

## 1. IZBOR METALOKSIDNIH ODVODNIKA PRENAPONA

Izbor metaloksidnih odvodnika prenapona (MOP) vrši se na osnovu različitih zahteva i parametara koji utiču na njegove radne karakteristike. Generalni pristup izbora, zasnovan na predlozima datim od strane vodećih svetskih proizvođača [2.1-2.3], ukazuje na svu složenost ovog postupka i potrebu za koordinacijom aktivnosti između projektanta, korisnika i proizvođača odvodnika prenapona.

Uloga proizvođača je dominantna u konfigurisanju odvodnika prenapona, što podrazumeva izbor dimenzija i materijala kućišta, dimenzija rezistora, prstena za raspodelu potencijala i slično. Na osnovu ovog postupka proizvođač je konfigurisao određen broj tipova odvodnika za uobičajene radne uslove i primene u distributivnim i prenosnim mrežama. Karakteristike ovih odvodnika proizvođač objavljuje u prospektima i uputstvima za montažu. Ovako publikovane karakteristike odvodnika olakšavaju projektantu izbor odvodnika s obzirom da nije neophodno poznavanje ovih podataka koje poseduje samo proizvođač. Na osnovu ovih podataka projektant može odabrati odvodnik, a konsultacije su neophodne u slučajevima nestandardnih uslova i specijalnih zahteva [2.1-2.7].

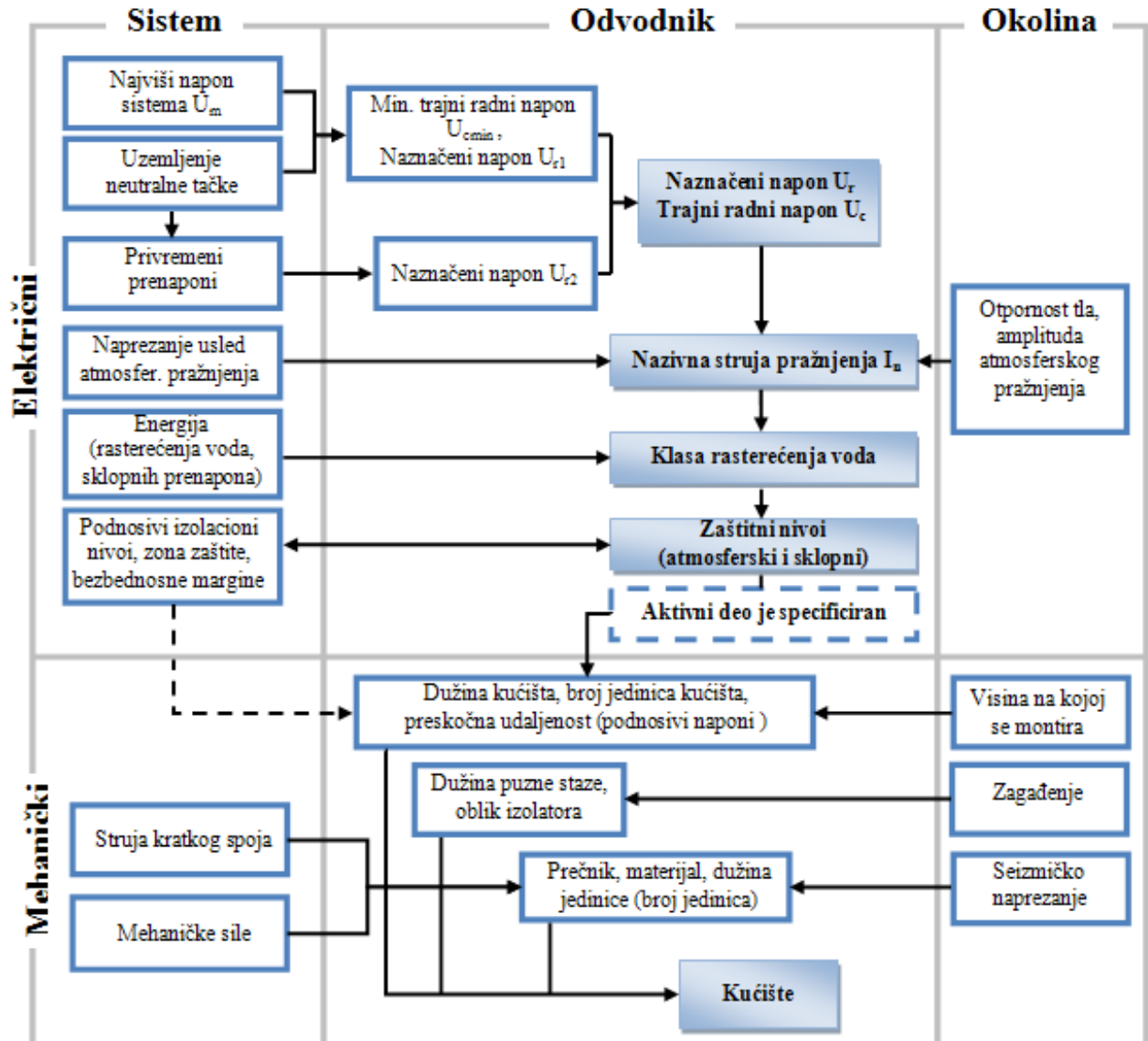
Drugi deo izbora odvodnika neminovno sprovodi projektant na osnovu postupka koji uvažava uticajne faktore kao što su: najviši napon mreže, konfiguracija mreže, način njenog uzemljenja i trajanje privremenih prenapona koji se mogu u toj mreži pojaviti. Postupak izbora odvodnika sa aspekta projektanta, koji je prikazan u [2.1-2.3], odnosi se na standardne uslove i usvajanje podataka o mreži na osnovu tehničkih preporuka, odgovarajućih standarda i iskustva u primeni. U slučajevima potrebe za detaljnim poznavanjem podataka o mreži kao i slučajevima specijalnih primena odvodnika neophodno je sprovesti odgovarajuće studijske analize.

Zahtevi koji se postavljaju u postupku izbora MOP-a mogu se generalno podeliti na električne i mehaničke zahteve. Dijagrami toka izbora MOP-a koje su predložili Siemens [2.1] odnosno ABB [2.2] dati su na Slikama 2.1. i 2.2, respektivno.

Na osnovu prikazanih dijagrama može se zaključiti da oba proizvođača izbor odvodnika prenapona zasnivaju na istim parametrima i pored pojedinih razlika u načinu njihovog određivanja. U električnom smislu to su: trajni radni napon, naznačeni napon, klasa rasterećenja voda, zaštitni nivoi i provera sigurnosnih margina. Sledi izbor odgovarajućeg kućišta za odvodnik prenapona, koje zadovoljava i električne i mehaničke zahteve.

U nastavku su prikazani aspekti izbora navedenih ključnih parametara. U inženjerskoj praksi se pod izborom odvodnika prenapona najčešće podrazumeva izbor njegovog naznačenog napona. Pravilno izabran naznačeni napon diktira odgovarajuće zaštitne karakteristike, s jedne strane, i stabilan rad odvodnika prenapona, s druge strane. Odgovarajuće zaštitne karakteristike omogućavaju efikasnu zaštitu distributivnih i prenosnih mreža od prenapona, što se postiže ograničavanjem prenapona na vrednosti koje su niže od podnosivih napona izolacije šticećenih elemenata, i to sa dovoljnom sigurnosnom marginom. Drugi problem projektovanja zaštite distributivnih i prenosnih mreža od prenapona, sa posebnim aspektom na zaštitu energetskih transformatora, odnosi se na sagledavanje broja i mesta postavljanja metaloksidnih odvodnika prenapona, što je detaljno analizirano u različitim primerima iz inženjerske prakse [2.8-2.30].

Izbor odvodnika prenapona predmet je proučavanja odgovarajućih radnih grupa na osnovu kojih su publikovani odgovarajući standardi i tehničke brošure [2.4, 2.5, 2.31, 2.32]. U slučajevima specijalnih zahteva i potrebe za sprovođenjem studijskih analiza neophodno je konsultovati tehničke brošure, od kojih su posebno značajne brošure u izdanju radnih grupa CIGRE (Working Group - WG CIGRE).



Slika 2.1. Dijagram toka izbora MOP-a prema Siemensu [2.1]

Dodatni zahtevi koji se postavljaju pred odvodnike prenapona odnose se na nepromenljivost električnih karakteristika tokom životnog veka i neosetljivost odvodnika na uticaje okoline (zagađenje, sunčevo zračenje, itd).

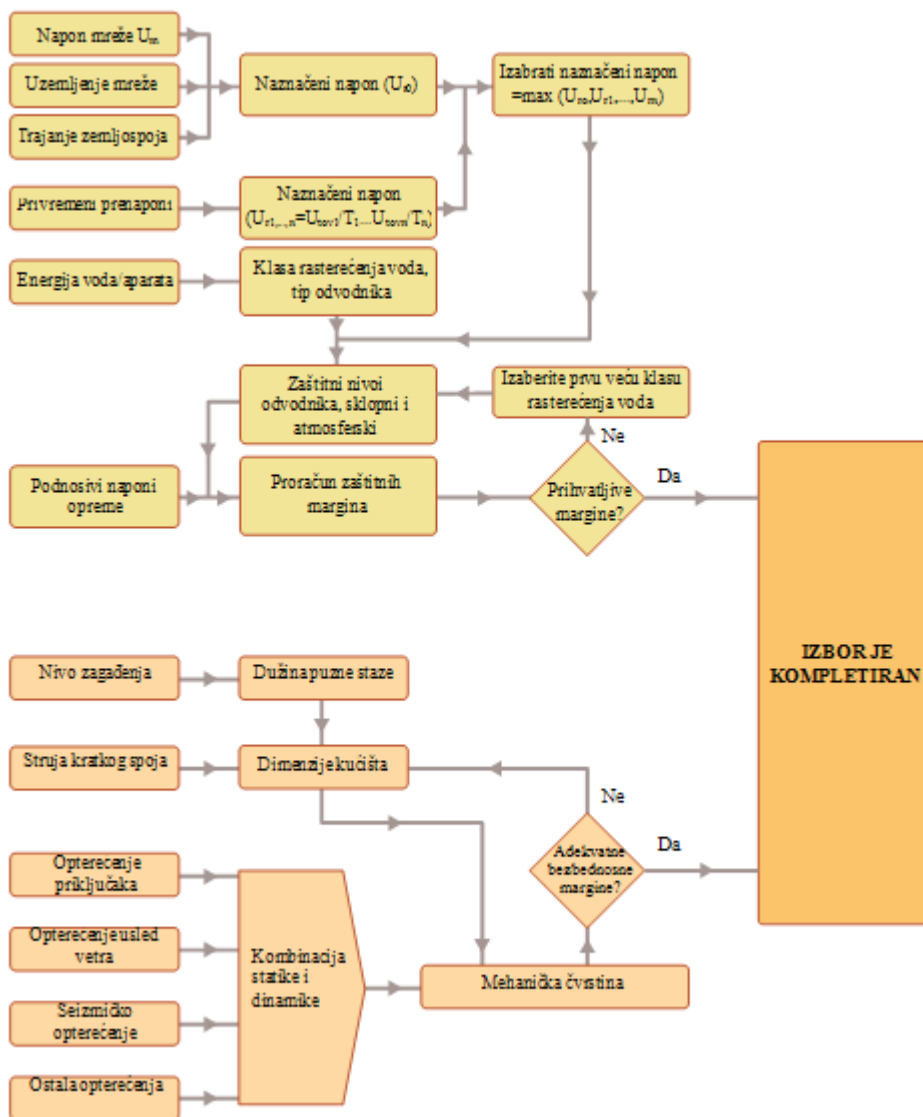
U mehaničkom smislu od odvodnika prenapona zahteva se da bude otporan na razne vrste kratkotrajnih i dugotrajnih mehaničkih naprezanja. Bezbednost osoblja i

ostale opreme u distributivnim i prenosnim mrežama podrazumeva se u slučaju havarije odvodnika prenapona.

U nastavku su detaljno opisani ovi zahtevi i načini njihovog ostvarivanja.

Izbor metaloksidnih odvodnika prenapona prema [2.8] vrši se u tri koraka:

1. Određivanje parametara sistema.
2. Provera nenormalnih uslova rada.
3. Izbor trajnog radnog napona i naznačenog napona.



