

## 26. ZAŠTITA OD PRENAPONA

### 26.1. PRENAPONI

Prenaponi bilo kog porekla štetni su jer:

- ✚ Izazivaju preskoke (električni luk)
- ✚ Oštećuju izolaciju, privremeno ili trajno

Zbog prethodnog, prenaponi mogu dovesti do:

- ✚ Oštećenja elemenata postrojenja
- ✚ Velikih havarija i materijalne štete

Zato se prenaponi moraju svesti na nivo koji izolacija može podneti bez oštećenja.

Podela prenapona prema uzroku nastanka:

- ✚ Spoljašnji ili atmosferski
- ✚ Unutrašnji

Atmosferski prenaponi nastaju usled atmosferskih pražnjenja (udara groma) u elemente EES-a (direktni udar) ili u objekte u njihovoj blizini (indukovani atmosferski prenaponi). Odlikuju se kratkim trajanjem i visokim amplitudama.

Unutrašnji prenaponi dele se na:

- ✚ Sklopni ili komutacioni – nastaju pri sklopnim operacijama (uključenje ili isključenje) delova mreže. Izazivaju ih sklopne operacije prekidačima i rastavljačima. Karakterišu ih umerene amplitude i trajanje.
- ✚ Privremeni ili povremeni. Odlikuju se nižim amplitudama i dužim trajanjem u odnosu na prethodno pomenute. Prema uzroku nastanka dele se na:
  - Prenaponi pri nesimetričnom pogonu – pri nesimetričnim kvarovima ili prekidima
  - Rezonantni prenaponi - nastaju u mrežama kod kojih zbog određenog uklopnog stanja ili kvara, sopstvena učestanost mreže postane bliska učestanosti mreže
  - Ferorezonantni prenaponi – nastaju u mrežama u kojima nelinearna induktivnost magnećenja uđe u rezonansu sa kapacitivnostima
  - Prenaponi pri naglom rasterećenju

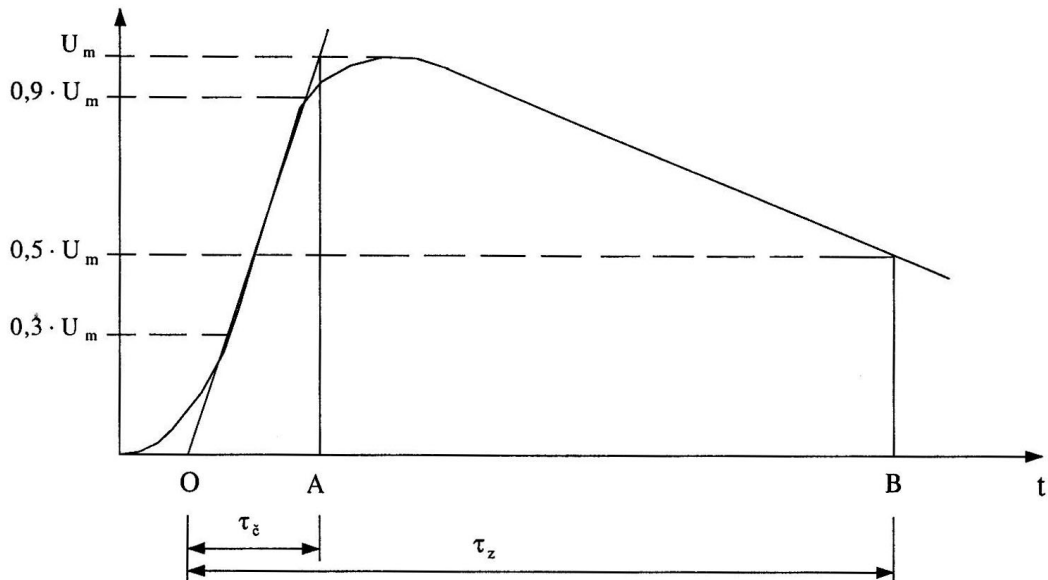
### 26.2. ATMOSFERSKI PRENAPONI

Njihovo trajanje obično je nekoliko desetina mikrosekundi, brzine uspostavljanja su velike, a amplitude mogu biti i nekoliko miliona volti.

Atmosferske prenapone karakteriše:

- ✚ Amplituda (temena vrednost)  $U_m$
- ✚ Polaritet
- ✚ Vreme trajanja čela  $\sigma_\epsilon$
- ✚ Vreme trajanja začelja  $\sigma_z$

Na **Slici 26.1** prikazan je tipičan oblik prenaposnog talasa.



**Slika 26.1.**

Tipičan oblik atmosferskog prenapona

Iz oscilograma napona određuju se karakteristike prenaponskog talasa. Određuju se četiri tačke na krivnoj:

- ✚ Tačka u kojoj se dostiže  $0.3U_m$  (pri porastu napona)
- ✚ Tačka u kojoj se dostiže  $0.9U_m$  (pri porastu napona)
- ✚ Tačka u kojoj se dostiže  $U_m$
- ✚ Tačka u kojoj se dostiže  $0.5U_m$  pri smanjenju napona

Kroz tačke sa ordinatama  $0.3U_m$  i  $0.9U_m$  na usponskom delu talasa (čelo talasa) povlači se prava linija. Preseci te prave sa apscisom (tačka O) i sa pravom  $U=U_m$  (tačka A) određuju vremenski interval OA koji se naziva vreme trajanja čela.

