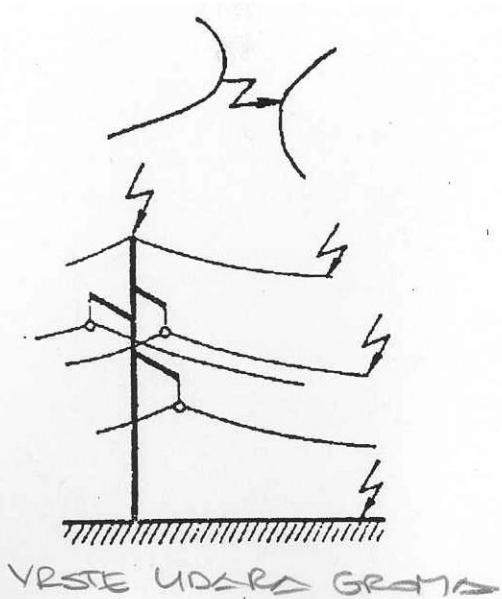
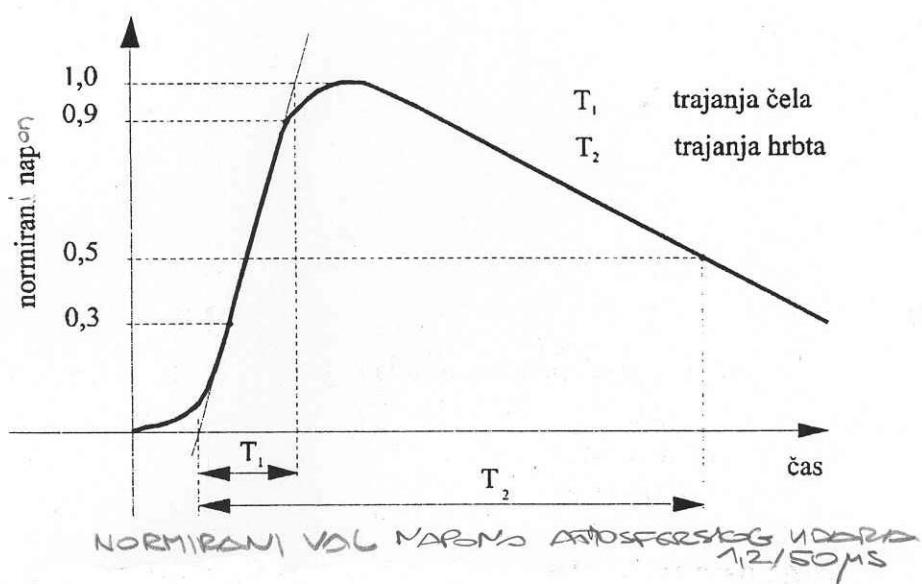
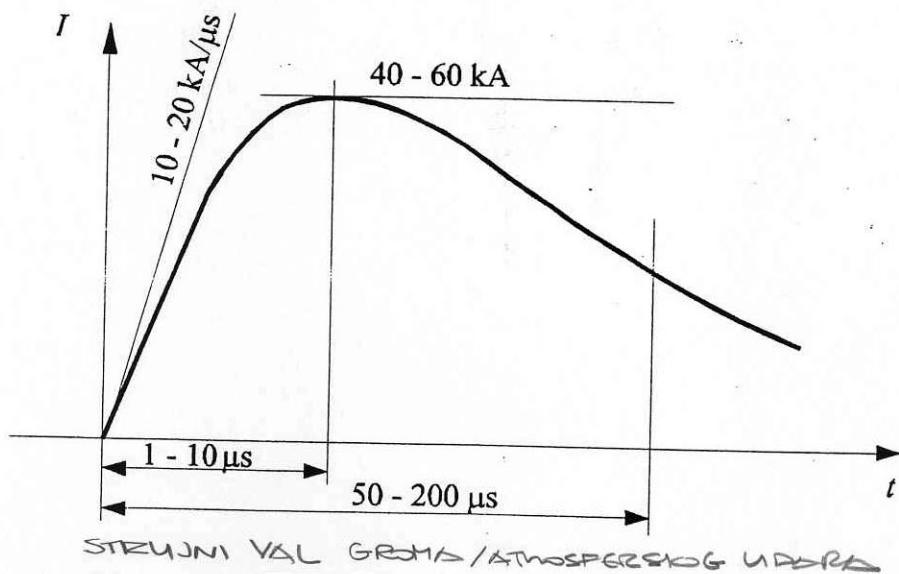


Slika 129. Vodič u električnom polju (vodič je vezan na zemlju npr. preko zvjezdišta transformatora pa ima isti naboј kao zemlja)

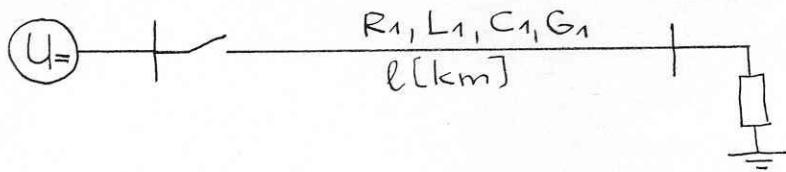
Nakon proboga električnog polja nastaju dva putna vala koja se šire u suprotnim smjerovima.

Opasnost od direktnog udara u vodič, amplituda do npr. 100 kA i strmina do npr. $40 \text{ kA}/\mu\text{s}$.

Pri udarima u uzemljene dijelove (stupovi, zaštitna užad, odvodnik prenapona) struja koja teče podiže potencijal munjom pogodjenih dijelova zbog otpora uzemljenja prema potencijalu udaljenog zvjezdišta transformatora, tako da uzemljeni pogodjeni dio dolazi na viši potencijal od potencijala vodiča. Ako se pri tome prijeđe izolaciona čvrstoća zraka dolazi do povratnog preskoka. Presudno za to je udarni otpor uzemljenja. Atmosferski prenaponi opasniji su za niže pogonske nazivne napone.



9.3.2 VALNA JEDNADŽBA PUTNIH VOLJOVA NA EE VODOVIMA

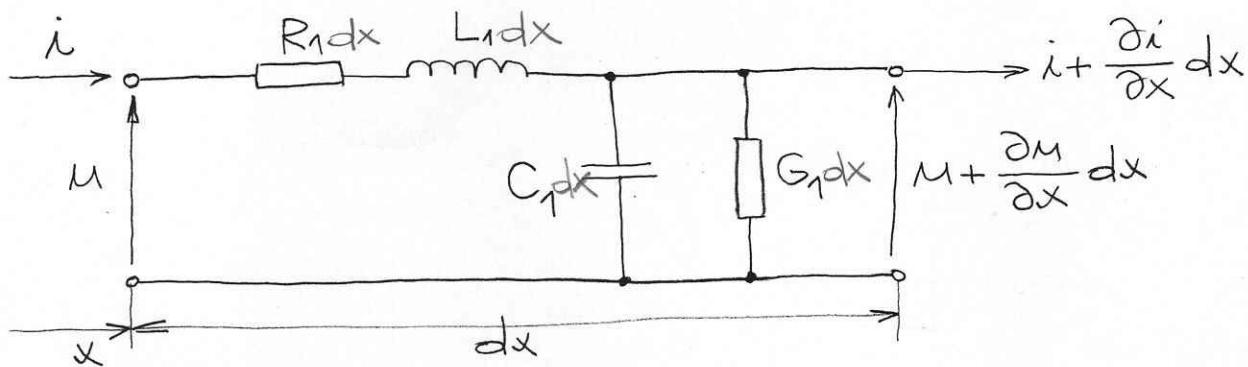


PRI UKLJUČIVANJU INOSTRANE VOLNE NAPONAS KOJI SE GIBA PREMA
TROŠILU, PUTOVJE BRZINOM SVJETLOSTI (NADZEMNI VOD)

$$c = \frac{l}{t} \text{ [km/s]} \quad t = \frac{l}{c} \text{ [s]} \quad c = 300.000 \text{ km/s}$$

t [s] VELJEME POTREBNO DO NAPONSKI VOL
DJE DO KRALJ VODA

MODEL EL. EN. VODA



$$-\frac{\partial M}{\partial x} = R_1 i + L_1 \frac{\partial i}{\partial t}$$

TELEGRAFSKE
JEDNADŽBE

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = G_1 M + C_1 \frac{\partial M}{\partial t}$$