Slika 2.2. Dijagram toka izbora MOP-a prema ABB-u [2.2]

### 1.1. Određivanje parametara sistema

Najvažniji parametar sistema je maksimalni dozvoljeni radni napon  $U_s$  koji je obično 5-10% viši od nazivnog napona sistema. Ovaj napon predstavlja efektivnu vrednost međufaznog napona. Drugi važan faktor odnosi se na visinu i trajanje privremenog prenapona. Pod privremenim prenaponima podrazumevaju se naponi veći

od maksimalnog dozvoljenog radnog napona industrijske učestanosti ili industrijske učestanosti sa superponiranim harmonicima više ili niže učestanosti, čije je trajanje ograničeno. Ovi prenaponi se u literaturi sreću i pod imenom kvazistacionarni ili povremeni (engleski: Temporary Overvoltages - TOV).

Ovi prenaponi nastaju u sledećim slučajevima [2.8]:

- Prenaponi pri zemljospojevima ili drugim kvarovima, posebno u mrežama sa izolovanom neutralnom tačkom.
- Prenaponi pri naglom rasterećenju sistema.
- Prenaponi pri rezonantnim pojavama što podrazumeva da je sopstvena učestanost kola bliska industrijskoj.
- Prenaponi usled ferorezonantnih pojava koje predstavljaju rezonance u kolima sa izraženim nelinearnim karakteristikama magnećenja naponskih mernih ili energetske transformatora.
- Prenaponi pri prekidu jedne ili dve faze što označava nepunofazne režime.

Dok kod izbora SiC odvodnika prenapona nije bilo od važnosti trajanje privremenih prenapona, u slučaju MOP-a ovaj podatak je od izuzetne važnosti. Ako se ne raspolaže tačnim podacima o podešenosti zaštite, prema IEC preporukama usvaja se da je trajanje zemljospoja u prenosnoj mreži do 3 s, a u distributivnoj mreži do 10 s za sisteme sa uzemljenom neutralnom tačkom. Ako sistem radi sa izolovanom neutralnom tačkom, tada trajanje zemljospoja može da bude od nekoliko sekundi do nekoliko dana.

## **1.2. Provera nenormalnih uslova rada**

Ponekad se u uzemljenom sistemu na nekim mestima mogu pojaviti viši prenaponi na neoštećenim faznim provodnicima od očekivanih. Takav slučaj se može sresti pri razemljivanju neutralnih tačaka pojedinih transformatora koji rade paralelno, što dovodi do neefikasno uzemljenog sistema. Ponekad u praksi postoje uslovi za istovremeni nastanak i privremenih prenapona usled zemljospoja i ispada opterećenja, što je neophodno uzeti u obzir prilikom izbora MOP-a.

## **1.3. Izbor trajnog radnog napona i naznačenog napona**

U najvažnije karakteristike MOP-a spadaju:

- Trajni radni napon koji se definiše kao efektivna vrednost maksimalnog radnog napona industrijske učestanosti na koji se odvodnik može trajno priključiti.
- Naznačeni napon odvodnika koji predstavlja napon koji služi za raspoznavanje odvodnika.
- Karakteristika podnosivog napona industrijske učestanosti koja predstavlja krivu efektivne vrednosti napona industrijske učestanosti u funkciji trajanja napona koji odvodnik može da podnese. Ova karakteristika opisuje sposobnost metaloksidnog odvodnika da podnosi privremene prenapone.

U ovom delu prikazan je postupak izbora trajnog radnog napona i naznačenog napona odvodnika prenapona koji omogućava odgovarajuće zaštitne karakteristike, s jedne strane, i stabilan rad MOP-a, s druge strane. U literaturi je ovaj postupak često označen kao preliminarni izbor odvodnika prenapona. Postupci preliminarnog izbora

MOP-a, zasnovani na metodologijama predloženim od strane proizvođača Siemens [2.1] i ABB [2.2, 2.3], dati su u nastavku.

### 1.3.1. Izbor trajnog radnog napona i naznačenog napona prema Siemensu

Da bi odvodnik prenapona bio u stanju da vrši svoju zaštitnu ulogu, potrebno je da tokom trajnog rada funkcioniše bez problema. Prvi korak svodi se na određivanje minimalnog zahtevanog trajnog radnog napona  $U_{cmin}$ . U skladu sa IEC standarima ovaj napon ima engleski naziv Continuous Operating Voltage (COV), dok se u anglo-američkoj literaturi trajni radni napon naziva Maximum Continuous Operating Voltage (MCOV).

Trajni radni napon predstavlja specificiranu dozvoljenu efektivnu vrednost napona industrijske učestanosti koja se može trajno dovesti na priključke odvodnika. Ovaj napon je za najmanje 5% viši od vrednosti najvišeg faznog napona sistema  $U_{mf}$  (međufazni napon ima oznaku  $U_s$ ). Najmanje 5% se dodaje zbog mogućih viših harmonika u mreži koji mogu da povećaju maksimalnu vrednost napona. Kada se radi o izboru odvodnika za distributivne mreže umesto 5% koristi se rezerva od 10%. Prema [2.1] trajni napon predstavlja svaki napon koji traje duže od 30 min. Pri ovom naponu neophodno je da odvodnik radi bez ikakvih ograničenja. Za njegovo određivanje ključan je način uzemljenja neutralne tačke sistema. U slučaju efikasno uzemljene mreže, minimalni trajni radni napon mora da bude jednak ili viši od najvišeg faznog napona sistema, uvećanog za 5%. S druge strane, u slučaju mreža sa izolovanom ili rezonantno uzemljenom neutralnom tačkom, naponi neoštećenih faznih provodnika pri jednofaznom zemljospoju dobijaju vrednost međufaznog napona (koeficijent zemljospoja iznosi  $K_Z=1,73$ ). S obzirom da takav rad kod ovih sistema može uobičajeno da traje više od trideset minuta, minimalni radni napon odvodnika određuje se da je jednak ili viši od međufaznog napona sistema  $U_s$ , s tim što se dodatnih 5% ovde ne uzima u obzir.

Na osnovu izloženog, prema Siemensu [2.1], određivanje minimalnog trajnog radnog napona vrši se prema izrazima datim u Tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Određivanje minimalnog trajnog radnog napona prema Siemensu

Efikasno uzemljen sistem	Izolovan ili rezonantno uzemljen sistem
$U_{cmin} \geq 1,05 \cdot \frac{U_s}{\sqrt{3}}$	$U_{cmin} \geq U_s$

Oznaka  $U_s$  predstavlja maksimalno dozvoljen međufazni napon sistema.

Sledi izbor naznačenog napona odvodnika  $U_r$  (engleski naziv: Rated Voltage - RV). U nastavku date su dve definicije naznačenog napona odvodnika. Prema [2.5], naznačeni napon odvodnika predstavlja napon u trajanju 10 s, kojim se proverava stabilnost posle primene udara struje velike amplitude ili dugog trajanja. S druge strane, naznačeni napon odvodnika predstavlja najvišu dozvoljenu efektivnu vrednost napona industrijske učestanosti između priključaka odvodnika, pri kojoj je on predviđen da radi u uslovima prenapona.

Naznačeni napon odvodnika određuje se na osnovu dva kriterijuma. Prema prvom kriterijumu, ovaj napon određuje se na osnovu trajnog radnog napona  $U_s$ , za većinu odvodnika svetskih proizvođača, on je oko 1,25 puta veći od trajnog radnog napona. S obzirom da je taj broj empirijski, proizvođači u svojim katalogima eksplicitno daju naznačeni napon i trajni radni napon.

Prema Siemensu [2.1], u slučaju da je koeficijent 1,25, naznačeni napon se određuje prema izrazima datim u Tabeli 2.2.

Tabela 2.2. Određivanje naznačenog napona na osnovu trajnog radnog napona prema Siemensu

Efikasno uzemljen sistem	Izolovan ili rezonantno uzemljen sistem
$U_{r1} \geq 1,25 \cdot U_{cmin} = 1,25 \cdot 1,05 \cdot \frac{U_s}{\sqrt{3}}$	$U_{r1} \geq 1,25 \cdot U_{cmin} = 1,25 \cdot U_s$

Dalje je potrebno odrediti naznačeni napon odvodnika prenapona  $U_{r2}$  prema drugom kriterijumu. Ovaj napon određuje se na osnovu privremenog prenapona primenom sledećeg izraza:

$$U_{r2} = \frac{U_{TOV}}{K_{TOV}} \quad (2.1)$$

gde su:  $U_{TOV}$  – privremeni prenapon,  $K_{TOV}$  - koeficijent koji uvažava sposobnost odvodnika da podnosi privremene prenapone.

Potrebno je napomenuti da, kada su u pitanju mreža sa izolovanom neutralnom tačkom ili mreža sa rezonantno uzemljenom neutralnom tačkom, odvodnik je već izabran tako da privremeni prenapon, jednak međufaznom naponu sistema  $U_s$ , podnosi trajno. Iz tog razloga kriterijum privremenih prenapona nije od značaja za mreže sa izolovanom neutralnom tačkom odnosno rezonantno uzemljenom neutralnom tačkom.

U nastavku je opisan postupak određivanja  $U_{TOV}$  i  $K_{TOV}$ . Privremeni prenapon  $U_{TOV}$  se može odrediti studijskim analizama. Međutim, u praksi se često koristi postupak za slučaj kada nije poznata tačna vrednost privremenog prenapona. On se određuje na osnovu proizvoda faktora zemljospoja  $K_Z$  i maksimalnog radnog faznog napona sistema  $U_{mf}$ :

$$U_{TOV} = K_Z \cdot U_{mf} \quad (2.2)$$

Faktor zemljospoja  $K_Z$  definiše se kao odnos između napona na neoštećenom faznom provodniku prema zemlji na mestu ugradnje odvodnika i napona prema zemlji u normalnom radnom režimu na istom mestu. Ovaj faktor zavisi, pre svega, od načina uzemljenja neutralne tačke i od parametara mreže, posebno od odnosa nulte i direktne reaktanse mreže  $X_0/X_d$ . Faktor zemljospoja iznosi 1,4 za direktno uzemljene mreže, 1,73 za mreže sa izolovanom neutralnom tačkom, a između 1,4 i 1,73 za mreže uzemljene preko impedanse. U literaturi su dati i odgovarajući dijagrami za izračunavanje koeficijenta zemljospoja u mrežama [2.5, 2.31].

Koeficijent  $K_{TOV}$  određuje se na osnovu karakteristike podnosivog napona industrijske učestanosti u funkciji vremena. Ovu karakteristiku ispituje proizvođač odvodnika i ona pokazuje koliki privremeni prenapon odvodnik može da podnese u funkciji trajanja prenapona, uz uslov očuvanja termičke stabilnosti. Tipičan izgled ove

karakteristike dat je na Slici 2.3. Ova karakteristika preuzeta je iz kataloga [2.33] i odnosi se na metaloksidne odvodnike tipa 3EL2, proizvodnje Siemens. Karakteristika je data u odnosu na naznačeni napon  $U_r$ .

Na osnovu dijagrama prikazanih na Slikama 2.3.a i 2.3.b može se uočiti da je na ordinatnoj osi koeficijent  $K_{TOV}$ . On predstavlja multipl naznačenog napona odvodnika odnosno izražava se u relativnim jedinicama u odnosu na naznačeni napon odvodnika  $U_r$ . Na apscisnoj osi dato je trajanje privremenih prenapona. Standardom [2.5] zahteva se da  $K_{TOV}$  za 10 s bude jednak jedinici, što odgovara krivoj A dijagrama 2 na Slici 2.3.b. Međutim, odvodnik prenapona čija karakteristika je prikazana na krivoj A dijagrama 1 na Slici 2.3.a, može podneti viši privremeni prenapon nego što se zahteva standardom [2.5], s obzirom da je koeficijent  $K_{TOV}$  za 10 s veći od jedinice.

Postavlja se pitanje za koju temperaturu i trajanje privremenih prenapona očitati vrednost koeficijenta  $K_{TOV}$ ? Kriva B i kriva A na Slikama 2.3.a i 2.3.b odnose se na temperaturu od 40°C odnosno 60°C na koju je prethodno odvodnik zagrejan u trenutku nastanka privremenog prenapona. Teži uslovi odnose se na donju krivu (kriva A), pa se preporučuje njeno korišćenje.