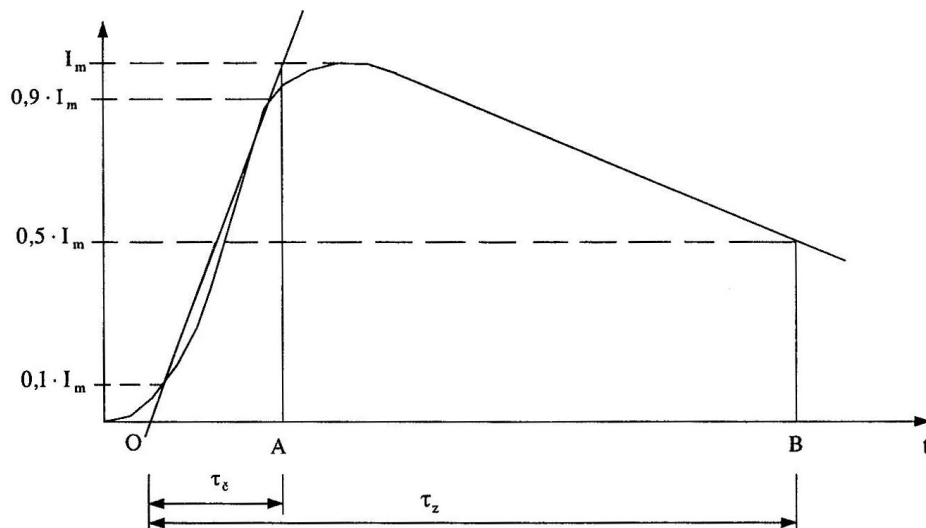
Apscisa tačke  $0.5U_m$  na opadajućem delu krivine određuje tačku B. Interval OB predstavlja vreme trajanja začelja talasa. To vreme je mera trajanja prenapona, a u određenoj meri i mera energije prenaponskog talasa.

Ova vremena se izražavaju u  $\mu\text{s}$ .

Primer:  $+500 \text{ kV } 1/50$ , znači da je talas pozitivan, amplitude  $500 \text{ kV}$ , trajanja čela  $1 \mu\text{s}$  i trajanja začelja  $50 \mu\text{s}$ .

Standardni prenaponski talas, kojim se vrši ispitivanje nivoa izolovanosti je  $1.2/50 \mu\text{s}$ .

Na **Slici 26.2** dat je tipičan oblik strujnog talasa prouzrokovan atmosferskim pražnjenjem.



**Slika 26.2.**

Tipičan oblik strujnog talasa prouzrokovanog atmosferskim pražnjenjem

Parametri strujnog talasa određuju se na sličan način kao i parametri naponskog talasa. Jedina razlika je u određivanju trajanja čela talasa, koje određuje prava koja se provlači kroz tačke čije su ordinate  $0.1I_m$  i  $0.9I_m$ . Standardni oblik strujnog udarnog talasa kojim se ispituje oprenma je  $8/20 \mu s$ .

### 26.3. ODVODNICI PRENAPONA

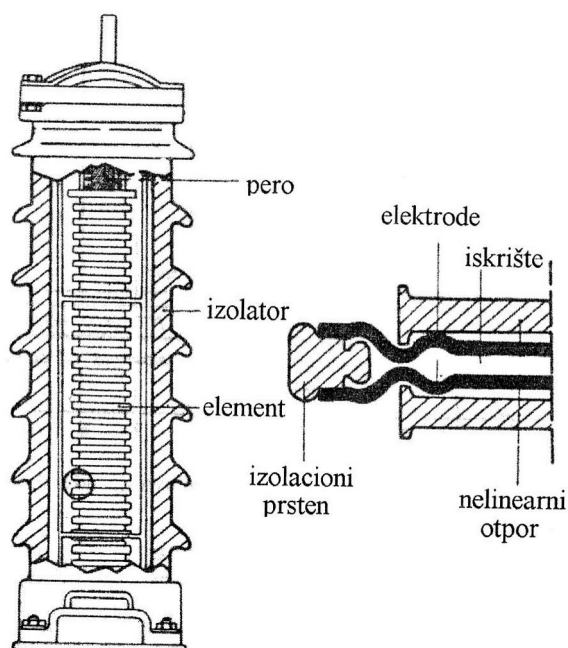
Odvodnici prenapona su aparati koji imaju nelinearne otpornike (varistore) vezane prema zemlji koji pri nailasku prenapona smanjuju svoju otpornost odvođeći deo energije u zemlju. Nestankom prenapona oni ponovo vraćaju svoju otpornost na prvobitnu vrednost.

Prema konstrukciji odvodnici se mogu podeliti u dve grupe:

- ✚ silicijumkarbidni (SiC) ili klasični odvodnici prenapona,
- ✚ metaloksidni ili cink-oksadni (ZnO) odvodnici prenapona.

SiC odvodnici su prvi odvodnici prenapona koji su počeli da se primenjuju za zaštitu elektroenergetskih postrojenja. To je uređaj sastavljen iz redno vezanih nelinearnih otpornika i iskrišta. Iskrište ima ulogu sklopnog aparata koji se uključuje kada napon pređe određenu vrednost (napon reagovanja), a isključuje kada struja prolazi kroz nulu. Tokom odvođenja prenaponskog talasa, nelinearni otpornik smanjuje svoju vrednost i ograničava napon na priključcima na prihvatljivu vrednost. Po nestanku prenaponskog talasa, nelinearni otpornik povećava svoju vrednost i služi da ograniči propratnu struju koja protiče usled dejstva radnog napona. Upotrebom nekoliko iskrišta i varistora vezanih na red može se konstruisati odvodnik za više radne napone.

SiC odvodnik prikazan je na **Slici 26.3**.