$M = f(x, t)$ $i = f(x, t)$

$$-\frac{dM}{dx} = R_1 \vec{I} + j\omega L_1 \vec{I}$$

TELEGRAFSKE JEDNADŽBE
ZA STACIONARNO STANJE

$$-\frac{di}{dx} = G_1 \vec{U} + j\omega C_1 \vec{U}$$

$$\vec{U} = \vec{U}(x) e^{j\omega t}$$

$$\vec{I} = \vec{I}(x) e^{j\omega t}$$

ODJE RAZMATRANO EL. PRILIKE NA VODU U
NESTACIONARNOM STANJU, SA \vec{U}

- TREBA IZVESTI DVJE DIFERENCIJALNE JEDNADŽBE SA PO
JEDNOM VARIJABLJOM M : i :

$$-\frac{\partial M}{\partial x} = R_1 i + L_1 \frac{\partial i}{\partial t} \quad | \quad \frac{\partial}{\partial x}$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = G_1 M + C_1 \frac{\partial M}{\partial t} \quad | \quad \frac{\partial}{\partial t}$$

$$-\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} = R_1 \frac{\partial i}{\partial x} + L_1 \frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t}$$

$$-\frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t} = G_1 \frac{\partial M}{\partial t} + C_1 \frac{\partial^2 M}{\partial t^2}$$

$$-\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} = R_1 \left(-G_1 M + C_1 \frac{\partial M}{\partial t} \right) + L_1 \left(-G_1 \frac{\partial M}{\partial t} - C_1 \frac{\partial^2 M}{\partial t^2} \right)$$

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} = L_1 C_1 \frac{\partial^2 M}{\partial t^2} + (R_1 C_1 + L_1 G_1) \frac{\partial M}{\partial t} + R_1 G_1 M$$

$$-\frac{\partial M}{\partial x} = R_1 i + L_1 \frac{\partial i}{\partial t} \quad | \quad \frac{\partial}{\partial t}$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = G_1 M + C_1 \frac{\partial M}{\partial t} \quad | \quad \frac{\partial}{\partial x}$$

$$-\frac{\partial^2 M}{\partial x \partial t} = R_1 \frac{\partial i}{\partial t} + L_1 \frac{\partial^2 i}{\partial t^2}$$

$$-\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = G_1 \frac{\partial M}{\partial x} + C_1 \frac{\partial^2 M}{\partial x \partial t}$$

$$-\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = G_1 \left(-R_1 i + L_1 \frac{\partial i}{\partial t} \right) + C_1 \left(-R_1 \frac{\partial i}{\partial t} - L_1 \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \right)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = L_1 C_1 \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} + (R_1 C_1 + L_1 G_1) \frac{\partial i}{\partial t} + R_1 G_1 i$$

VSLNE JEDNODÙBE PUTNIT VSLNOVS ZS
REZULTATU:

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} = L_1 C_1 \frac{\partial^2 M}{\partial t^2} + (R_1 C_1 + L_1 G_1) \frac{\partial M}{\partial t} + R_1 G_1 M$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = L_1 C_1 \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} + (R_1 C_1 + L_1 G_1) \frac{\partial i}{\partial t} + R_1 G_1 i$$

ZD IDEALNI VOD

$$R_1 = 0 \quad G_1 = 0$$

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} = L_1 C_1 \frac{\partial^2 M}{\partial t^2}$$

LAPUŠČEOME
JEDNADŽBE

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = L_1 C_1 \frac{\partial^2 i}{\partial t^2}$$

VALNE JEDNADŽBE PUTNIH VOLJOV
NAPRED I STRANKE ZD IDEALNI VOD

VOD BEZ POKLJUČENJA $\frac{R_1}{L_1} = \frac{G_1}{C_1} = \text{konst.}$

$$\frac{1}{L_1 C_1} = \frac{c^2}{c - \text{BRZINA SVJETLОСТИ}}$$

BRZINA ŠIRJAVI PUTNOG VOLJA $v = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{M/E}}$

$$c = 300.000 \text{ km/s} \\ = 300 \text{ m/s}$$

PROSTORNO: $v = \frac{c}{\sqrt{E_r}}$

= NADZEMNI VOD
 $E_r = 1$

$$v = 300.000 \text{ km/s}$$

• EE KAOEL $E_r = 4$
 $v = 150.000 \text{ km/s}$

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 M}{\partial t^2} = \phi$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} = \phi$$

RJEŠENJE JEDNADŽBI: (prema d'ALMBERT-u)

$$i = i_+ (x - vt) + i_- (x + vt)$$

$$M = M_+ (x - vt) + M_- (x + vt)$$

PREDZNI VAL

PONATNI VDL

$$v = \text{BRZINA ŠIRJAVI PUTNOG VOLJA}$$

PROVERA:

NAPONSKI VDL:

PROVERA DA LI JE $v = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$

$$M = M_+ (x - vt) + M_- (x + vt) \quad / \frac{\partial}{\partial t}$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -v M'_+ (x - vt) + v M'_- (x + vt) \quad / \frac{\partial}{\partial t}$$

$$\frac{\partial^2 M}{\partial t^2} = v^2 M''_+ (x - vt) + v^2 M''_- (x + vt)$$

$$M = M_+ (x - vt) + M_- (x + vt) \quad / \frac{\partial}{\partial x}$$

$$\frac{\partial M}{\partial x} = M'_+ (x - vt) + M'_- (x + vt) \quad / \frac{\partial}{\partial x}$$

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} = M''_+ (x - vt) + M''_- (x + vt)$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial^2 M}{\partial t^2} = v^2 M''_+ (x-vt) + v^2 M''_- (x+vt) \\ \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} = M''_+ (x-vt) + M''_- (x+vt) \end{array} \right\} \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 M}{\partial t^2} = \phi$$

$$v=c=\frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$$

STRUČNI VEL:

$$\left. \begin{array}{l} i = i_+ (x-vt) + i_- (x+vt) / \frac{\partial}{\partial t} \\ \frac{\partial i}{\partial t} = -v i'_+ (x-vt) + v i'_- (x+vt) / \frac{\partial}{\partial t} \\ \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} = v^2 i''_+ (x-vt) + v^2 i''_- (x+vt) \end{array} \right\}$$

$$\left. \begin{array}{l} i = i_+ (x-vt) + i_- (x+vt) / \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial i}{\partial x} = i'_+ (x-vt) + i'_- (x+vt) / \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = i''_+ (x-vt) + i''_- (x+vt) \end{array} \right\}$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} = v^2 i''_+ (x-vt) + v^2 i''_- (x+vt) \\ \frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = i''_+ (x-vt) + i''_- (x+vt) \end{array} \right\} \frac{\partial^2 i}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} = \phi$$

$$v=c=\frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$$

- TELEGRAFSKE JEDNADŽBE ZA IDEALNU VOD

$$R_1=0 \quad G_1=0$$

$$-\frac{\partial M}{\partial x} = R_1 i + L_1 \frac{\partial i}{\partial t}$$

$$-\frac{\partial M}{\partial x} = L_1 \frac{\partial i}{\partial t}$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = G_1 M + C_1 \frac{\partial M}{\partial t}$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = C_1 \frac{\partial M}{\partial t}$$