Ovde je potrebno napomenuti da prilikom izbora odvodnika prenapona postoje dva načina predstavljanja koeficijenta podnošenja privremenih prenapona u funkciji njihovog trajanja. To su:

- u odnosu na naznačeni napon odvodnika prenapona  $U_r$ :

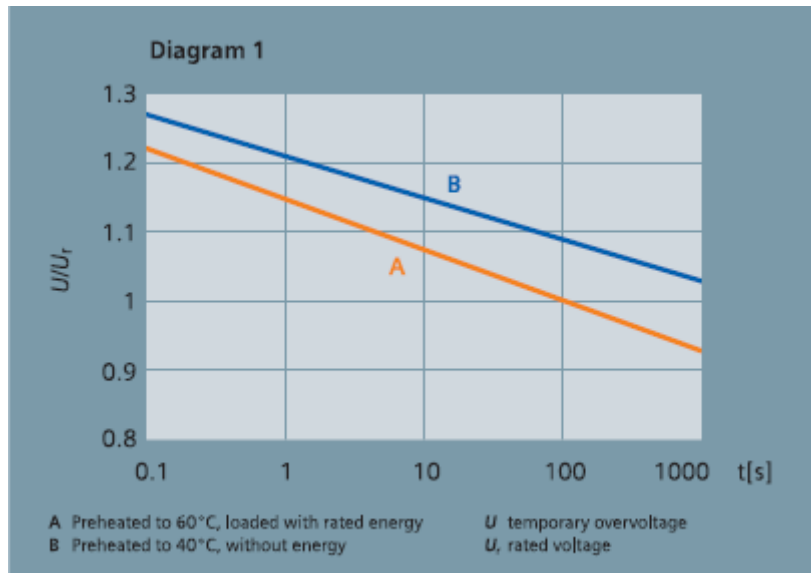
$$K_{TOV_r} = \frac{U_{TOV}}{U_r} \quad (2.3)$$

gde  $K_{TOV_r}$  predstavlja koeficijent podnošenja privremenih prenapona u relativnim jedinicama u odnosu na naznačeni napon odvodnika prenapona  $U_r$ . Ovaj postupak odgovara prikazu datom na Slici 2.3;

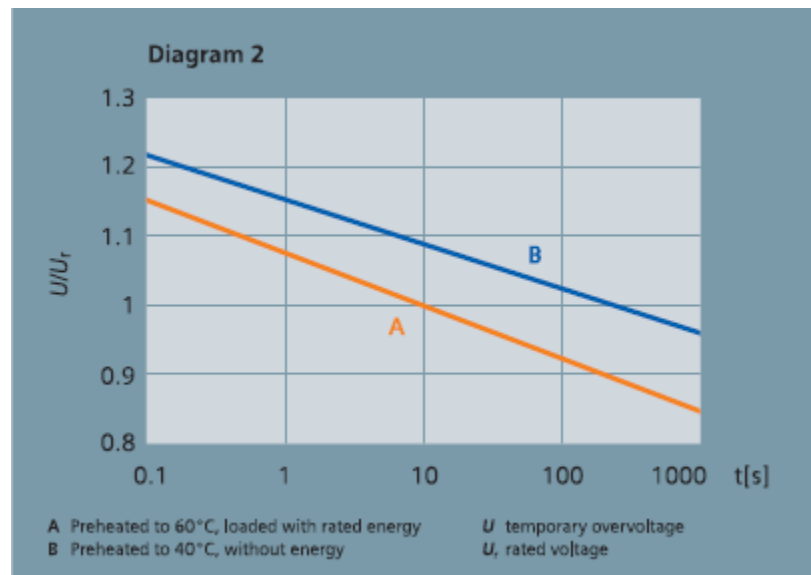
- u odnosu na trajni radni napon  $U_c$ :

$$K_{TOV_c} = \frac{U_{TOV}}{U_c} \quad (2.4)$$

gde  $K_{TOV_c}$  predstavlja koeficijent podnošenja privremenih prenapona u relativnim jedinicama u odnosu na trajni radni napon  $U_c$ . Ovaj postupak odgovara prikazu datom u uputstvu [2.3] i na Slici 2.4.



a)



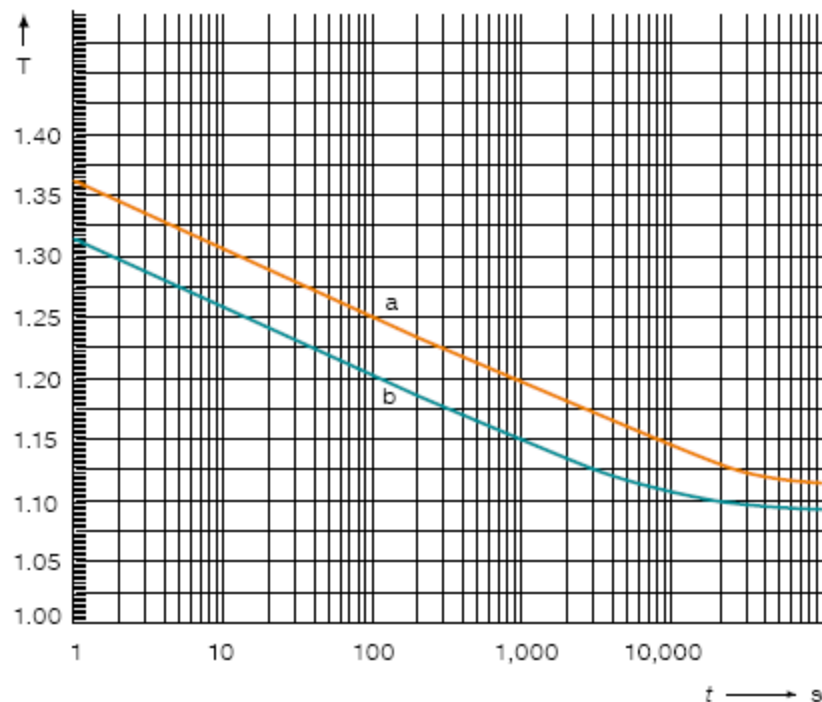
b)

Slika 2.3. Karakteristika podnosivog napona industrijske učestanosti u funkciji vremena za MOP tipa 3EL2 u odnosu na naznačeni napon  $U_r$  [2.33]; a)  $K_{TOV}$  za 10 s veći od 1 – kriva A; b)  $K_{TOV}$  za 10 s jednak 1 – kriva A

Za odvodnik razmatranog proizvođača koeficijent podnošenja privremenih prenapona u odnosu na naznačeni napon odvodnika prenapona  $U_r$  je 0,8 puta manji u odnosu na odgovarajući koeficijent u odnosu na trajni radni napon  $U_c$ :

$$K_{TOV_r} = 0,8 \cdot K_{TOV_c} \quad (2.5)$$





Slika 2.4. Karakteristika podnosivog napona industrijske učestanosti u funkciji vremena za MOP tipa MWK, proizvodnje ABB [2.3], u odnosu na trajni radni napon  $U_c$ ; a) Bez prethodnog opterećenja; b) Sa prethodnim opterećenjem garantovanom energijom  $W$

O relaciji (2.5) potrebno je voditi računa s obzirom da isti proizvođač u svojim uputstvima prikazuje karakteristike koje su određene na oba načina [2.2, 2.3].

Što se trajanja privremenih prenapona tiče, ono je određeno načinom uzemljenja neutralne tačke i podešenjem reagovanja relejne zaštite i prekidača. Kratak spoj u mreži traje do 3 s u prenosnim mrežama, odnosno do nekoliko sekundi u distributivnim mrežama, kada je neutralna tačka uzemljena direktno ili preko otpornika. Ukoliko u uzemljenim mrežama nije poznato koliko traje zemljospoj, treba smatrati da vreme trajanja kvara iznosi 10 s. Koeficijent  $K_{TOV}$  očitava se za stvarno trajanje kvara, kada je to vreme poznato, ili za  $t=10$  s, kada nije.

Na osnovu očitanoeg koeficijenta  $K_{TOV}$  i izračunatog privremenog prenapona  $U_{TOV}$ , primenom (2.1), određuje se naznačeni napon odvodnika prema kriterijumu privremenih prenapona. Potrebno je napomenuti da je, u slučajevima mreže sa izolovanom neutralnom tačkom ili mreže sa rezonantno uzemljenom neutralnom tačkom, odvodnik već izabran tako da privremeni prenapon koji je jednak međufaznom naponu sistema  $U_s$  podnosi trajno. Iz tog razloga kriterijum privremenih prenapona nije od značaja za mreže sa izolovanom neutralnom tačkom odnosno rezonantno uzemljenom neutralnom tačkom.

Završni korak u izboru naznačenog napona odvodnika svodi se na izbor naznačenog napona na osnovu najvišeg naznačenog napona odvodnika između  $U_{r1}$  i  $U_{r2}$ :

$$U_r \geq \max(U_{r1}, U_{r2}) \quad (2.6)$$

Ukoliko postoje i drugi privremeni prenaponi, mogu se odrediti i drugi naznačeni naponi odvodnika u odnosu na te prenapone.

Prema [2.4] preporučuje se da standardne vrednosti naznačenog napona budu brojevi deljivi sa 3 ili 6. Na osnovu prikazanih odvodnika u prospektu proizvođača, potrebno je izabrati prvi odvodnik većeg naznačenog napona. Na osnovu tako određenog naznačenog napona određuje se trajni radni napon primenom izraza:

$$U_c = \frac{U_r}{1,25} \quad (2.7)$$

Zbog stabilnosti rada odvodnika, obično se bira neka od većih vrednosti naznačenog napona, a vodeći računa o neophodnom stepenu zaštite koji je potrebno postići za štice elemente distributivnih i prenosnih mreža. Ova preporuka ima poseban značaj kada se radi o obezbeđivanju dodatne zaštite u sredinama sa visokim nivoom zagađenja ili u slučajevima neočekivano visokih prenapona.

### 1.3.2. Izbor trajnog radnog napona i naznačenog napona prema ABB-u

Postupak za preliminarni izbor odvodnika prenapona prema ABB-u dat je u uputstvima [2.2, 2.3]. U nastavku je prikazan ovaj postupak za odvodnike u sredjenaponskim mrežama [2.3]. Prema ovom postupku, bira se trajni radni napon  $U_c$ , a na osnovu njegove vrednosti i kataloških podataka, sledi odgovarajući naznačeni napon odvodnika  $U_r$ .

Trajni radni napon  $U_c$  određuje se na sledeći način u zavisnosti od načina uzemljenja neutralne tačke sistema [2.3]:

a) Izolovan ili rezonantno uzemljen sistem

$$U_c \geq U_s \quad (2.8)$$

b) Sistem uzemljen preko otpornika velike vrednosti otpornosti

$$U_c \geq \frac{U_s}{K_{TOVc}} \quad (2.9)$$

gde je  $K_{TOVc}$  – koeficijent podnošenja privremenih prenapona u odnosu na trajni radni napon  $U_c$ .

c) Sistem uzemljen preko otpornika male vrednosti otpornosti ili efikasno uzemljen sistem ( $K_Z \leq 1,4$ )

$$U_c \geq \frac{K_Z \cdot U_s}{K_{TOVc} \cdot \sqrt{3}} = \frac{1,4 \cdot U_s}{K_{TOVc} \cdot \sqrt{3}} \quad (2.10)$$

Proračun trajnog radnog napona prema (2.10) vrši se samo uz uslov da je koeficijent zemljospoja  $K_Z \leq 1,4$ , što je neophodno proveriti za sistem uzemljen preko otpornika male vrednosti otpornosti.

d) Sistem uzemljen preko otpornika male vrednosti otpornosti koji nema ravnomerno vrednost  $K_Z \leq 1,4$

Prema [2.3], za slučajeve:

- odvodnika koji su locirani nekoliko kilometara od transformatora,
- kablovskog voda povezanog sa nadzemnim vodom kada se kablovska uvodnica štiti odvodnikom prenapona,
- tla velike specifične električne otpornosti,

neophodno je uvažiti činejnicu da u slučaju kvara neoštećeni fazni provodnici dobijaju napon vrlo blizak međufaznom naponu sistema  $U_s$ .