**Slika 26.3.**  
SiC odvodnik prenapona

Umesto klasičnih odvodnika danas se u svetu upotrebljavaju metaloksidni odvodnici prenapona (MOP). Ove odvodnike odlikuje jednostavnija konstrukcija i povoljnije zaštitne karakteristike. Glavne prednosti MOP-a su:

- ✚ Nepostojanje iskrišta
- ✚ Povoljniji oblik volt-amperske karakteristike (U-I karakteristika)

Budući da nema iskrišta, MOP stalno provodi struju. U normalnom pogonu, ta struja je zbog velike otpornosti MOP-a jako mala i nema potrebe za iskrištem. Pri nailasku prenaponskog talasa, MOP smanjuje

svoju otpornost ograničavajući napona na priključcima na prihvatljivu vrednost. Tokom odvođenja prenaponskog talasa, struja odvođenja je u kiloamperskom području.

MOP odlikuje izražen koeficijent nelinearnosti otpornika, koji je znatno veći nego kod SiC odvodnika. Zgodan način prikazivanja volt-amperske karakteristike je preko referentnog napona i struje, odnosno:

$$\frac{i_r}{I_{ref}} = \left( \frac{u}{U_{ref}} \right)^\alpha,$$

gde su:

$i_r$  – trenutna vrednost rezistivne komponente struje odvodnika,

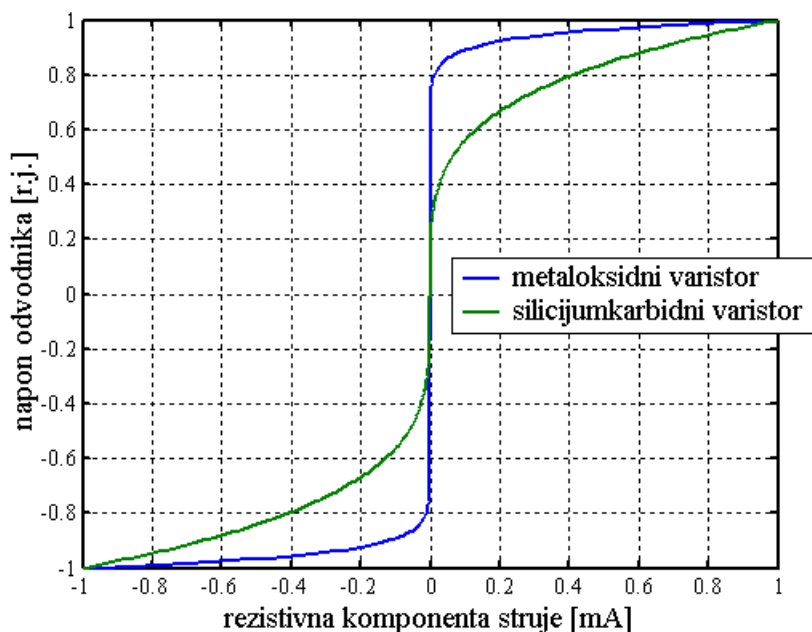
$u$  – trenutna vrednost napona odvodnika,

$I_{ref}, U_{ref}$  – referentna struja i referentni napon koji definišu jednu tačku na volt-amperskoj karakteristici,

$\alpha$  – koeficijent nelinearnosti.

Koeficijent nelinearnosti  $\alpha$  kod MOP-a ima vrednosti od 20 do 50, za razliku od SiC odvodnika gde isti ima daleko manje vrednosti, od 2 do 6.

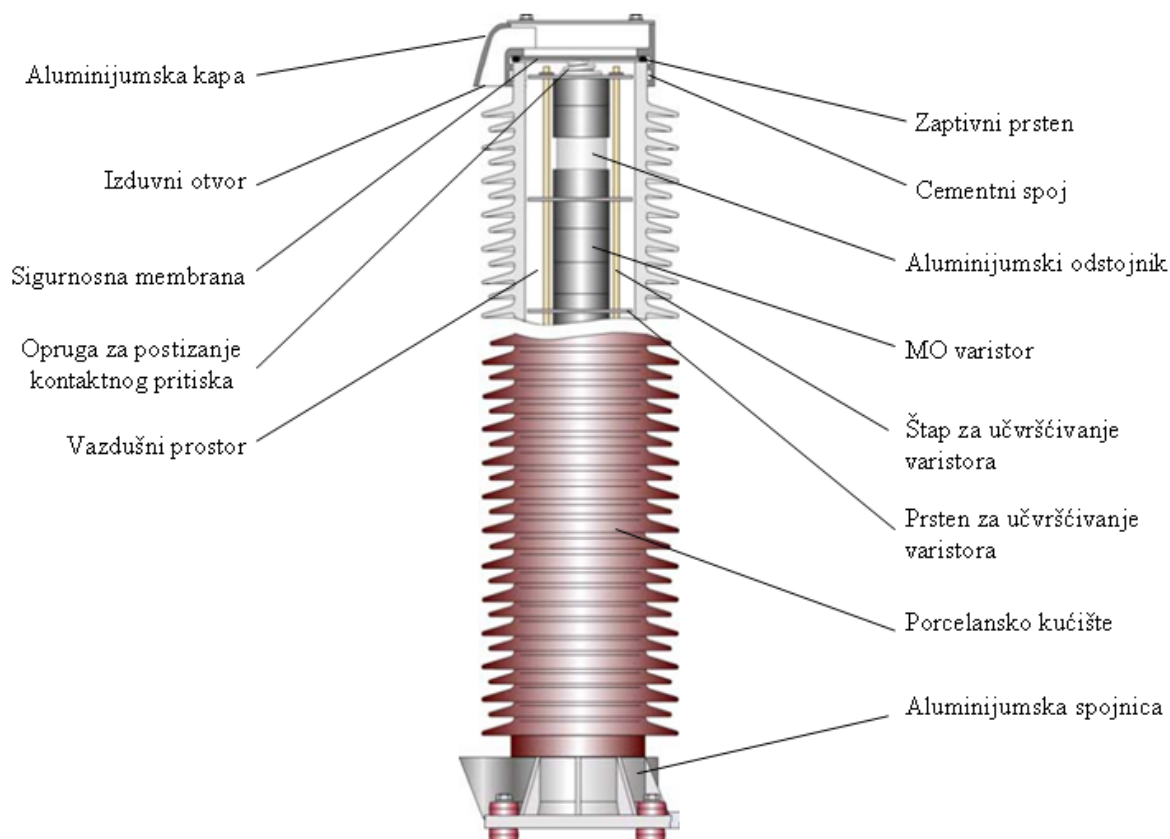
Na Slici 26.4 prikazane su U-I karakteristike dva tipa odvodnika.