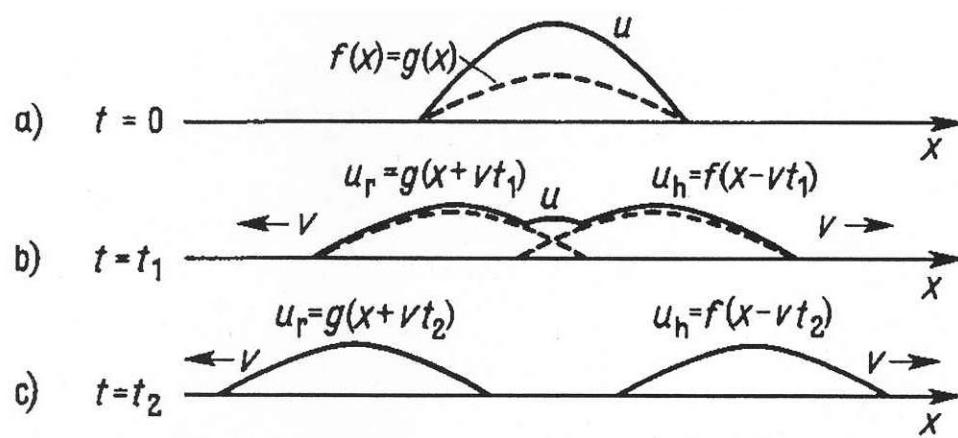
$$-\frac{\partial M}{\partial x} = L_1 \frac{\partial i}{\partial t}$$

$$M_+ (x-vt) \hat{=} M_+$$

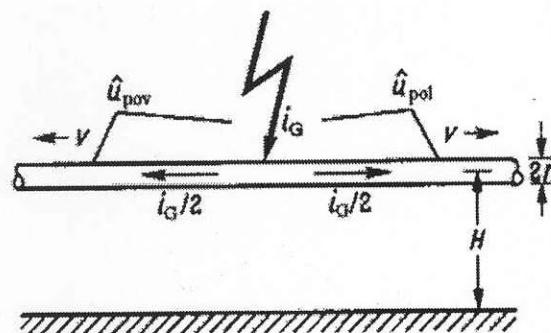
$$i_+ (x-vt) \hat{=} i_+$$

$$M_- (x+vt) \hat{=} M_-$$

$$i_- (x+vt) \hat{=} i_-$$



Naponski val u trenutku nastanka i kasnije nakon vremena t



Udar groma u nadzemni vod

$$-\frac{\partial M}{\partial x} = L_1 \frac{\partial i}{\partial t}$$

$$-(M'_+ + M'_-) = L_1 \nu (i'_- - i'_+)$$

$$M'_+ + M'_- = L_1 \nu (i'_+ - i'_-)$$

$$U \approx \nu = C = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$$

$$L_1 \nu = L_1 C = L_1 \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = Z_v [\Omega]$$

$$Z_v = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} [\Omega] \quad \text{VALNI OTPOR}$$

$$M'_+ + M'_- = Z_v (i'_+ - i'_-)$$

$$M'_+ + M'_- = Z_v i'_+ - Z_v i'_-$$

NAPNSKI VAL:

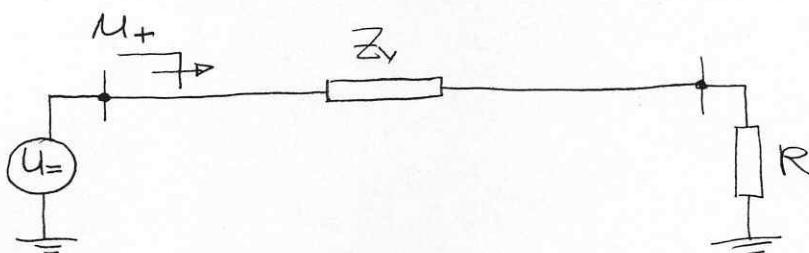
$$M'_+ = Z_v i'_+$$

STREJUNI VAL:

$$i'_+ = \frac{M'_+}{Z_v}$$

$$M'_- = -Z_v i'_-$$

$$i'_- = -\frac{M'_-}{Z_v}$$



$$\underline{\text{ZA KRAJ VOLDA}} \quad M'_+ + M'_- = R (i'_+ + i'_-)$$

$$M'_+ + M'_- = R (i'_+ + i'_-)$$

$$M'_+ + M'_- = R \left(\frac{M'_+}{Z_v} - \frac{M'_-}{Z_v} \right)$$

$$M'_+ + M'_- = R \frac{1}{Z_v} (M'_+ - M'_-) \quad | : M'_+$$

$$1 + \frac{M'_-}{M'_+} = \frac{R}{Z_v} \left(1 - \frac{M'_-}{M'_+} \right)$$

$$\frac{M'_-}{M'_+} + \frac{R}{Z_v} \frac{M'_-}{M'_+} = \frac{R}{Z_v} - 1$$

$$\frac{M'_-}{M'_+} = \frac{\frac{R}{Z_v} - 1}{\frac{R}{Z_v} + 1} = \frac{\frac{R - Z_v}{Z_v}}{\frac{R + Z_v}{Z_v}} = \frac{R - Z_v}{R + Z_v} = \beta_M$$

$\beta_M = \frac{M'_-}{M'_+} = \frac{R - Z_v}{R + Z_v}$

FACTOR REFLEKSIJE
NAPNSKOG VOLA

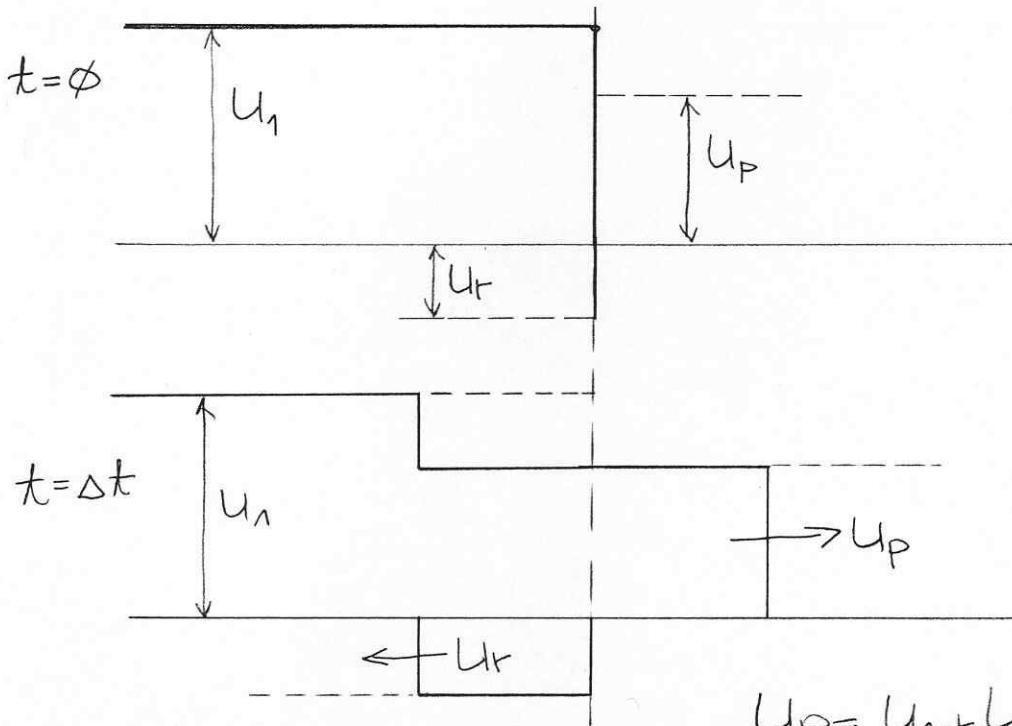
$$\frac{i_-}{i_+} = \frac{-\frac{M_-}{Z_V}}{\frac{M_+}{Z_V}} = -\frac{M_-}{M_+} = -\frac{R-Z_V}{R+Z_V} = \frac{Z_V-R}{Z_V+R} = \beta_M$$

$$\boxed{\beta_M = \frac{i_-}{i_+} = \frac{Z_V-R}{Z_V+R}}$$

FAKTOR REFLEKSIJE
STRUJNOG VOLA

$$\underline{\beta_M = -\beta_R}$$

NAPONSKI VOL NIJE KRALJ VOLA:



$$U_p = U_1 + U_r$$

$$U_r = \beta_M U_1$$

$$U_p = L \cdot U_1$$

β_M - FAKTOR REFLEKSIJE
(ODBJECIJE)