U tim slučajevima trajni radni napon određuje se primenom izraza (2.9), koji odgovara sistemu uzemljenom preko otpornika velike vrednosti otpornosti (slučaj 2.3.2.b):

$$U_c \geq \frac{U_s}{K_{TOVc}} \quad (2.11)$$

gde je  $K_{TOVc}$  – koeficijent podnošenja privremenih prenapona u odnosu na trajni radni napon  $U_c$ .

Ako je struja kvara mala, pa nema automatskog isključenja, trajni radni napon odvodnika prenapona se, umesto primenom (2.11), određuje iz izraza:

$$U_c \geq U_s \quad (2.12)$$

e) Sistem uzemljen preko otpornika male vrednosti otpornosti za  $K_Z > 1,4$

U ovom slučaju, trajni radni napon određuje se iz izraza:

$$U_c \geq \frac{1,05 \cdot U_s}{K_{TOVc}} \quad (2.13)$$

Faktor 1,05 predstavlja faktor rezerve u izboru trajnog radnog napona odvodnika prenapona.

U svim razmatranim slučajevima, na osnovu izračunatog trajnog radnog napona  $U_c$  bira se veća vrednost iz kataloga, a na osnovu nje, odgovarajuća kataloška vrednost naznačenog napona odvodnika  $U_r$ .

#### 1.4. Provera zaštitnih nivoa

Izborom naznačenog napona odvodnika definisane su karakteristike odvodnika. Jedna od najvažnijih karakteristika odvodnika predstavlja zavisnost preostalog napona za nazivnu struju odvođenja. To je struja oblika 8/20  $\mu$ s. U Tabeli 2.3 dati su primeri najviših vrednosti preostalih napona za struje odvođenja talasa za odvodnik tipa 3EL2, proizvodnje Siemens [2.33]. Podaci se odnose na odvodnike prenapona u sistemu najvišeg napona 24 kV.

Tabela 2.3. Najviše vrednosti preostalih napona za struje odvođenja talasa za odvodnik tipa 3EL2, proizvodnje Siemens [2.33]

Highest voltage for equipment	Standard lightning impulse withstand voltage	Rated voltage	Continuous operating voltage	Line discharge class	Long-duration current 2 ms	Maximum values of the residual voltages at discharge currents of the following Impulses					
						8/20 $\mu$ s 5 kA	8/20 $\mu$ s 10 kA	8/20 $\mu$ s 20 kA	30/60 $\mu$ s 0,5 kA	30/60 $\mu$ s 1 kA	30/60 $\mu$ s 2 kA
$U_m$ kV	BIL min kV	$U_r$ kV	$U_c$ kV	LD-CI	A	kV	kV	kV	kV	kV	kV
24	95	21	16,8	2	850	45,4	48,3	53,6	38,6	39,6	41,5
	95	21	16,8	3	850	47,4	50,4	55,9	40,3	41,3	43,3
	95	21	16,8	3	1200	44,5	47,3	52,0	38,3	39,3	41,2
	95	21	16,8	4	1200	47,4	50,4	55,4	40,8	41,8	43,8
	125	30	24,0	2	850	64,9	69,0	76,6	55,2	56,6	59,3
	125	30	24,0	3	850	67,7	72,0	79,9	57,6	59,0	61,9
	125	30	24,0	3	1200	63,5	67,5	74,3	54,7	56,0	58,7
	125	30	24,0	4	1200	67,7	72,0	79,2	58,3	59,8	62,6

Na osnovu podataka prikazanih u Tabeli 2.3 može se zaključiti sledeće:

1. Za najviši napon sistema  $U_m = 24 \text{ kV}$  postoji oprema sa minimalnim standardnim podnosivim atmosferskim naponom  $U_{pod}$  (engleski: Basic Insulation Level -BIL) od 95 kV i 125 kV.
2. U zavisnosti od standardnog podnosivog atmosferskog napona naznačen napon odvodnika iznosi 21 kV odnosno 30 kV.
3. Za jedan isti standardni podnosivi atmosferski napon i jedan isti naznačen napon odvodnika postoje različite klase rasterećenja voda o čemu će biti više reči u nastavku. U prikazanom slučaju postoje klase rasterećenja voda 2, 3 i 4 koje se odlikuju dugotrajnom strujom različitog intenziteta i različitim karakteristikama preostalog napona u funkciji struje odvođenja talasa.

Iz Tabele 2.3 se za odabran odvodnik prenapona očita vrednost preostalog napona za nazivnu struju odvođenja 10 kA, 8/20  $\mu\text{s}$  ( $U_{10 \text{ kA}, 8/20 \mu\text{s}}$ ). Odvodnik omogućava odgovarajući zaštitni nivo ako je ispunjen uslov [2.1]:

$$\frac{U_{pod}}{U_{10 \text{ kA}, 8/20 \mu\text{s}}} > 1,4 \quad (2.14)$$

gde su:  $U_{pod}$  – standardni podnosivi atmosferski napon,  $U_{10 \text{ kA}, 8/20 \mu\text{s}}$  - vrednost preostalog napona za nazivnu struju odvođenja 10 kA, 8/20  $\mu\text{s}$ . U razmatranom slučaju uslov (2.14) se menja od  $95/48,3=1,97$  (prva vrsta Tabele 2.3) do  $125/72=1,74$  (poslednja vrsta Tabele 2.3).

Uslov (2.14) je posledica provere koja se odnosi na odvodnik prenapona, a ne na štice objekat. Napon na štice objekat biće viši zbog putujućih talasa, padova napona na induktivnim spojnima vezama odvodnika i porasta preostalog napona pri primeni talasa veće strmine u odnosu na primenu strujnog talasa standardne strmine.

S druge strane, u mrežama napona 400 kV i više, uloga sklopnih prenapona postaje dominantna za izbor odvodnika prenapona. Sklopni udarni zaštitni nivo definiše se kao najviši preostali napon pri utvrđenim sklopnim udarnim strujama oblika 30/60  $\mu\text{s}$ . Ovaj nivo se može proveriti na osnovu podataka datih u katalogu. Na osnovu podataka iz Tabele 2.3 može se zaključiti da se ovaj zaštitni nivo kreće od 41,5 kV, što odgovara prvoj vrsti, do 62,6 kV, što odgovara poslednjoj vrsti razmatranog slučaja.

U slučaju sklopnih prenapona nije potrebno uzeti koeficijent rezerve zbog talasnih procesa i induktivnosti spojnih veza odvodnika s obzirom da se radi o sporijim procesima od atmosferskih. Prema [2.1], sklopni udarni zaštitni nivo odvodnika ne mora biti niži od standardnog sklopnog podnosivog napona opreme sa čvrstom izolacijom, podeljenog faktorom 1,15 kao koeficijentom sigurnosti prema [2.34].

Pored navedenih zaštitnih nivoa, preostali napon za strmu udarnu struju je potrebno proveriti u nekim specijalnim primenama. Radi se o udarnoj struji oblika 1/2  $\mu\text{s}$ .

## 1.5. Izbor nazivne struje odvođenja

Nazivna struja odvođenja predstavlja temenu vrednost udarne struje oblika 8/20  $\mu\text{s}$  i služi za razvrstavanje odvodnika. Pored ovog podatka važna je i klasa rasterećenja voda. Odvodnik čija je nazivna struja odvođenja 10 kA može imati klasu rasterećenja 1, 2 ili 3, što bitno utiče na njegov izgled. Oznaka 8/20  $\mu\text{s}$  predstavlja odnos konvencionalnog vremena čela udarne struje i konvencionalnog vremena trajanja udarne struje. Postupak određivanja ovih vremena prikazan je u [2.4, 2.5, 2.8].

Određivanju nazivne struje odvođenja  $I_n$  prethodi procena amplitude očekivane struje odvođenja kroz odvodnik. Prema [2.5, 2.8] ona zavisi od sledećih faktora:

1. Složenosti postrojenja i naznačenog napona sistema.
2. Da li su prilazni vodovi snabdeveni zaštitnim užadima. U slučaju da su prilazni vodovi snabdeveni zaštitnim užadima samo ispred postrojenja, očekivana struja zavisi od dužine zaštitne zone ispred postrojenja.
3. Udarne impedanse uzemljenja prilaznih stubova. Ako je vrednost udarne impedanse stubova ispred postrojenja velika, postoji opasnost od povratnog preskoka pri udaru groma u vrh stuba ili zaštitno uže.
4. Broj priključenih vodova na sabirnice postrojenja. Što je veći broj priključenih vodova, upadni strujni talas koji nailazi po jednom prilaznom vodu, deli se na više delova u tački priključenja (sabirnice). Jedan od tih delova je i struja koja protiče kroz sam odvodnik.
5. Podnosivi napon izolacije prilaznih vodova – ako je amplituda prenaponskog talasa veća od podnosivog napona izolacije prilaznih vodova, dolazi do preskoka na jednom ili više izolatora na vodu čime se najveći deo energije pražnjenja odvodi u zemlju. Nadalje samo prenaponi ograničeni preskočnim naponom izolatora i sa smanjenom energijom stižu do postrojenja, gde ih odvodnici dodatno ograničavaju i njihovu preostalu energiju sprovode u zemlju.

U nastavku se na osnovu procenjene amplitude struje odvođenja kroz odvodnik bira nazivna struja odvođenja, koja se još naziva i klasom odvodnika. U Tabeli 2.4 prikazana je ova klasifikacija saglasno [2.1].

Tabela 2.4. Klasifikacija struja odvođenja odvodnika prenapona

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

U Tabeli 2.4. su uz same klase odvodnika dati i opsezi naznačenih napona za koje se ove klase vezuju. Pored navedenih klasa, u razmatranju se nalaze i odvodnici klase 1500 A.

Prema IEC preporukama određene klase se koriste prema sledećoj nomenklaturi [2.8]:

- Odvodnici klase 2500 A se koriste za sisteme nazivnog napona ispod 1000 V.
- Odvodnici klase 5000 A se koriste u sledećim slučajevima:
  - zaštita distributivnih transformatora manje važnosti,
  - područja sa slabom grmljavinskom aktivnošću (keraunički nivo ispod 15),
  - efikasno zaštićeni prilazni vodovi zaštitnim užadima,
  - kada su otpornosti uzemljenja stubova ispod 10  $\Omega$ .
- Odvodnici klase 10000 A se koriste u sledećim slučajevima:
  - kod važnih postrojenja,
  - za područja sa izraženom grmljavinskom aktivnošću (keraunički nivo iznad 15),
  - kada su prilazni vodovi ka postrojenju neefikasno zaštićeni,

- ukoliko otpornost uzemljenja stubova prelazi  $10 \Omega$  unutar rastojanja od 1 km ispred postrojenja, zbog opasnosti od povratnog preskoka,
- pri korišćenju drvenih stubova bez uzemljenih konzola na prilaznim vodovima,
- ako je broj priključenih vodova na sabirnicama manji od tri,
- za sisteme nazivnog napona ispod i uključujući 420 kV.

Za sisteme vrlo visokog napona ( $U \geq 550$  kV) mogu se koristiti odvodnici klase 20000 A.

U našoj praksi koristi se klasa 10 kA kako za zaštitu distributivnih mreža tako i za zaštitu prenosnih mreža 110 kV, 220 kV i 400 kV [2.35].

Navedene vrednosti ipak ne ukazuju mnogo o energetske karakteristika odvodnika. Prava funkcija ove klasifikacije jeste određivanje različitih daljih zahteva u zavisnosti od klase. Tako se odvodnici klase 10000 A mogu podeliti na odvodnike za lake uslove rada i odvodnike za teške uslove rada. Odvodnici za lake uslove rada štite opremu samo od atmosferskih prenapona. Zaštita opreme od atmosferskih i sklopnih prenapona ostvaruje se odvodnicima za teške uslove rada. Ovi odvodnici se međusobno razlikuju po klasi rasterećenja voda o čemu će biti više reči u nastavku.

## 1.6. Određivanje klase rasterećenja voda

Prema [2.4], klasa rasterećenja voda trenutno predstavlja jedini način označavanja sposobnosti apsorpcije energije. Međutim, ova sposobnost se tek indirektno vidi iz klase rasterećenja voda što je podstaklo proizvođače da u svoje kataloge unesu više informacija od onih preporučenih IEC standardom. 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. Određivanje energetske naprezanja usled sklopnih prenapona je važno s obzirom da, u odnosu na prenapone atmosferskog porekla i prenapone sa vrlo strmim čelom talasa, sklopni prenaponi izazivaju najveće naprezanje odvodnika. Iako manjih amplituda, sklopni prenaponi imaju relativno dugo trajanje pa stoga predstavljaju najopasnije prenapone u smislu energetske naprezanja.