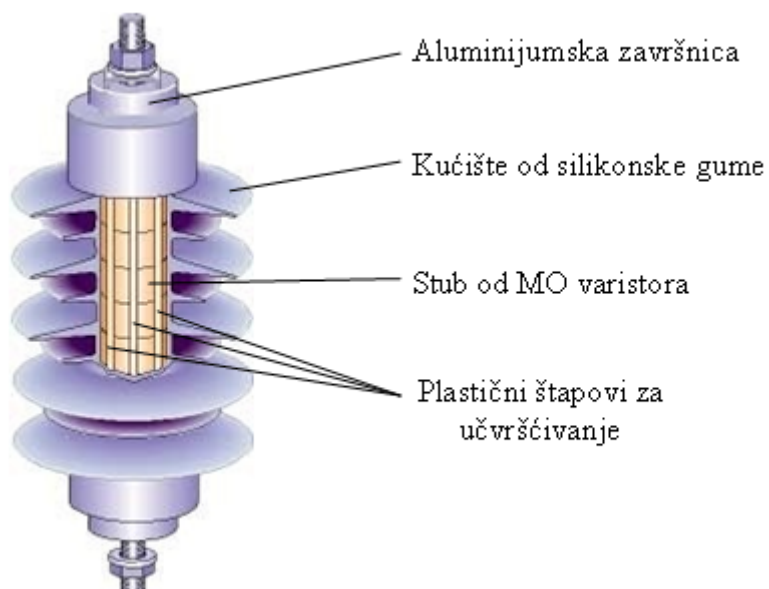
**Slika 26.4.**

U-I karakteristike metaloksidnog i silicijumkarbidnog odvodnika

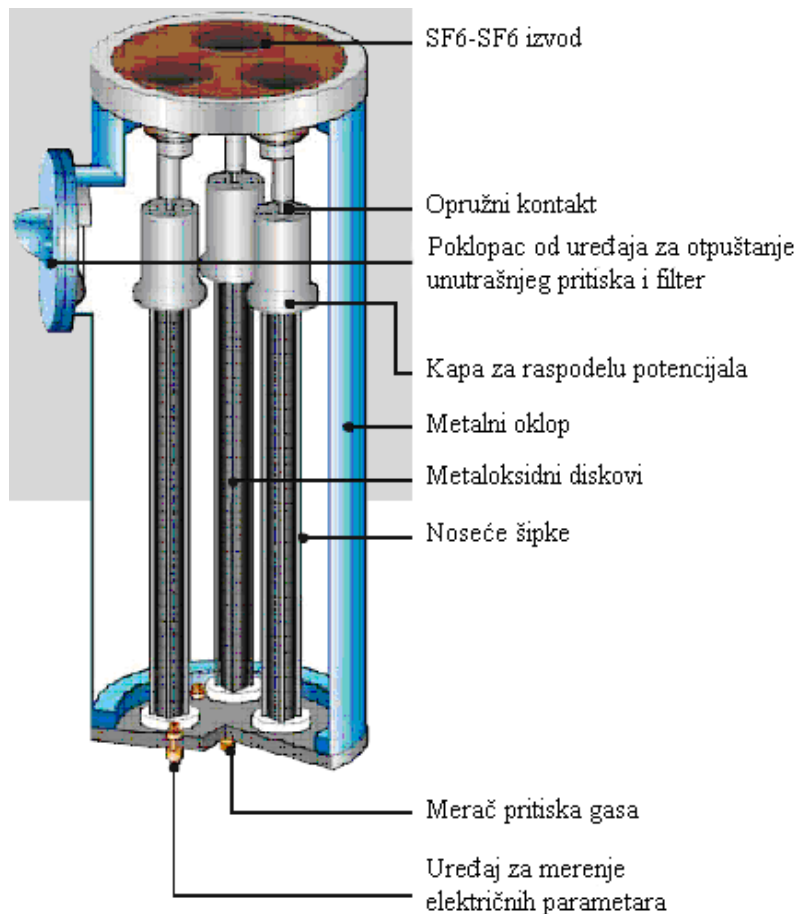
Na narednim slikama prikazano je nekoliko primera MOP-a.



**Slika 26.5.**  
 Uzdužni presek odvodnika sa porcelanskim kućištem



**Slika 26.6.**  
 Distributivni odvodnik sa polimernim kućištem



**Slika 26.7.**  
Trofazni GIS odvodnik prenapona

## 26.4. OSNOVNE VELIČINE VEZANE ZA IZBOR MOP-A

- ✚ Naznačeni napon mreže  $U_n$  - to je dodeljena naznačena vrednost koja određuje naponski nivo mreže. Definiše se kao efektivna vrednost međufaznog napona. Standardne vrednosti naznačenog napona mreže date su u **Tabeli 26.1**.