L - FAKTOR PRIGUŠENJA / PRODASKA
VOLA (PROUST)

$$U_r = \beta_M \cdot U_1 = \frac{R-Z_V}{R+Z_V} U_1$$

$$U_p = U_1 + U_r$$

$$L \cdot U_1 = U_1 + \frac{R-Z_V}{R+Z_V} U_1$$

$$L \cdot U_1 = U_1 \frac{R+Z_V+R-Z_V}{R+Z_V}$$

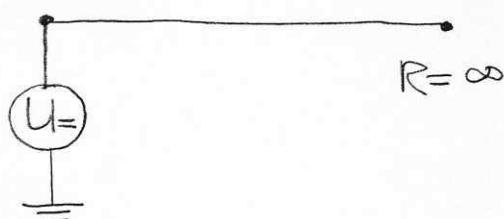
$$\boxed{L = \frac{2R}{R+Z_V}}$$

FAKTOR PRIGUŠENJA
FAKTOR PRODASKA
NAPONSKOG VOLA

$$\boxed{L-\beta = 1}$$

NAPONSKI VOL NA VODU U RAZLIČITIM
POGOŃSKIM SITUACIJAMA:

a) PRØZNI VOL VODA
(VOD NÆ KRAJU OTVOREN)



$$\beta = \beta_M = \frac{R - Z_V}{R + Z_V}$$

$$\beta = \frac{1 - \frac{Z_V}{R}}{1 + \frac{Z_V}{R}} = \frac{1}{1} = 1$$

$$\beta = 1$$

$$\mathcal{L} = 1 + \beta = 2$$

b) KRATKI SPoj NA KRAJU VODA

$$R = 0$$

$$\beta = \beta_M = \frac{R - Z_V}{R + Z_V} = -1$$

$$\beta = -1$$

$$\mathcal{L} = 1 + \beta = 1 - 1 = 0$$

$$\mathcal{L} = \emptyset$$

c) VOD ZAKYUĆEN VODNOM IMPEDANCIJOM $R = Z_V$

$$R = Z_V$$

$$\beta = \beta_M = \frac{R - Z_V}{R + Z_V} = \frac{Z_V - Z_V}{Z_V + Z_V} = \emptyset$$

$$\beta = 0$$

$$\mathcal{L} = 1 + \beta = 0 + 1 = 1$$

$$\mathcal{L} = 1$$

NAPONSKI VOL NÆ VODU JE PREIGUŠEN, JER JE
 $G_1 = \emptyset$ (ZANEMAREN), $R \neq 0$

$$M = e^{-at} [M_+(x - vt) + M_-(x + vt)]$$

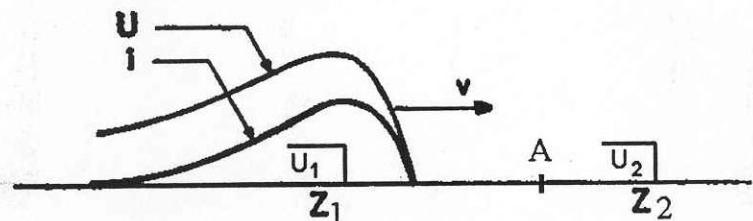
$$a = \frac{R}{L}$$

R, L - KONSTANTE VODA

9.3.3 REFLEKSIVE I LOMOVI PUTNIH VALOVA

Refleksije i lomovi putnih valova

Na točkama diskontinuiteta dolazi do pretvorbe energije električnog polja (naponski val) u energiju magnetskog polja (strujni val) i obratno.



Nailazak putnog vala na diskontinuitet

Vodom putuje elektromagnetski val (struja i napon) i nailazi na promjenu valnog otpora Z_2 (potrošač, drugi vod, kabel). U točki diskontinuiteta dolazi do pretvorbe energije. Energija električnog polja (napon) može se pretvoriti u energiju magnetskog polja (struju) i obrnuto. Njihova suma u jednom i drugom vodu ostaju konstantne. Koliki će se dio jedne vrste energije pretvoriti u drugu zavisi o tome kolike su vrijednosti Z_1 i Z_2 .

Naponski val: U_1 - upadni val;

U_2 - prolazni val:

$$U_2 = pU_1 = U_1 \cdot \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Faktor prolaza:

$$p = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Reflektirani val:

$$U_r = rU_1$$

Faktor refleksije:

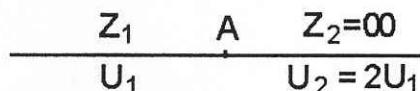
$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

Vrijedi:

$$p \cdot r = 1$$

Posebni slučajevi:

a) Prazni hod voda $Z_1, Z_2 = \infty$



Slučaj praznog hoda

$$p = \lim_{Z_2 \rightarrow \infty} \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = \lim_{Z_2 \rightarrow \infty} \frac{2}{\frac{Z_1}{Z_2} + 1} = 2$$

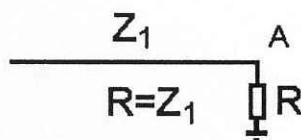
$$r = p - 1 = 1$$

$$U_2 = 2U_1$$

$$U_r = U_1$$

Reflektirani val jednak upadnom, a "prolazni" val je 2x upadni.

b) Voda zaključen valnom impedancijom $Z_2 = R = Z_1$



Slučaj voda zaključenog valnom impedancijom

$$p = \frac{2R}{Z_1 + R} = \frac{2R}{2R} = 1$$

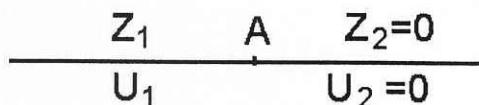
$$r = p - 1 = 0$$

$$U_2 = U_1$$

$$U_r = 0$$

Nema refleksije upadnog vala.

c) Kratki spoj voda $Z_1, Z_2 = 0$



Slučaj kratkog spoja voda

$$p = \frac{0}{Z_1 + 0} = 0$$

$$r = p - I = -I$$

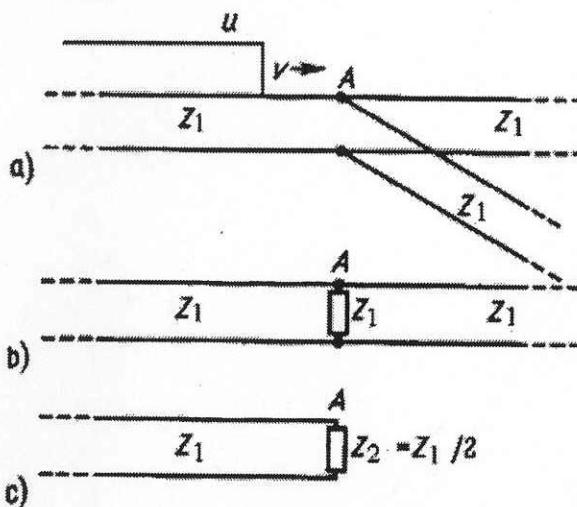
$$U_2 = 0$$

$$U_r = -U_I$$

Napon se reflektira s istim iznosom, ali suprotnog predznaka.