Standard [2.4] definiše pet različitih klasa rasterećenja voda, koje se označavaju brojevima od 1 do 5. Veći broj označava bolju sposobnost apsorpcije energije. Klasifikacija je napravljena na osnovu ispitivanja dugotrajnom udarnom strujom. Parametri ispitnog talasa odnosno generatora udarnih talasa koji se koristi pri ispitivanju prikazani su u Tabeli 2.5. Ovi parametri izvedeni su na osnovu tipičnih vrednosti za visokonaponske vodove.

Tabela 2.5. Parametri dugotrajnog strujnog talasa / generatora udarnih talasa

Klasa rasterećenja voda	Karakteristična impedansa voda $Z (\Omega)$	Konvencionalno trajanje maksimuma talasa $T (\mu s)$	Napon punjenja (jednosmerni) $U_L$ (kV)
1	$4.9 \cdot U_r$	2000	$3.2 \cdot U_r$
2	$2.4 \cdot U_r$	2000	$3.2 \cdot U_r$
3	$1.3 \cdot U_r$	2400	$2.8 \cdot U_r$
4	$0.8 \cdot U_r$	2800	$2.6 \cdot U_r$
5	$0.5 \cdot U_r$	3200	$2.4 \cdot U_r$

Oznaka  $U_r$  u Tabeli 2.5 predstavlja naznačeni napon uzorka odvodnika u kV. Na osnovu podataka prikazanih u Tabeli 2.5 može se zaključiti da su karakteristična impedansa voda  $Z$  i napon punjenja  $U_L$  dati u funkciji naznačenog napona  $U_r$ , dok struja odvođenja nije definisana. Karakteristična impedansa voda  $Z$  ujedno predstavlja vrednost otpornosti otpornika koji se redno vezuje sa ispitivanim uzorkom odvodnika u cilju ograničenja struje odvođenja.

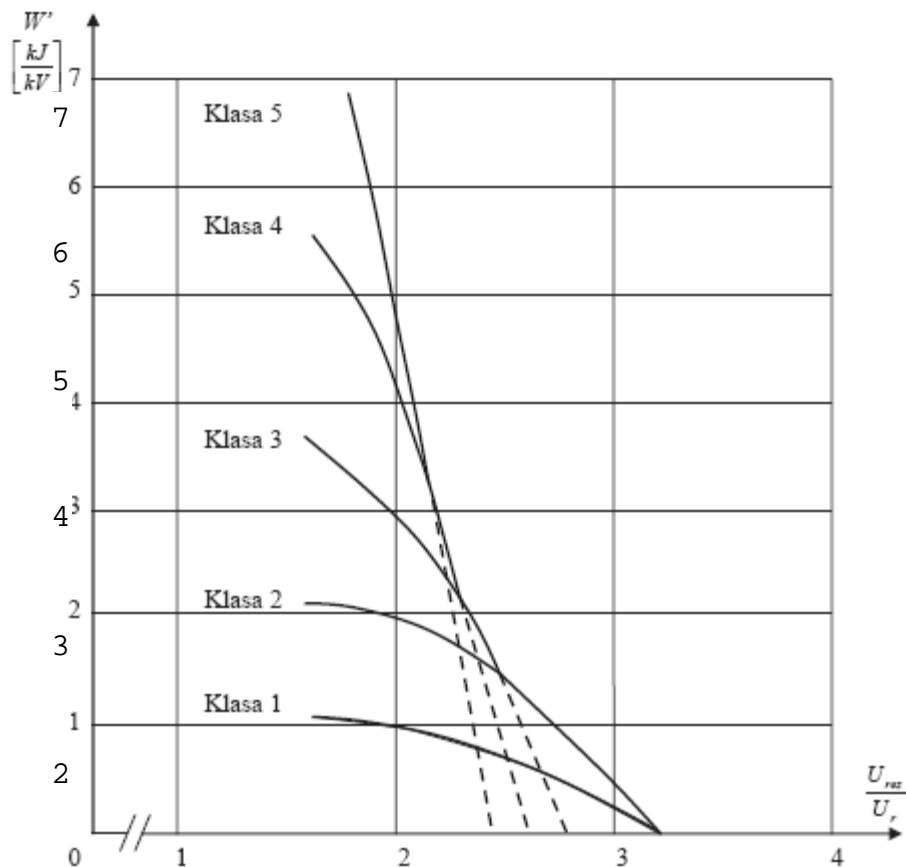
Energetsko naprezanje odvodnika može se indirektno odrediti na osnovu podataka datih u Tabeli 2.5. Direktno sagledavanje energetskog naprežanja odvodnika moguće je odrediti grafičkim putem ili proračunom. Na Slici 2.5. prikazana je zavisnost specifične generisane energije u ispitivanom objektu od odnosa njegovog preostalog napona i naznačenog napona pri jednom impulsu rasterećenja voda [2.4].

Pored grafičkog određivanja, specifična generisana energija pri jednom impulsu rasterećenja voda može se izračunati primenom sledećeg izraza:

$$W' = \frac{(U_L - U_{rez})}{Z} \cdot \frac{U_{rez}}{U_r} \cdot T \quad (2.15)$$

Oznake u (2.15) imaju sledeće značenje:  $W'$  – specifična energija (kJ/kV) u odnosu na naznačeni napon odvodnika  $U_r$ ,  $U_L$  – sklopni prenapon, dat poslednjom kolonom u Tabeli 2.5,  $U_{rez}$  – preostali (rezidualni) napon na odvodniku prilikom sklopnog strujnog impulsa,  $Z$  – karakteristična impedansa voda,  $T$  – konvencionalno trajanje maksimuma talasa.

Iz prethodnog izraza može se zaključiti da oslobođena specifična energija u odvodniku prenapona pri rasterećenju dugačkog voda zavisi od preostalog napona na odvodniku. Sa porastom ovog napona smanjuje se oslobođena energija. S druge strane, u cilju postizanja odgovarajućeg zaštitnog nivoa pri sklopnim prenaponima, preostali napon trebalo bi da bude dovoljno niži od podnosivog sklopnog napona izolacije štice elementa. Iz tog razloga proizvođači odvodnika predlažu korišćenje varistora sa većim prečnikom što dovodi do veće sposobnosti apsorpcije energije.



Slika 2.5. Specifična generisana energija u ispitivanom objektu u zavisnosti od odnosa njegovog preostalog napona i naznačenog napona pri jednom impulsu rasterećenja voda

Iz navedenog sledi da je izbor naznačenog napona, nazivne struje odvođenja i klase rasterećenja voda iterativan postupak.

U praksi se adekvatnost sposobnosti apsorpcije energije odvodnika prenapona određuje primenom (2.15) i podataka iz Tabele 2.5 ili primenom dijagrama na Slici 2.5. U prvom slučaju podaci iz Tabele 2.5 zamenjuju se u (2.15). Za preostali napon ( $U_{rez}$ ) uzima se vrednost iz kataloga odvodnika koja odgovara strujnom sklopnom impulsu (30/60  $\mu s$ ) najmanje temene vrednosti. Na ovaj način se proračunom dobija najveća vrednost specifične energije. Deklarisana specifična energija preliminarnog odvodnika bi trebalo da bude veća od one koja se dobija proračunom. U slučaju da odvodnik sa pretpostavljenom klasom rasterećenja voda ne zadovoljava, bira se prva veća klasa. Ukoliko se pokaže da je potrebna klasa veća od 5, neophodno je sprovesti detaljnu analizu primenom nekog od postojećih programa [2.35-2.37].

Takođe, primenom dijagrama na Slici 2.5. moguće je odrediti specifičnu energiju koja će potencijalno biti generisana u odvodniku. Za konkretan odnos  $U_{rez}/U_r$  u odnosu na pretpostavljenu klasu rasterećenja voda sa ordinate se očitava vrednost specifične energije. Ova vrednost treba da bude (dovoljno) niža od vrednosti za koju je deklarisan odvodnik.



Pri tome je važno napomenuti da proizvođači odvodnika daju u prospektima podatak o energiji po kV naznačenog napona. Međutim, neki proizvođači daju podatak koji se odnosi na energiju po kV trajnog radnog napona. U tom slučaju neophodno je izvršiti odgovarajuće preračunavanje.

Proizvođač odvodnika u katalogu dostavlja podatke o klasi rasterećenja voda. Na osnovu Tabele 2.3 može se zaključiti da odvodnik jednog naznačenog napona ima više predloženih klasa rasterećenja voda. Na primer, odvodnik prenapona naznačenog napona  $U_r=30$  kV ima klase rasterećenja voda 2, 3 i 4.

Preporuke o izboru klase rasterećenja voda date su u odgovarajućim dokumentima. Prema [2.1] predlažu se sledeće klase rasterećenja voda za uobičajene uslove u mreži: klasa 2 za nazivni napon mreže 110 kV, klasa 3 za mreže nazivnog napona 220 kV i 400 kV. Za prenosne mreže 110 kV, 220 kV i 400 kV u našoj zemlji predlažu se klase rasterećenja voda 3, 4 i 4, respektivno [2.35]. Kada se radi o metaloksidnim odvodnicima prenapona za zaštitu energetskog transformatora u TS 35/10(20) kV i TS 110/x kV elektrodistributivnih mreža u našoj zemlji, predlažu se klasa rasterećenja voda 1 ili 2 za naponske nivoe 10 kV, 20 kV i 35 kV, odnosno klasa 3 za naponski nivo 110 kV [2.38].

### 1.7. Izbor kućišta odvodnika prenapona

Pored električnih parametara potrebno je sagledati i mehaničke parametre koji su bitni sa aspekta izbora kućišta odvodnika prenapona. Na izbor kućišta odvodnika prenapona utiču:

- statička i dinamička naprezanja koja mogu delovati na kućište odvodnika tokom radnog veka;
- nivo zagađenja sredine u kojoj se planira upotreba odvodnika;
- struja kratkog spoja na mestu ugradnje odvodnika prenapona;
- oblik spoljašnje površine kućišta, odnosno profil izolatora.

Na osnovu navedenih parametara bira se:

- vrsta materijala od kojeg je izrađeno kućište;
- dužina (visina) kućišta;
- prečnik kućišta;
- dužina puzne staze.

Minimalna dužina samog kućišta određena je dužinom aktivnog dela odvodnika prenapona koji predstavlja stub sa metaloksidnim varistorima. Međutim, konačnu dužinu kućišta određuju dodatni zahtevi, pre svega, u pogledu podnosivih napona. U Tabeli 2.6 dati su kriterijumi za ispitivanje kućišta odvodnika prenapona podnosivim naponom [2.4].

Na osnovu Tabele 2.6 može se zaključiti da vrednosti podnosivih napona zavise od vrednosti zaštitnih nivoa odabranog tipa aktivnog dela odvodnika. Zaštitni nivoi se mogu proveriti na osnovu podataka datih u katalogu proizvođača, o čemu je diskutovano u poglavlju 2.4.

Uticaoj montaže na različitim visinama ispod 1000 m, kao i mogućnost javljanja veće struje pražnjenja od naznačene obuhvaćeni su kriterijumima datim u Tabeli 2.6. Za montažu predviđenu na lokaciji sa nadmorskom visinom iznad 1000 m neophodan je

izbor većeg rastojanja između opreme i veće dužine kućišta kako bi se održao podnosivi napon u uslovima smanjene gustine vazduha.

### 1.7.1. Dužina puzne staze

Dužina kućišta odvodnika prenapona zavisi od dužine puzne staze. Sam naziv nastao je po puzajućem pražnjenju koje predstavlja početni stadijum preskoka po površini izolatora. Puzna staza definiše se kao dužina izolatora kućišta merena po spoljašnjoj površini. Pojava puzajućih pražnjenja otežava se veštačkim povećanjem dužine odvodnika. U tom cilju, spoljašnja površina odvodnika ima talasast oblik kao u slučaju običnih izolatora za spoljašnju montažu. Takođe, u uslovima velike vlažnosti i zaprljanosti kućišta usled zagađenja, sprečava se stvaranje provodnih puteva na površini kućišta što onemogućava pojavu preskoka.