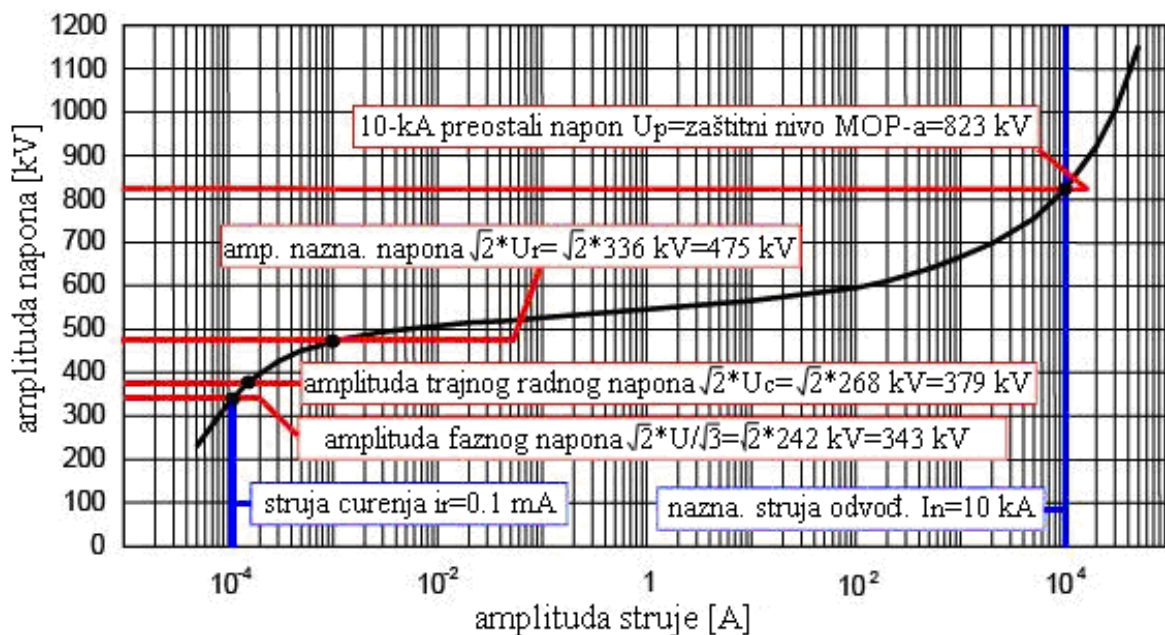
**Tabela 26.1.** Standardne vrednosti naznačenog napona mreže  $U_n$  i najvišeg pogonskog napona mreže  $U_m$

Naznačeni napon mreže $U_n$ [kV]	3	6	10	20	35	60	110	220	400
Najviši pogonski napon mreže $U_m$ [kV]	3,6	7,2	12	24	38	72,5	123	245	420

- ✚ Najviši pogonski napon mreže  $U_m$  - to je maksimalna efektivna vrednost međufaznog napona mreže. Obično je za 5-20 % procenata viši od naznačenog napona mreže. Zavisnost najvišeg pogonskog napona od naznačenog napona mreže data je u **Tabeli 26.1**.
- ✚ Struja odvođenja odvodnika - to je struja koja protiče kroz odvodnik.
- ✚ Naznačena struja odvođenja odvodnika  $I_n$  - to je temena vrednost udarne struje standardnog oblika  $8/20 \mu\text{s}/\mu\text{s}$ . Na osnovu ove vrednosti struje odvodnici se svrstavaju u odgovarajuće klase. Standardne vrednosti naznačene struje odvođenja su: 1.5 kA, 2.5 kA, 5 kA, 10 kA i 20 kA.
- ✚ Preostali napon odvodnika  $U_p$  - to je amplituda napona na priključcima odvodnika kada kroz isti protiče struja odvođenja. Preko ovog napona se definiše zaštitni nivo MOP-a.

- ✚ Naznačeni napon odvodnika  $U_r$  - to je napon koji služi za raspoznavanje odvodnika. Naznačeni napon odvodnika ne predstavlja napon na koji se MOP može trajno priključiti, kao što je to uobičajena definicija kod ostale opreme.
- ✚ Trajni radni napon odvodnika  $U_c$  - to je najviša efektivna vrednost napona na koji se odvodnik može trajno priključiti.
- Referentna struja  $I_{ref}$  - to je amplituda rezistivne komponente struje odvodnika, dovoljno velika da se efekti parazitnih kapacitivnosti mogu zanemariti. Ovu vrednost specificira proizvođač opreme.
- Referentni napon  $U_{ref}$  - to je amplituda napona odvodnika kojoj odgovara referentna struja odvodnika. Ovu vrednost specificira proizvođač opreme.

Na Slici 26.8 prikazane su neke od definisanih veličina radi lakšeg razumevanja.



**Slika 26.8.**

Međusobni odnos radnog faznog napona mreže  $U$ , trajnog radnog napona odvodnika  $U_c$ , naznačenog napona odvodnika  $U_r$  i preostalog napona odvodnika  $U_p$

Uobičajeni odnosi koji među njima vladaju dati su sledećim relacijama:

$$0.75 \cdot U_r \leq U_c \leq 0.8 \cdot U_r$$

$$0.9 \cdot U_{ref} \leq U_r \leq 0.98 \cdot U_{ref}$$

$$U_{ref} \leq U_p$$

## 26.5. IZBOR ODVDNIKA PRENAPONA

Obzirom da se danas koriste samo metaloksidni odvodnici prenapona, opisaćemo proceduru samo za njihov izbor.