- Primjer 26:

Pravokutni putni val nailazi u točki A na račvanje vodova. Svi vodovi su istog valnog otpora Z . Koliki će biti naponi prolaznih i reflektiranih valova?

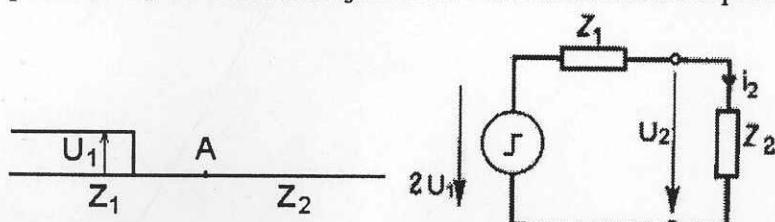


Račvanje vodova

Prolazna struja (Petersenovo pravilo)

$$I_2 = \frac{U_2}{Z_2} = \frac{pU_1}{Z_2} = \frac{2Z_2}{(Z_1 + Z_2)Z_2} U_1 = \frac{2U_1}{Z_1 + Z_2} \quad U_2 = I_2 Z_2$$

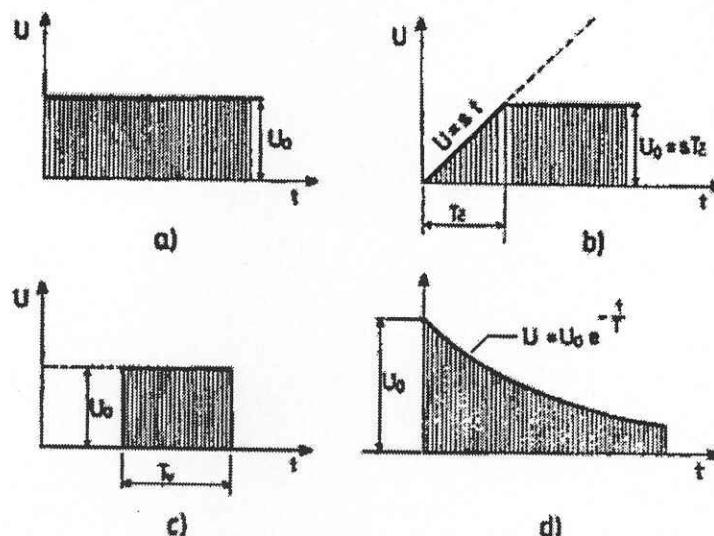
Kombinacija valnih otpora Z_1 i Z_2 može se nadomjestiti ekvivalentnom shemom prema Petersenu.



Ekvivalentna shema prema Petersenu

Valni otpori Z_1 i Z_2 zamjene se radnim otporima i stave pod dvostruki napon U_1 , pa se brzo može izračunati struja I_2 i napon $U_2 = I_2 \cdot Z_2$. Udar groma u nadzemni vod može se zamisliti kao da je na tom mjestu generator čija je EMS $2U_1$, a unutarnji otpor je Z_1 i Z_2 otpor potrošača.

Oblici valova u proračunima

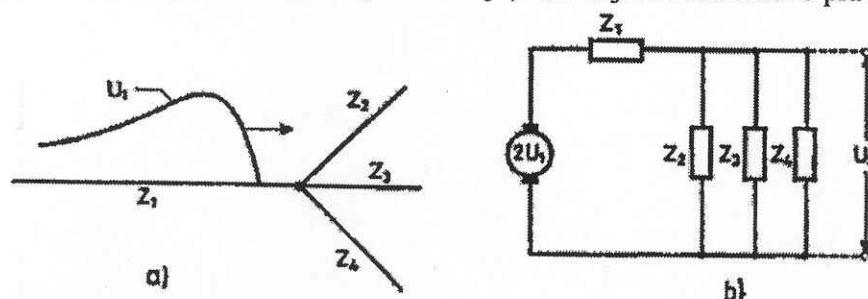


Proračunski valovi:

- pravokutni val (utjecaj promjene amplitude)
- val strmog čela (utjecaj strmine)
- kratki val (utjecaj duljine trajanja)
- eksponencijalni val (najsličniji stvarnim valovima)

Vodovi koji se račvaju

Nailazak vala na TS (više vodova koji se račvaju) isto vrijedi Petersenovo pravilo.



Vodovi koji se račvaju

Neka je $Z_1 \neq Z_2 \neq Z_3 \neq Z_4$. Prolazna struja i napon:

$$i_2 = \frac{2U_1}{Z_1 + Z_K}; U_2 = i_2 Z_K$$

$$Z_K = \frac{Z_2 \cdot Z_3 \cdot Z_4}{Z_3 \cdot Z_4 + Z_2 \cdot Z_4 + Z_2 \cdot Z_3}$$

U praksi je najčešće $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_4 = Z$:

$$Z_K = \frac{Z^3}{3Z^2} = \frac{1}{3} Z$$

pa je:

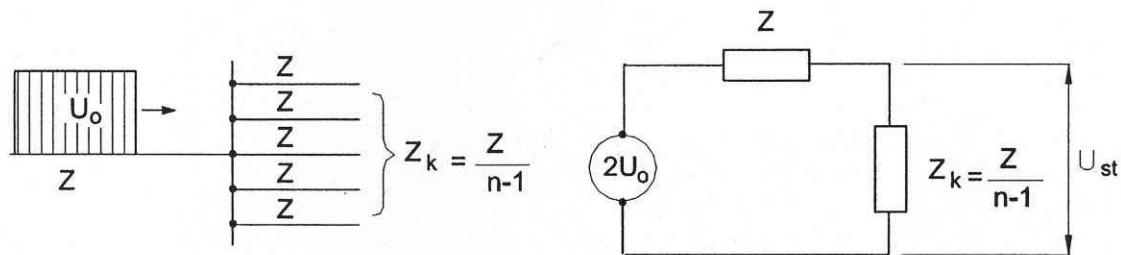
$$i_2 = \frac{2U_1}{Z + \frac{1}{3}Z} = \frac{2U_1}{Z\left(1 + \frac{1}{n-1}\right)} \Rightarrow Z_K = \frac{Z}{n-1}$$

n je ukupan broj vodova!!!

$$U_2 = i_2 Z_K = i_2 \frac{Z}{n-1} = \frac{2U_1}{Z\left(\frac{n-1+1}{n-1}\right)} \frac{Z}{n-1} = \frac{2U_1}{n}$$

Za ovaj primjer je n = 4.

Putni valovi u TS



Putni val u TS

U₁ = U₀ upadni val; U₂ = U_{st} (napon u stanici).

$$U_{st} = \frac{2U_0}{n} = pU_0$$

$$p = \frac{2}{n} \text{ faktor prolaza;}$$

Val ne mijenja oblik!