Tabela 2.6. Kriterijumi za ispitivanje kućišta odvodnika prenapona podnosivim naponom

	$I_n = 10 \text{ kA i } 20 \text{ kA}$		$I_n \leq 5 \text{ kA}$
	$U_r \geq 200 \text{ kV}$	$U_r < 200 \text{ kV}$	
Ispitivanje atmosferskim udarnim naponom	1,3 · atmosferski zaštitni nivo		
Ispitivanje sklopnim udarnim naponom	1,25 · sklopni zaštitni nivo	-	-
Ispitivanje naponom industrijske učestanosti (1 min)	-	1,06 · sklopni zaštitni nivo	0,88 · atmosferski zaštitni nivo

Specifična dužina puzne staze, data u mm/kV u odnosu na najviši napon sistema  $U_s$ , zavisi od nivoa zagađenja. Prema [2.39] definisana su četiri nivoa zagađenja. Njihova klasifikacija prikazana je u Tabeli 2.7.

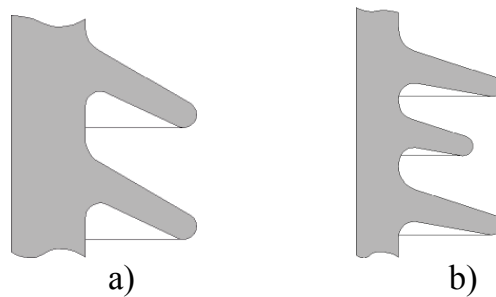
Tabela 2.7. Klasifikacija nivoa zagađenja sredine

Nivo zagađenja	Specifična dužina puzne staze (mm/kV)
I (lako zagađenje)	16
II (srednje zagađenje)	20
III (teško zagađenje)	25
IV (vrlo teško zagađenje)	31

U slučajevima lakog i srednjeg zagađenja moguće je koristiti minimalnu dužinu kućišta koja je, kao što je već napomenuto, određena aktivnim delom odvodnika prenapona. Međutim, na lokacijama širom sveta često je potrebno koristiti kućišta čija dužina puzne staze odgovara III i IV nivou zagađenja. Za specifične oblasti, kao što su oblasti sa priobalnim pustinjama i kombinacija ovih oblasti sa industrijskim zagađenjem,

pouzdanost rada odvodnika prenapona, umesto povećanjem dužine puzne staze, ostvaruje se izborom višeg trajnog radnog napona i naznačenog napona, ako zahtevi u pogledu zaštite to dopuštaju. Druga mogućnost odnosi se na izbor kućišta sa većim razmakom između aktivnog dela i zida kućišta, što se uglavnom primenjuje kod porcelanskih kućišta.

Kod izbora puzne staze mogu se odabrati izolatori sa normalnim profilom (Slika 2.6.a) ili alternativnim profilom (Slika 2.6.b) [2.1]. Na osnovu prikazanih Slika 2.6.a i 2.6.b može se zaključiti da su kod normalnog profila sva rebra istog oblika, dok se kod alternativnog profila različitih dimenzija naizmenično smenjuju veće i manje rebro. Prednosti alternativnog profila ogledaju se u prevenciji nastanka provodnih slojeva na njegovoj površini. Takođe, ovaj profil se bolje ponaša pri ispitivanjima u prisustvu slane magle. S druge strane, normalan profil je pokazao dobru sposobnost samočišćenja u stvarnim radnim uslovima.



Slika 2.6. a) Normalan profil izolatora; b) Alternativni profil izolatora

### 1.7.2. Klasa zaštite od nadpritiska

U praksi je moguć nastanak preopterećenja i unutrašnjeg kvara odvodnika. Ponašanje odvodnika u tom slučaju zavisi od tipa konstrukcije. Kod odvodnika sa porcelanskim kućištem razvija se luk u vazdušnom prostoru između aktivnog dela i kućišta. Kroz nastali luk će proticati struja kratkog spoja čija vrednost jeste definisana mestom ugradnje odvodnika. Kao posledica toplotne energije luka javlja se brzo širenje vazduha. Eksplozija kućišta se sprečava otvaranjem sigurnosne membrane čime se vreli gasovi ispuštaju izvan kućišta zajedno sa lukom koji nastavlja da gori dok traje kratak spoj. Iz navedenog razloga se za odvodnike ovog tipa definiše klasa zaštite od nadpritiska.

Nova konstrukcija odvodnika sa polimernim kućištem nema vazdušni prostor pa ne postoji mogućnost širenja gasa odnosno pojava eksplozije. Međutim, unutrašnji kvarovi se javljaju i kod ovog tipa odvodnika. Ovi kvarovi karakterišu se pojavom struje kratkog spoja pa se od odvodnika zahteva sposobnost njihovog podnošenja. U slučaju kratkog spoja unutar odvodnika prenapona postavlja se uslov da njegovo kućište ostane u jednom delu. U slučaju loma potrebno je da delovi odvodnika padnu na zemlju u radijusu koji nije veći od visine odvodnika. Nasilno rasprskavanje odvodnika nije dozvoljeno. Kada su u pitanju porcelanski odvodnici preporučuje se njihovo izbegavanje kao potpornih izolatora za provodnike i sabirnice.

U Tabeli 2.8. prikazana je klasifikacija odvodnika prenapona prema naznačenoj struji kratkog spoja [2.1]. Prema [2.1] odvodnici određene klase trebalo bi da podnesu dejstvo odgovarajuće vrednosti struje u trajanju od 200 ms. Iz Tabele 2.8. bira se prva

veća vrednost struje kratkog spoja od očekivane vrednosti struje kratkog spoja na mestu ugradnje odvodnika. Prema novim standardima definisana je i mala struja kvara koja iznosi  $600 \pm 200$  A. Ispitivanje odvodnika vrši se primenom ove struje u trajanju od 1 s. Očekivano ponašanje zavisi od tipa odvodnika. Kod porcelanskih odvodnika neophodno je da se u ovom periodu otvori sigurnosna membrana, što predstavlja dokaz mogućnosti reagovanja i pri vrlo malim strujama kvara. U slučaju polimernih odvodnika ovo ispitivanje demonstrira njihovu otpornost na požar.

### 1.7.3. Mehaničko opterećenje

Odvodnici prenapona u toku radnog veka izloženi su raznim mehaničkim opterećenjima. Proračun mehaničkog opterećenja predstavlja sastavni deo aktivnosti u vezi izbora MOP-a, što je jasno naznačeno na dijagramima toka prikazanim na Slikama 2.1. i 2.2. Mehaničko opterećenje se generalno može podeliti na statičko i dinamičko opterećenje. Statičko opterećenje nastaje kao posledica načina montaže odvodnika i njegovog povezivanja priključnim provodnicima na sabirnice. Dinamičko opterećenje može da nastane usled struje kratkog spoja koja protiče kroz sabirnice na koje je odvodnik priključen, usled udara jakog vetra i prilikom zemljotresa.

Tabela 2.8. Klasifikacija odvodnika prenapona prema naznačenoj struji kratkog spoja [2.1]

Naznačena struja kratkog spoja (A) (efektivna vrednost simetrične komponente struje kratkog spoja)
5000
10000
16000
20000
31500
40000
50000
63000
80000

Dozvoljene vrednosti mehaničkog opterećenja definišu proizvođači odvodnika. ABB u svojim katalozima definiše vrednosti dopustivog statičkog i dinamičkog momenta [2.2]. Pri tome se podrazumeva da ovi momenti nastaju dejstvom horizontalno usmerene sile na gornji priključak vertikalno postavljenog odvodnika. Najveće opterećenje deluje na osnovu odvodnika i najnižu jedinicu kućišta u slučaju kućišta sastavljenog iz više jedinica. U praksi se sve jedinice ovakvog kućišta izrađuju tako da mogu da izdrže deklarirani moment. Siemens definiše samo vrednosti maksimalno dopustivog dinamičkog momenta i odgovarajuće sile koja deluje na vrh MOP-a [2.1].

Navedeni proizvođači usvojili su standard da odvodnici sa porcelanskim kućištem ne smeju da budu podvrgnuti statičkom opterećenju koje iznosi više od 40% dopuštenog dinamičkog opterećenja. S druge strane, dopušteno dinamičko opterećenje ne sme da bude veće od 80% vrednosti opterećenja pri kojoj dolazi do pucanja kućišta odvodnika. Ova vrednost određuje se na osnovu eksperimentalnih ispitivanja mehaničke čvrstoće kućišta odvodnika. Potrebno je napomenuti da kod polimernih kućišta još nisu ustanovljeni odgovarajući standardi. Prema dosadašnjim saznanjima bez ikakvih problema je moguće dugotrajno opteretiti kućište odvodnika sa vrednošću opterećenja koja iznosi 70% od one pri lomu odvodnika. Kako se polimerna kućišta vidljivo savijaju pod dejstvom mehaničkih sila potrebno je, u neophodnim slučajevima, odabrati MOP sa kućištem koje ima veću mehaničku čvrstoću. Takvi su odvodnici sa kompozitnom strukturom.

Na osnovu izloženog može se zaključiti da se mnogobrojni zahtevi u vezi kućišta MOP-a ostvaruju konstruktivnim merama koje dovode do odgovarajuće kombinacije materijala, prečnika i dužine kućišta odvodnika. Odvodnik sa više jedinica kućišta izrađuje se u slučajevima kada je zahtevana ukupna dužina odvodnika veća od one koja se može smestiti u jedno kućište. Iz tehničkih razloga dužina porcelanskih kućišta je ograničena na oko dva metra. Kod polimernih kućišta veće dužine su moguće i koriste se često. Jedinstveno kućište karakterišu niži troškovi i prednosti u teško zagađenim sredinama. Upotreba više jedinica kućišta karakteriše se većim troškovima s obzirom da svaka jedinica ima posebne prirubnice, uređaje za zaptivanje i zaštitu od nadpritiska.

### **1.8. Primeri izbora metaloksidnih odvodnika prenapona**

U ovom poglavlju prikazana je primena postupka za preliminarni izbor metaloksidnih odvodnika prenapona postavljenih između faznog provodnika i zemlje. Razmotreni su sledeći primeri:

- izbor MOP-a za direktno uzemljenu mrežu naznačenog napona 400 kV;
- izbor MOP-a za izolovanu mrežu naznačenog napona 10 kV;
- izbor MOP-a za mrežu naznačenog napona 10 kV koja je uzemljena preko otpornika čija otpornost ima malu vrednost.

Postupak izbora zasnovan je na metodologiji prikazanoj u poglavljima 2.1-2.7. Pored toga, prikazane su i neke mogućnosti primene programskog alata kojim se automatizuje postupak izbora odvodnika prenapona [2.40-2.42].

#### **Primer 2.8.1**

Za direktno uzemljenu mrežu naznačenog napona 400 kV izabrati metaloksidni odvodnik prenapona. Odvodnik predvideti za standardne uslove rada u postrojenju sa drugim nivoom zagađenja. Standardni podnosivi udarni napon opreme je 1425 kV, a struja trofaznog kratkog spoja na mestu ugradnje odvodnika iznosi  $I_{KS}=30$  kA.