- ✚ Izbor trajnog radnog  $U_c$

U mrežama sa izolovanom ili rezonantno uzemljenom neutralno tačkom treba da važi:

$$U_c \geq U_m$$

U efikasno i neefikasno uzemljenim mrežama treba da važi:

$$U_c \geq 1.05 \frac{U_m}{\sqrt{3}}$$

Koeficijent 1.05 uzima u obzir eventualno postojanje viših harmonika.

✚ Izbor naznačenog napona  $U_r$

U mrežama sa izolovanom ili rezonantno uzemljenom neutralnom tačkom:

$$U_r \geq 1.25 U_c$$

U mrežama sa efikasno i neefikasno uzemljenom neutralnom tačkom ovaj napon se bira kao veći od dve vrednosti:

$$U_{r1} \geq 1.25 U_c$$

ili

$$U_{r2} \geq \frac{U_{TOV}}{K_{TOV}}$$

gde su:

$U_{TOV}$  – privremeni prenapon,

$K_{TOV}$  – koeficijent koji uvažava sposobnost odvodnika da podnosi privremene prenapone.

Privremeni prenapon određuje se kao:

$$U_{TOV} \geq K_Z U_{mf}$$

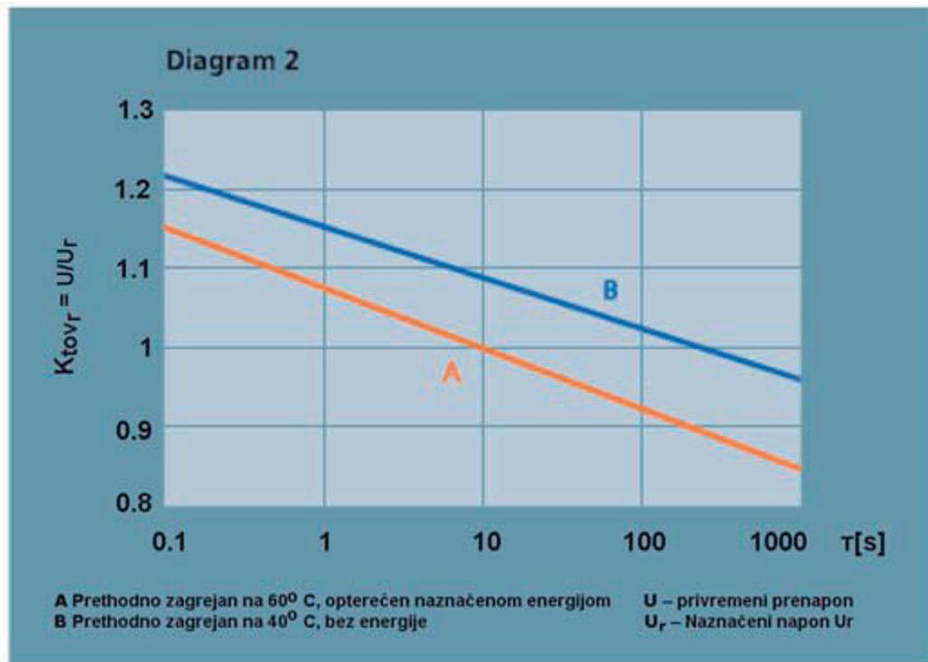
gde su:

$U_{mf}$  – maksimalni fazni napon sistema,

$K_Z$  – faktor zemljospoja koji zavisi od načina uzemljenja neutralne tačke i kreće se od 1.4 za direktno uzemljene mreže do 1.73 za mreže sa izolovanom neutralnom tačkom, dok je za mreže uzemljene preko impedanse između 1.4 i 1.73.

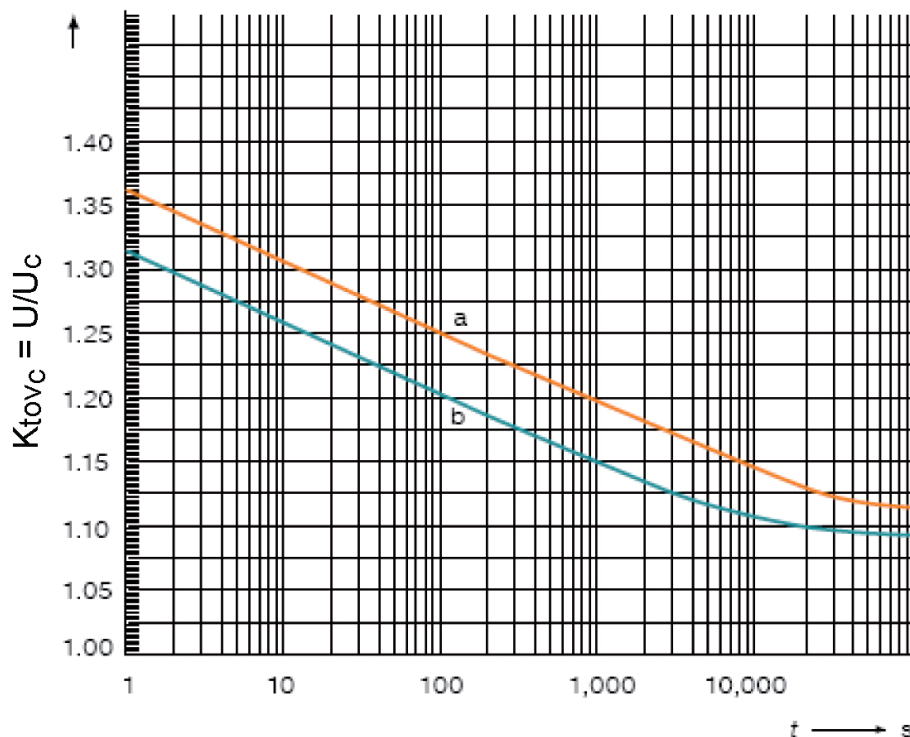
$K_{TOV}$  se očitava sa dijagrama koji daje proizvođač odvodnika. Tipičan izgled ove karakteristike dat je na **Slici 26.9**. Neki proizvođači ovu karakteristiku daju u odnosu na  $U_c$ , kao što je prikazano na **Slici 26.10**. Tada očitani koeficijent  $K_{TOVc}$  treba svesti na  $K_{TOV}$  preko izraza:

$$K_{TOV} = 0.8 K_{TOVc}$$



**Slika 26.9.**

Karakteristika podnosivog napona industrijske učestanosti u funkciji vremena za MOP tipa 3EL2, proizvodnje Siemens, u odnosu na naznačeni napon  $U_r$



**Slika 26.10.**

Karakteristika podnosivog napona industrijske učestanosti u funkciji vremena za MOP tipa MWK, proizvodnje ABB, u odnosu na trajni radni napon  $U_c$ : a) bez prethodnog opterećenja, b) sa prethodnim opterećenjem garantovano energijom  $W'$

Trajanje privremenih prenapna određeno je podešenjem reagovanja relejne zaštite i prekidača. Ukoliko ovo vreme nije poznato usvaja se 3 s za prenosne mreže i 10 s za distributivne.

Naznačeni napon odvodnika u mrežama sa efikasno i neefikasno uzemljenom neutralnom tačkom bira se kao veći od dve vrednosti:

$$U_r \geq (U_{r1}, U_{r2})$$

✚ Izbor naznačene struje odvođenja (izbor klase odvodnika)

U **Tabeli 26.2** date su naznačene struje odvođenja (klase odvodnika) i opsezi naznačenih napona za koje se ove klase vezuju. U našoj praksi koristi se klasa 10 kA za sve naponske nivoe.

**Tabela 26.2.** Klasifikacija struja odvođenja odvodnika prenapona

Klasa odvodnika $I_n$ (A)	2500	5000	10000	20000
Naznačeni napon $U_r$ (kV)	$U_r \leq 36$	$U_r \leq 132$	$3 \leq U_r \leq 360$	$360 \leq U_r \leq 756$

✚ Provera zaštitnog nivoa

Odvodnik omogućava odgovarajući zaštitni nivo ako je ispunjen uslov:

$$\frac{U_{pod}}{U_{10kA}} > 1.4$$

gde su:

$U_{pod}$  – podnosivi atmosferski napon opreme (dat u **Tabeli 20.1**),

$U_{10kA}$  – preostali napon odvodnika za naznačenu struju odvođenja (u ovom slučaju 10 kA), koji daje proizvođač odvodnika.

✚ Određivanje klase rasterećenja voda

Klasa rasterećenja voda predstavlja sposobnost odvodnika da apsorbuje određenu količinu energije. Klasa rasterećenja voda određuje se na osnovu pretpostavke da se na dugom vodu usled sklopnih operacija javlja sklopni prenapon, koji se zatim u obliku putujućeg talasa rasterećuje kroz priključeni odvodnik. Amplituda strujnog talasa nastalog tom prilikom određena je amplitudom sklopnog prenapona i karakterističnom impedansom voda, dok je trajanje određeno dužinom voda i brzinom prostiranja elektromagnetskih talasa. Standard definiše pet različitih klasa rasterećenja voda, koje se označavaju brojevima od 1 do 5. Veći broj označava bolju sposobnost apsorpcije energije.

✚ Izbor kućišta odvodnika

Na izbor kućišta odvodnika utiču: statička i dinamička naprezanja, nivo zagađenja sredine, struja kratkog spoja na mestu ugradnje odvodnika, kao i oblik spoljašnje površine kućišta.

## 26.6. ODVODNICI PRENAPONA ZA ZAŠTITU NEUTRALNE TAČKE TRANSFORMATORA

Trajni radni napon odvodnika u zvezdištu transformatora određuje se u zavisnosti od načina uzemljenja neutralne tačke sistema.

Za izolovan ili rezonantno uzemljen sistem treba da važi:

$$U_{cn} \geq \frac{U_m}{\sqrt{3}}$$

Za sistem uzemljen preko otpornika velike vrednosti treba da važi:

$$U_{cn} \geq \frac{U_m}{K_{TOVC} \sqrt{3}}$$

Na osnovu trajnog radnog napona  $U_{cn}$  sledi odgovarajući naznačeni napon odvodnika  $U_{rn}$ :

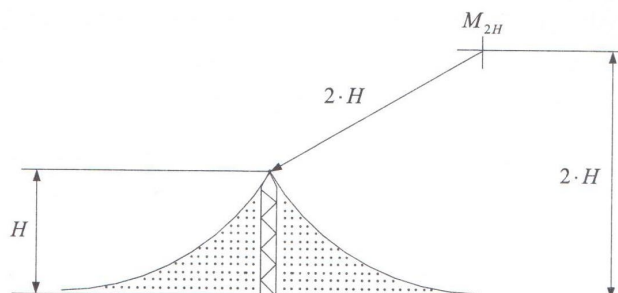
$$U_{rn} \geq 1.25 U_{cn}$$

Sposobnost apsorpcije energije ovih odvodnika treba da bude ista ili veća od one zahtevane za odvodnike postavljene između faznog provodnika i zemlje. Određivanje zaštitnog nivoa i izbor kućišta odvodnika vrši se na isti način kao i za odvodnike koji se priključuju između faznog provodnika i zemlje.