Reflektirani val:

$$U_r = rU_0 = U_0(p-1) = U_0 \frac{2-n}{n}$$

Faktor refleksije:

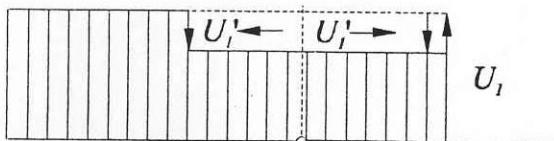
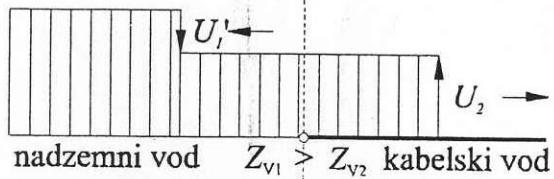
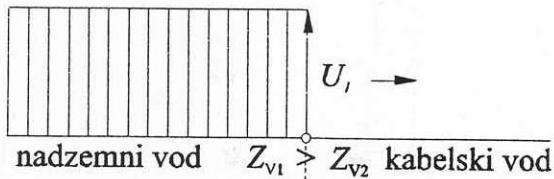
$$r = \frac{2-n}{n}, \text{ uz } n > 2, r < 0;$$

Uz r < 0 (nagativan) znači da je Z_K < Z₁, pa će reflektirani val biti negativan i smanjiti napon upadnog vala.

PRIMER 1

1. opći PRIMER

PROMJENA VALNOG OTPODA SA Z_{v1} NA Z_{v2}



PROMJENA NAPONA PRI PROLJETU
PUTNOG VOLNA

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_{v1}} \quad I_2 = \frac{U_2}{Z_{v2}} \quad I_1' = \frac{-U_1'}{Z_{v1}}$$

u točci promjene valnog otpora Z_{v1} na Z_{v2}

$$U_2 = U_1 + U_1' \quad I_2 = I_1' + I_1$$

$$I_2 = I_1 + I_1' = \frac{U_1}{Z_{v1}} + \frac{-U_1'}{Z_{v1}} = \frac{U_1}{Z_{v1}} - \frac{U_2 - U_1}{Z_{v1}} = \frac{2U_1}{Z_{v1}} - \frac{U_2}{Z_{v1}}$$

$$I_2 = \frac{2U_1}{Z_{v1}} - \frac{I_2 Z_{v2}}{Z_{v1}}$$

$$I_2 Z_{v1} = 2U_1 - I_2 Z_{v2}$$

$$I_2 (Z_{v1} + Z_{v2}) = 2U_1 \rightarrow I_2 = \frac{2U_1}{Z_{v1} + Z_{v2}}$$

$$U_2 = I_2 Z_{v2} = U_1 \frac{2Z_{v2}}{Z_{v1} + Z_{v2}} \rightarrow P = \frac{U_2}{U_1} = \frac{2Z_{v2}}{Z_{v1} + Z_{v2}}$$

FAKTOR PROLAŠKA

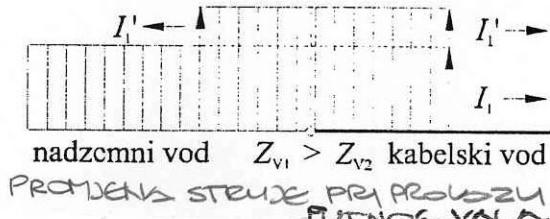
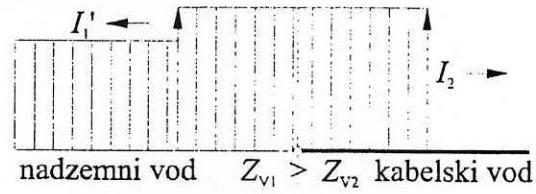
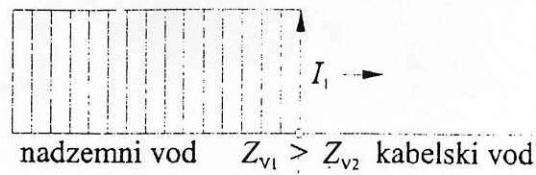
$$U_1' = U_2 - U_1 = U_1 \frac{2Z_{v2}}{Z_{v1} + Z_{v2}} - U_1 = U_1 \frac{Z_{v2} - Z_{v1}}{Z_{v1} + Z_{v2}}$$

$$r = \frac{U_1'}{U_1} = \frac{Z_{v2} - Z_{v1}}{Z_{v1} + Z_{v2}}$$

$$I_1' = -\frac{U_1'}{Z_{v1}} = -\frac{U_1}{Z_{v1}} \frac{Z_{v2} - Z_{v1}}{Z_{v1} + Z_{v2}}$$

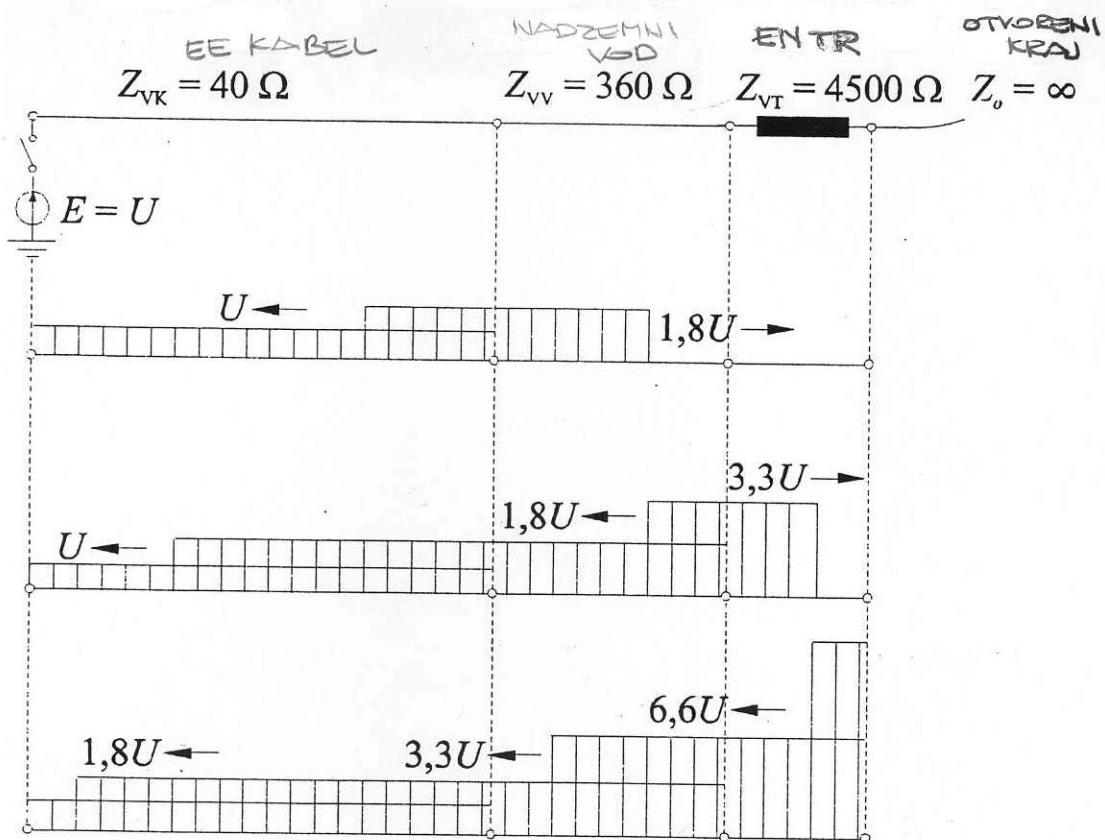
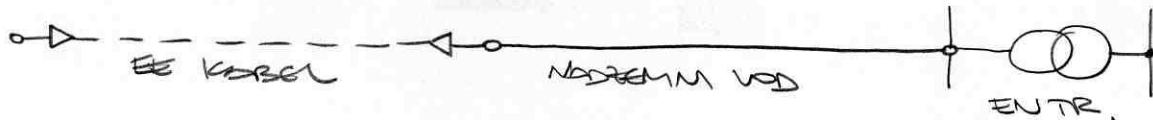
FAKTOR REFLEKSije

$$P - r = 1$$



PRIMER 2. PRAVČENJE VOLNOG OTVARA

PRIMERAZ KABELSKOG VOLNA U NADzemnI VOLN NA ŠIJEM
KABLU JE PRAVČEN TE. TRANSFORMATOR NEOSTEREDEN



Faktori pravčenja:

- PRIMERAZ
KABEL - NADzemnI VOLN

$$P = \frac{2Z_{V2}}{Z_{V1} + Z_{V2}} = \frac{2 \cdot 360}{40 + 360} = 1,8$$

- PRIMERAZ
NADzemnI VOLN - EN.TR.