#### **Rešenje primera 2.8.1**

Izbor metaloksidnog odvodnika prenapona neophodno je sprovesti tako da budu ostvareni pouzdan rad MOP-a i efikasna zaštita izolacije opreme od prenapona. Primer će biti ilustrovan za odvodnik proizvodnje Siemens. U prvom koraku određuju se trajni radni napon i naznačeni napon odvodnika prenapona. Za mrežu naznačenog napona 400 kV najviši dozvoljeni radni napon iznosi  $U_s=420$  kV. Odvodnik se postavlja između

faznog provodnika i zemlje. S obzirom da je razmatrana mreža efikasno uzemljena to se minimalni trajni radni napon odvodnika bira prema izrazu iz Tabele 2.1:

$$U_{c\min} \geq 1,05 \cdot \frac{U_s}{\sqrt{3}} = 1,05 \cdot \frac{420}{\sqrt{3}} = 254,1 \text{ kV} \quad (2.16)$$

Naznačeni napon na osnovu trajnog radnog napona prema Siemensu određuje se iz izraza:

$$U_{r1} \geq 1,25 \cdot U_{c\min} = 1,25 \cdot 254,1 = 318 \text{ kV} \quad (2.17)$$

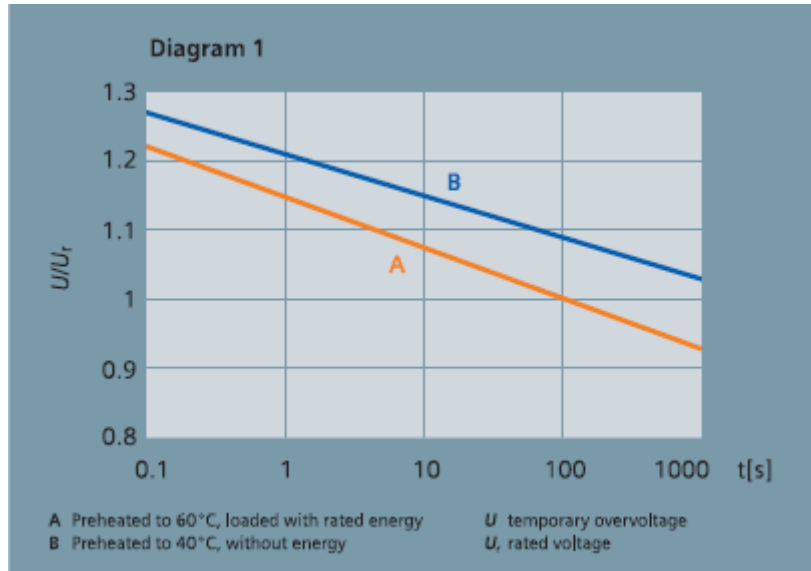
Kao što je napomenuto, vrednost 1,25 je tipična, ali je zavisna od proizvođača. Iz ovog razloga su u prospektima proizvođača obavezno navedene obe vrednosti napona  $U_c$  i  $U_r$  pa je njihov izbor neophodno zasnivati na ovim podacima datim u prospektu.

U Tabeli 2.9 date su karakteristike za MOP sa polimernim kućištem tipa 3EL2, proizvodnje Siemens [2.33]. Prva veća vrednost naznačenog napona odvodnika u odnosu na proračunatu vrednost od 318 kV iznosi  $U_r=336$  kV. Trajni radni napon koji odgovara ovoj vrednosti naznačenog napona  $U_r$  dat je u Tabeli 2.9 i iznosi  $U_c=269$  kV. To znači da je odabran odvodnik tipa 3EL2, naznačenog napona  $U_r=336$  kV, čiji je trajni radni napon  $U_c=269$  kV.

Sledi izbor naznačenog napona odvodnika prenapona  $U_{r2}$  na osnovu privremenog prenapona primenom izraza (2.1). Privremeni prenapon  $U_{TOV}$  određuje se na osnovu proizvoda faktora zemljospoja i maksimalnog radnog faznog napona sistema  $U_{mf}$ . Faktor zemljospoja  $K_Z$  iznosi 1,4 za efikasno uzemljene sisteme. Koeficijent  $K_{TOV}$  određuje se na osnovu karakteristike podnosivog napona industrijske učestanosti u funkciji vremena. Na Slici 2.7. prikazana je karakteristika podnosivog napona industrijske učestanosti u funkciji vremena za MOP tipa 3EL2 u odnosu na naznačeni napon  $U_r$  [2.33].

Tabela 2.9. Karakteristike MOP-a tipa 3EL2 za najviši napon sistema 420 kV [2.33]

Highest voltage for equipment	Standard lightning impulse withstand voltage	Rated voltage	Continuous operating voltage	Line discharge class	Long-duration current 2 ms	Maximum values of the residual voltages at discharge currents of the following impulses					
						8/20 $\mu$ s 5 kA kV	8/20 $\mu$ s 10 kA kV	8/20 $\mu$ s 20 kA kV	30/60 $\mu$ s 0,5 kA kV	30/60 $\mu$ s 1 kA kV	30/60 $\mu$ s 2 kA kV
$U_m$ kV	BIL min kV	$U_r$ kV	$U_c$ kV	LD-CI	A						
420	1175	336	269	3	850	766	806	887	653	669	702
	1175	336	269	3	1200	711	756	832	612	628	658
	1175	336	269	4	1200	758	806	887	653	669	702
	1300	360	288	3	850	812	864	950	700	717	752
	1175	360	288	3	1200	761	810	891	656	672	705
	1300	360	288	4	1200	812	864	950	700	717	752



Slika 2.7. Karakteristika podnosivog napona industrijske učestanosti u funkciji vremena za MOP tipa 3EL2 u odnosu na naznačeni napon  $U_r$  [2.33]

Kriva B i kriva A na Slici 2.7. odnose se na temperaturu od  $40^{\circ}\text{C}$  odnosno  $60^{\circ}\text{C}$  na koju je prethodno odvodnik zagrejan u trenutku nastanka privremenog prenapona. Teži uslovi odnose se na donju krivu (kriva A), pa se preporučuje njeno korišćenje.

Kao što je napomenuto, trajanje privremenih prenapona određeno je načinom uzemljenja neutralne tačke i podešenjem reagovanja relejne zaštite i prekidača. Kratak spoj u mreži traje do 3 s u prenosnim mrežama, odnosno do nekoliko sekundi u distributivnim mrežama, kada je neutralna tačka uzemljena direktno ili preko otpornika. Ukoliko u uzemljenim mrežama nije poznato koliko traje zemljospoj, treba smatrati da vreme trajanja kvara iznosi 10 s. Koeficijent  $K_{TOV}$  očitava se za stvarno trajanje kvara, kada je to vreme poznato, ili za  $t=10$  s, kada nije. S obzirom da se u navedenom primeru radi o prenosnoj mreži, vrednost koeficijenta  $K_{TOV}$  određena je za  $t=3$  s, i za krivu A iznosi 1,13.

Naznačeni napon odvodnika prenapona  $U_{r2}$  na osnovu privremenog prenapona iznosi:

$$U_{r2} = \frac{U_{TOV}}{K_{TOV}} = \frac{K_z \cdot \frac{U_s}{\sqrt{3}}}{K_{TOV,3s}} = \frac{1,4 \cdot \frac{420}{\sqrt{3}}}{1,13} = 300 \text{ kV} \quad (2.18)$$

Završni korak u izboru naznačenog napona odvodnika svodi se na izbor naznačenog napona na osnovu najvišeg naznačenog napona odvodnika između  $U_{r1}$  i  $U_{r2}$ :

$$U_r \geq \max(U_{r1}, U_{r2}) = \max(318, 300) = 318 \text{ kV} \quad (2.19)$$

Prema [2.4] preporučuje se da standardne vrednosti naznačenog napona budu brojevi deljivi sa 3 ili 6. Na osnovu prikazanih odvodnika u prospektu proizvođača, potrebno je izabrati prvi odvodnik većeg naznačenog napona. Prema Tabeli 2.9 usvojena je vrednost od  $U_r=336$  kV, dok je trajni radni napon  $U_c=269$  kV.

U nastavku sledi izbor nazivne struje odvođenja i klase rasterećenja voda. Shodno 6Tabeli 2.4, s obzirom da je naznačeni napon odvodnika  $U_r=336$  kV odnosno pripada oblasti  $3 \leq U_r(\text{kV}) \leq 360$ , odabrana je nazivna struja odvođenja 10 kA, 8/20  $\mu\text{s}$ . U prvoj vrsti

Tabele 2.9 data je klasa rasterećenja voda 3. U katalogu je dat podatak o dozvoljenoj struji kratkog spoja na mestu ugradnje odvodnika. Ona iznosi 65 kA i veća je od vrednosti struje trofaznog kratkog spoja na mestu ugradnje odvodnika  $I_{KS}=30$  kA. Energetska sposobnost ovog odvodnika iznosi 8kJ po kV naznačenog napona.

Iz kataloga [2.33] tip odvodnika koji odgovara navedenim karakteristikama je: 3 EL2 336-2LM33-4xxx. Podaci ovog odvodnika dati su u drugoj vrsti kataloga prema Tabeli 2.9. Oznake imaju sledeće značenje:

- 3EL – metaloksidni odvodnik prenapona sa zaptivenim polimernim kućištem,
- 2 – dozvoljeni momenat savijanja 4kNm,
- 336 – naznačeni napon u kV,
- 2 – dugotrajna struja 850 A,
- L – oznaka za primenu odvodnika,
- M – veličina kućišta jedne jedinice,
- 3 – klasa rasterećenja voda,
- 3 – broj jedinica,
- 4 – oblik kućišta,
- x - visokonaponski priključak,
- x – oznaka kućišta,
- x – način montaže.

Zaštitne karakteristike odabranog odvodnika prikazane su u Tabeli 2.9. Njihova provera vrši se na osnovu izraza (2.14). Očitana vrednost preostalog napona za nazivnu struju odvođenja 10 kA, 8/20  $\mu$ s ( $U_{10\text{ kA}, 8/20\ \mu\text{s}}$ ) iz Tabele 2.9 iznosi 756 kV.

U Tabeli 2.9 data je minimalna vrednost standardnog podnosivog atmosferskog napona i ona iznosi 1175 kV. Prema uslovu zadatka standardni podnosivi udarni napon opreme iznosi 1425 kV. Odvodnik omogućava odgovarajući zaštitni nivo ako je ispunjen uslov [2.1]:

$$\frac{U_{pod}}{U_{10\text{ kA}, 8/20\ \mu\text{s}}} = \frac{1425}{756} = 1,88 > 1,4 \quad (2.20)$$

Ova provera izvodi se zbog toga što je ovo preliminarni izbor odvodnika, što znači odvodnika samog za sebe, a u odnosu na podnosivi udarni napon opreme. Kao što je napomenuto, mesto postavljanja odvodnika je veoma važno sa aspekta efikasne zaštite izolacije opreme od prenapona. Udaljenost od štice opreme, dužina spušnih veza i odvodnika od priključka do zemlje moraju se uvažiti u proračunu zaštitne zone odvodnika prenapona i utiču na konačan izbor MOP-a.

U Tabeli 2.10 prikazani su podaci o kućištima u zavisnosti od tipa odvodnika prenapona. Ove podatke određuje proizvođač na osnovu specifičnih podataka koje poseduje.

U nastavku je isti zadatak rešen primenom programskog alata za automatizaciju izbora MOP-a [2.40-2.42]. Postupak je urađen za odvodnike prenapona proizvodnje Siemens i ABB.

Na Slici 2.8. prikazana je ulazna maska sa podešenim kriterijumima za izbor Siemensovih odvodnika prenapona. Na Slikama 2.9. i 2.10. prikazani su osnovni i dodatni podaci izabranog Siemensovog odvodnika 3EL2 336, respektivno.



Tabela 2.10. Podaci o kućištima u zavisnosti od tipa odvodnika prenapona 3EL2 [2.33]

Arrester type	Height [H]	Number of units	Housing Insulation		Creepage distance	Top load dynamic	Grading ring diameter [D]	Weight	TOV diagram	Figure
			Lightning impulse withstand voltage <sup>1)</sup> 1.2/50 $\mu$ s kV	Power frequency withstand voltage <sup>1)</sup> 1 min, wet kV						
3EL2 336 - 2 L M 3 3 - 4 xxx	3720	3	2028	945	13620	1070	800	96,8	1	24
3EL2 336 - 3 L X 3 3 - 4 xxx	2829	3	1507	702	10030	1410	800	88,0	2	24
3EL2 336 - 3 L J 4 3 - 4 xxx	3186	3	1713	798	11460	1250	800	88,9	1	24
3EL2 360 - 2 L M 3 3 - 4 xxx	3720	3	2028	945	13620	1070	800	96,8	1	24
3EL2 360 - 3 L J 3 3 - 4 xxx	3186	3	1713	798	11460	1250	800	89,7	2	24
3EL2 360 - 3 L J 4 3 - 4 xxx	3186	3	1713	798	11460	1250	800	90,4	1	24

## Izbor odvodnika prenapona

**Izbor vrste odvodnika**

Proizvođač: SIEMENS

Kućiče: Polimerno

**Zaštita izolacije (montaža)**

Faza - zemlja

Neutralna tačka - zemlja

**Pomoć**

Napomena:

Uputstva proizvođača

[ABB](#)      [SIEMENS](#)

**Naponski kriterijumi**

Nazivni / najviši napon sistema: 400/420 kV

**Uzemljenje sistema**

Efikasno       Neefikasno

**Parametri zemljospoja**

Trajanje zemljospoja: 0.2 s

Faktor zemljospoja: k= 1.4

Dodatni privremeni prenapon

**Dodatni privremeni prenapon**

Trajanje priv. prenapona:

Vrednost priv. prenapona:

**Sposobnost apsorpcije energije**

Nazivna struja pražnjenja: 10 kA

Klasa rasterećenja voda: 3

**Mehanički kriterijumi**

Nivo zagađenja sredine: II 20 mm/kV

Maksimalno mehaničko opterećenje vrha odvodnika: 1000 N

Klasa zaštite od nadpritiska (nazivna struja kratkog spoja): 65 kA

Izbor odvodnika
Izlaz

Slika 2.8. Ulazna maska sa podešenim kriterijumima za izbor MOP-a proizvodnje Siemens

Postupak je ponovljen za odvodnik tipa PEXLIM, proizvodnje ABB. Na Slikama 2.11. i 2.12. prikazani su osnovni i dodatni podaci izabranog odvodnika HS PEXLIM T T330 TH420, proizvodnje ABB, za slučaj kada su podešeni kriterijumi za izbor ovog odvodnika prenapona kao na Slici 2.8. Oznake izabranog odvodnika imaju sledeće značenje:

HS PEXLIM T T330 TH420

HS – velika čvrstoća  
 PEXLIM - Tip odvodnika EXLIM sa polimernim kućištem (P)  
 T - tip bloka  
 330 - naznačen napon odvodnika  
 TH - interni kod  
 420 - maksimalan napon sistema.