## 26.7. GROMOBRANSKA ZAŠTITA POSTROJENJA

Gromobranska zaštita treba da spreči direktne udare groma u objekte postrojenja. Kao gromobranska zaštita u postrojenjima, koristi se zaštitna užadi i zaštitni šiljci. Za visine užadi i vrhova šiljaka do 25 m, zaštitne zone mogu se odrediti jednostavnim geometrijskim postupcima.

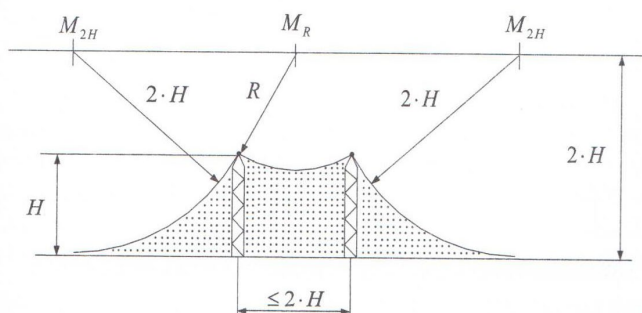
Zaštitna zona užeta, koje se nalazi na visini  $H$  određena je lukom poluprečnika  $2H$ , koji polazi od užeta do površine tla, kao što je prikazano na **Slici 26.11**.



**Slika 26.11.**

Zaštitna zona jednog gromobranskog užeta u ravni normalnoj na osu užeta

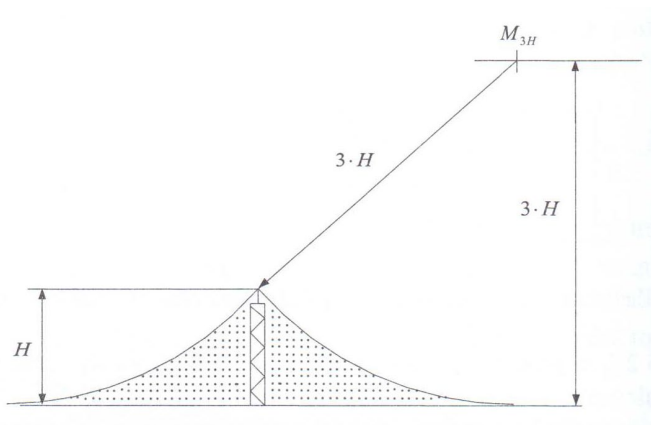
Na **Slici 26.12** prikazana je zaštitna zona koju formiraju dva užeta postavljena paralelno na rastojanju ne većem od  $2H$ . Zaštitna zona između užadi određena je lukom poluprečnika  $R$ , čiji se centar  $M_R$  nalazi na visini  $2H$  na osi simetrije užadi. Spoljašnja zaštitna zona određuje se na isti način kao na **Slici 26.11**.



**Slika 26.12.**

Zaštitna zona dva gromobranska užeta u ravni normalnoj na ose užadi

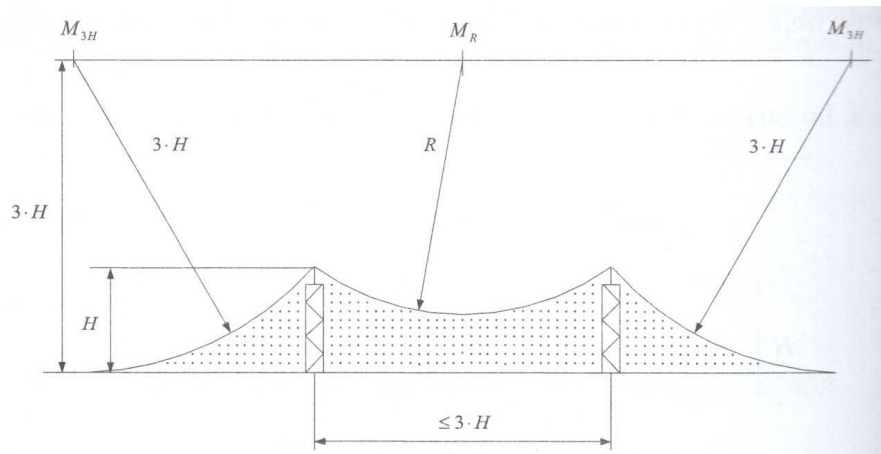
Zaštitna zona jednog gromobranskog šiljka određena je lukom poluprečnika  $3H$ , koji polazi od vrha šiljka do površine tla, kao što je prikazano na **Slici 26.13**. Zaštitna zona je rotaciono simetrična, tj. ista je u svim ravnima koje prolaze kroz osu šiljka.



**Slika 26.13.**

Zaštitna zona jednog gromobranskog šiljka u ravni koja prolazi kroz osu šiljka

Na **Slici 26.14** prikazana je zaštitna zona dva gromobrankska šiljka koji se nalaze na rastojanju ne većem od  $3H$ . Zaštitna zona između šiljaka određena je lukom poluprečnika  $R$ , čiji se centar  $M_R$  nalazi na visini  $3H$  na osi simetrije šiljaka. Spoljašnja zaštitna zona određuje se na isti način kao na **Slici 26.13**.



**Slika 26.14.**

Zaštitna zona dva gromobranskog šiljka u ravni u kojoj se šiljci nalaze