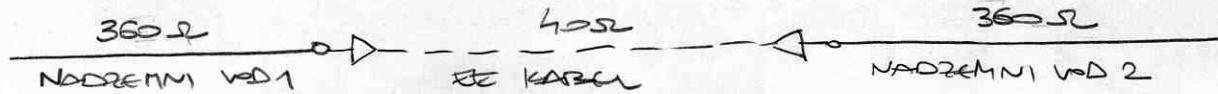
$$P = \frac{2Z_{V2}}{Z_{V1} + Z_{V2}} = \frac{2 \cdot 4500}{360 + 4500} = 1,85$$

- PRIMERAZ 12
EN.TR. - OTVORENI KABL

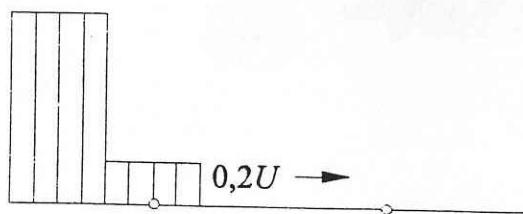
$$P = \frac{2Z_{V2}}{Z_{V1} + Z_{V2}} = \frac{2 \cdot \infty}{4500 + \infty} = 2$$

PRIMUS 3.

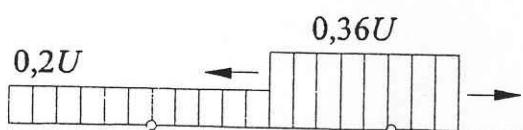
NADZEMNI VOD - ŽE KABEL - NADZEMNI VOD



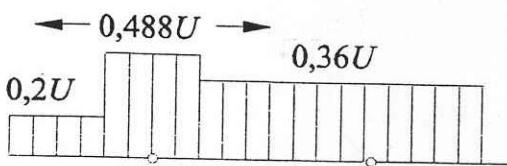
a)



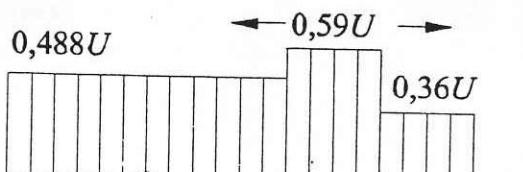
b)



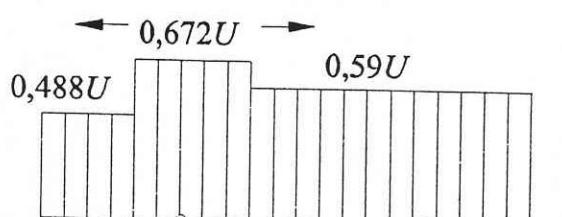
c)



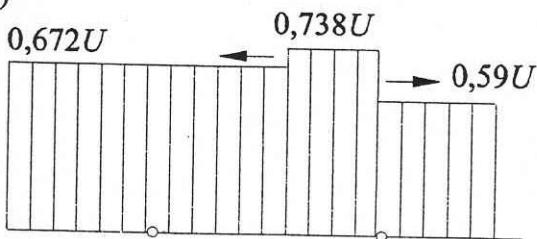
d)



e)



f)



PRIMUS 2
NADZEMNI VOD - ŽE KABEL

$$P = \frac{2Zv_2}{Zv_1 + Zv_2} = \frac{2 \cdot 40}{360 + 40} = 0,8$$

$$t = \frac{Zv_2 - Zv_1}{Zv_1 + Zv_2} = \frac{360 - 40}{360 + 40} = 0,8$$

NAPEN NA ŽE kabemu je:

$$\begin{aligned} U_{\text{kabel}} &= U_p \cdot p + U_p \cdot r + U_p \cdot r^2 + \dots \\ &= U_p (1 + r + r^2 + \dots) = U_p \frac{1}{1-r} \end{aligned}$$

9.4 ZAŠTITA OD PRENAPONA

VRSTE ZAŠTITE OD PRENAPONA:

1. SPREČAVANJE NOSITIKA PRENAPONA
2. MJERE ZA STANOVNE PRENAPONA
3. DIMENZIONIRANJE (KOORDINACIJA) IZOLACIJE

9.4.1 MJERE ZA SPREČAVANJE NOSITIKA PRENAPONA

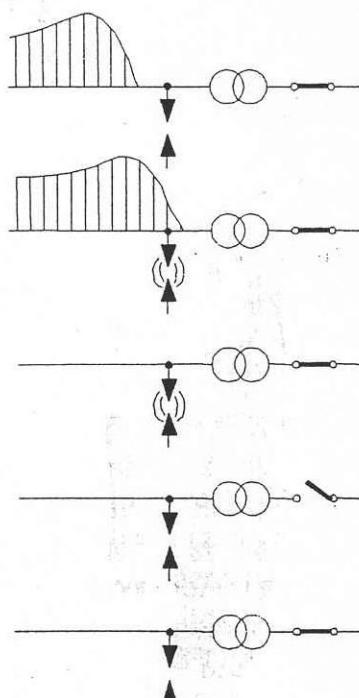
- DIMENZIONIRANJE UZEMLJIVODA I SUSTAVA UZEMLJENJA
- ODABIR SUSTAVA ZA UZEMLJENJE ZAVISISTO JE MREŽE

9.4.2 MJERE ZA SMANJIVANJE PRENAPONA

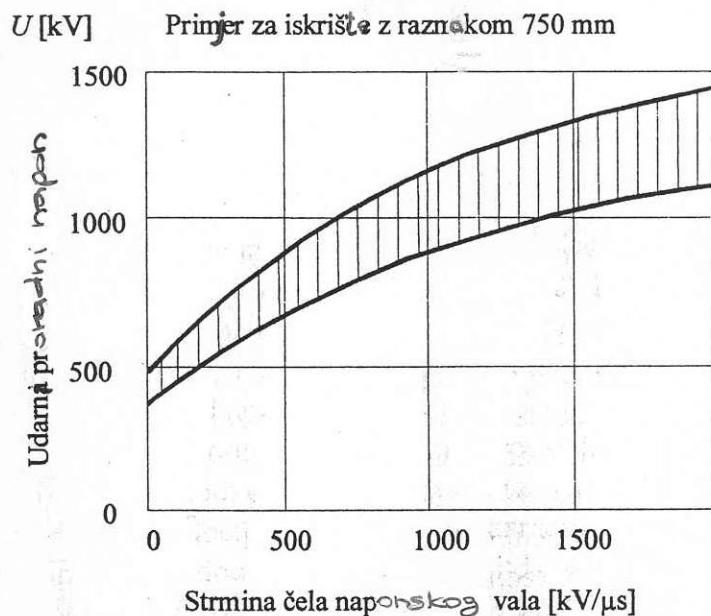
UGRADNJA ZAŠTITNIH UREĐAJA

ZAŠTITNA ISKRŠTA

a) Delovanje

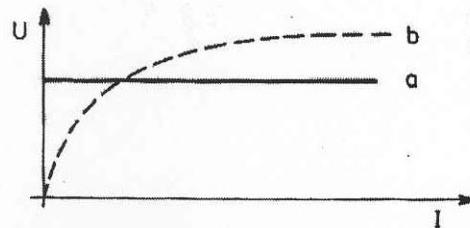


b) Karakteristika



ODVODNICI PRENAPONA

Za zaštitu elektroenergetskih postrojenja, objekata, a posebno transformatora upotrebljavaju se odvodnici prenapona. U najnovije vrijeme razvijene su posebne izvedbe odvodnika prenapona, koji se postavljaju na nadzemne vodove. Odvodnici prenapona ponašaju se kao nelinearni otpori, čiji se iznos mijenja u zavisnosti od veličine narinutog napona. Na slici 117. je prikazana nelinearna strujno-naponska (I-U) karakteristika idealnog a) i nekog realnog b) odvodnika prenapona.



Strujno-naponska (I-U) karakteristika a) idealnog i b) realnog odvodnika prenapona.

$$ZASTITNA ZONA ODVODNIKA PRENAPONA$$

$$X_a = \frac{(U_1 - U_2)v}{2s}$$

s - strmina [KV/MS]
 U₁ (KV) - izolacijska razina
 U₂ (KV) - zastitna razina
 v - brzina (m/μs)

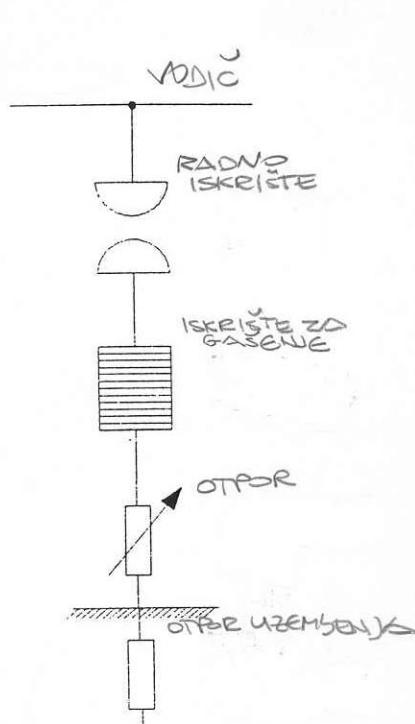
$X_a [\Omega]$

ODVODNICI PRENAPONA:

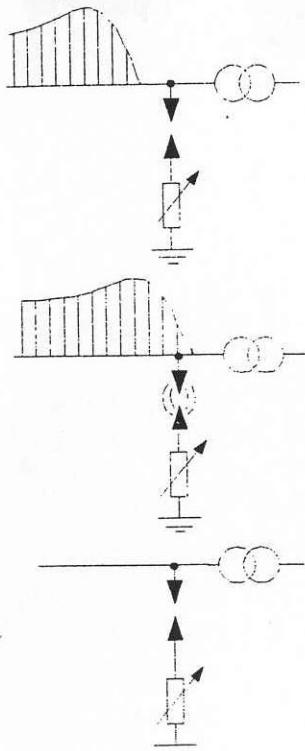
- KLASIČNI SiC
- METALOKSIDI

KLASIČNI SiC ODVODNICI PRENAPONA

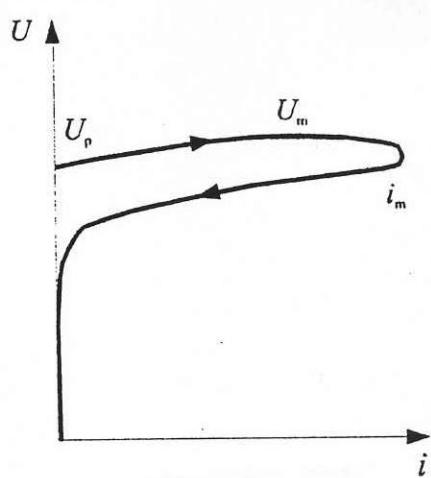
a) Shema



b) Djelovanje



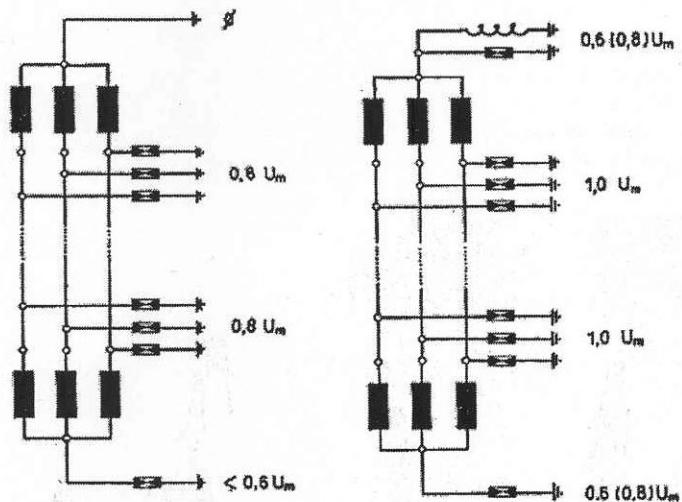
c) Karakteristika



U_p ... protudni napon
 U_m ... preostali napon
 i_m ... max. struja

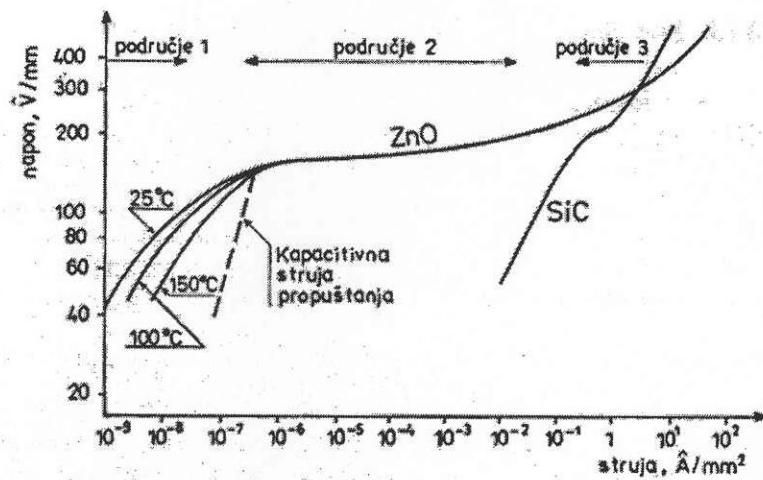
Izbor plastičnog odvodnika prenapona

- nazivni napon
- nazivna struja

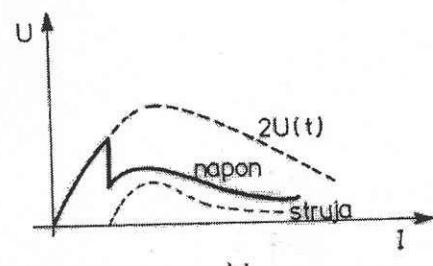
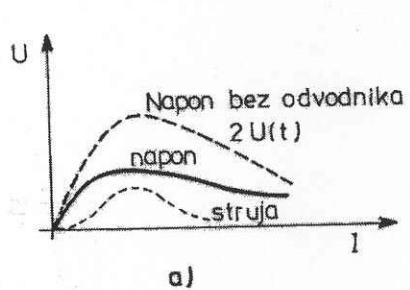
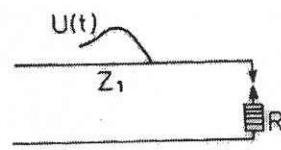
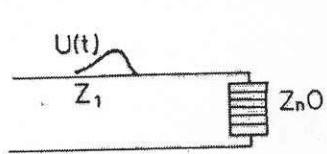


Shema ugradnje odvodnika prenapona

Metaloksični odvodnici prenapona



Strujno-naponska karakteristika MO odvodnika



Usporedba rada SiC i MO odvodnika.