**SIEMENS**

Tip

Električne karakteristike	
Najviši napon sistema	<input type="text" value="420"/> kV
Naznačeni napon	<input type="text" value="336"/> kV
Trajni radni napon	<input type="text" value="269"/> kV
Nazivna struja pražnjenja	<input type="text" value="10"/> kA
Klasa rasterećenja voda	<input type="text" value="3"/>
Sposobnost apsorpcije energije	<input type="text" value="8"/> kJ/kV

Preostali naponi na odvodniku za date strujne impulse	
<b>30/60 <math>\mu</math>s/<math>\mu</math>s</b>	
0,5 kA	<input type="text" value="612"/> kV
1 kA	<input type="text" value="627"/> kV
2 kA	<input type="text" value="658"/> kV
<b>8/20 <math>\mu</math>s/<math>\mu</math>s</b>	
5 kA	<input type="text" value="711"/> kV
10 kA	<input type="text" value="756"/> kV
20 kA	<input type="text" value="832"/> kV

Mehaničke karakteristike	
Klasa zaštite od nadpritiska	<input type="text" value="65"/> kA
Dužina puzne staze	<input type="text" value="11460"/> mm
Max. kratkotrajna sila na vrh odvodnika	<input type="text" value="1250"/> N
Max. kratkotrajni moment	<input type="text" value="4000"/> Nm

Navigation:

Slika 2.9. Osnovni podaci izabranog Siemensovog odvodnika 3EL2 336 [2.33]

# SIEMENS

**Podnosivi naponi izolacije kućišta**

Naponski talas 8/20  $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ , suvo kućište  kV

Napon industrijske učestanosti u trajanju od 1 min, vlažno kućište  kV

Podnosiva struja u trajanju od 2000  $\mu\text{s}$   A

**Dimenzije**

Visina (H)  mm

Broj jedinica kućišta


Prečnik prstena za popravljanje raspodele potencijala (D)  mm

Masa  kg

Materijal kućišta

Izvorni katalog [katalozi\3EL\\_en.p](#)

Slika



Slika 2.10. Dodatni podaci izabranog Siemensovog odvodnika 3EL2 336 [2.33]

qryABB\_FZ2

## ABB

Osnovni podaci **Dodatni podaci**

Tip

**Električne karakteristike**

Najviši napon sistema  kV

Naznačeni napon  kV

Trajni radni napon  kV

Nazivna struja pražnjenja  kA

Klasa rasterećenja voda

Sposobnost apsorpcije energije  kJ/kV

**Preostali naponi na odvodniku za date strujne impulse**

30/60 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$	
0,5 kA	<input type="text" value="-"/> kV
1 kA	<input type="text" value="638"/> kV
2 kA	<input type="text" value="656"/> kV
3 kA	<input type="text" value="669"/> kV

8/20 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$	
5 kA	<input type="text" value="702"/> kV
10 kA	<input type="text" value="731"/> kV
20 kA	<input type="text" value="789"/> kV
40 kA	<input type="text" value="859"/> kV

**Mehanički kriterijumi**

Dužina puzne staze  mm

Klasa zaštite od nadpritiska (nazivna struja kratkog spoja)  kA

Max. dozvoljena dugotrajna sila na vrh odvodnika  N

Max. dozvoljeni dugotrajni moment  Nm

Max. dozvoljena kratkotrajna sila na vrh odvodnika  N

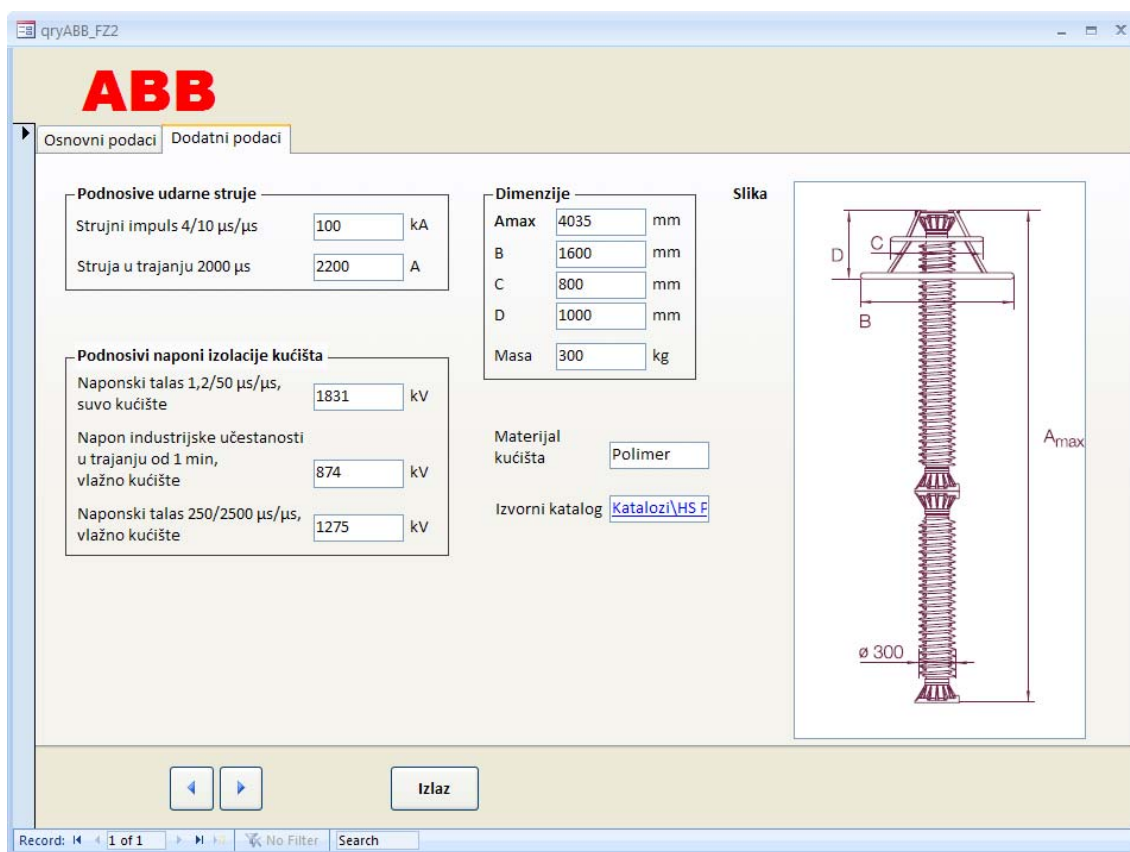
Max. dozvoljeni kratkotrajni moment  Nm

**Radni uslovi**

Temperatura  Nadmorska visina  m Učestanost  Hz

Record: 1 of 1 No Filter Search

Slika 2.11. Osnovni podaci izabranog odvodnika PEXLIM, proizvodnje ABB [2.2]



Slika 2.12. Dodatni podaci izabranog odvodnika PEXLIM, proizvodnje ABB [2.2]

### Primer 2.8.2

Za izolovanu mrežu nazivnog napona  $U_n=10$  kV preliminarno izabrati naznačeni napon metaloksidnog odvodnika prenapona tipa 3EK4, proizvodnje Siemens. Najviši napon sistema iznosi  $U_s=12$  kV. Pretpostaviti da je trajanje zemljospoja u ovoj mreži duže od 30 min. Odvodnik predvideti za standardne uslove rada u postrojenju sa prvim nivoom zagađenja. Standardni podnosivi udarni napon opreme je 75 kV. Proveriti ispunjenost zaštitnog nivoa.

### Rešenje primera 2.8.2

Izbor metaloksidnog odvodnika prenapona neophodno je sprovesti tako da budu ostvareni pouzdan rad MOP-a i efikasna zaštita izolacije opreme od prenapona. Primer će biti ilustrovan za odvodnik tipa 3EK4, proizvodnje Siemens.

U slučaju mreža sa izolovanom ili rezonantno uzemljenom neutralnom tačkom, naponi neoštećenih faza pri jednofaznom zemljospoju dobijaju vrednost međufaznog napona (koeficijent zemljospoja iznosi  $K_Z=1,73$ ). S obzirom da takav rad kod ovih sistema može uobičajeno da traje više od trideset minuta, minimalni radni napon odvodnika određuje se tako da bude jednak ili viši od međufaznog napona sistema  $U_s$ .

Minimalni trajni radni napon iznosi:

$$U_{c\min} \geq U_s = 12 \text{ kV} \quad (2.21)$$

Odgovarajući naznačeni napon odvodnika prenapona određuje se iz izraza:

$$U_{r1} \geq 1,25 \cdot U_{c\min} = 1,25 \cdot 12 = 15 \text{ kV} \quad (2.22)$$

Ovde je neophodno napomenuti da je provera termičkog preopterećenja usled privremenih prenapona nepotrebna u slučaju izolovane mreže s obzirom da je odvodnik odabran da taj napon podnosi trajno.

U katalogu [2.43] postoji takav odvodnik, pa će on biti odabran. Karakteristike odabranog odvodnika date su u Tabeli 2.11. Odabran je odvodnik tipa 3EK4 150-1CF4, čiji naznačeni napon  $U_r$  i trajni radni napon  $U_c$  imaju vrednosti 15 kV i 12 kV, respektivno.

Tabela 2.11. Karakteristike MOP-a tipa 3EK4 [2.43]

Rated voltage $U_r$	Continuous operating voltage $U_c$	Part number	Maximum values of the residual voltages at discharge currents of the following impulses					Flashover distance	Housing insulation		Height H (see fig. 1)	Width W (see fig. 1)	Creepage distance	Net weight
			8/20 $\mu$ s 1 kA [kV]	8/20 $\mu$ s 5 kA [kV]	8/20 $\mu$ s 10 kA [kV]	8/20 $\mu$ s 20 kA [kV]	30/60 $\mu$ s 500 A [kV]		Lightning impulse withstand voltage 1.2/50 $\mu$ s [kV]	Power frequency withstand voltage 1 min., wet [kV]				
3	2.4	3EK4 030-1CB3	6.5	7.4	8.0	9.1	6.1	98	57	24	96	92	225	0.8
6	4.8	3EK4 060-1CB3	13.0	14.8	15.9	18.3	12.2	98	57	24	96	92	225	0.9
9	7.2	3EK4 090-1CC3	19.6	22.2	23.9	27.4	18.4	138	80	33	137	92	310	1.2
12	9.6	3EK4 120-1CC3	26.1	29.6	31.8	36.6	24.5	138	80	33	137	92	310	1.3
15	12.0	3EK4 150-1CF4	32.6	37.0	39.8	45.7	30.6	170	99	41	160	111	550	1.6
18	14.4	3EK4 180-1CJ4	39.1	44.4	47.7	54.9	36.7	212	123	51	204	111	690	2.0
21	16.8	3EK4 210-1CJ4	45.6	51.8	55.7	64.0	42.9	212	123	51	204	111	690	2.1
22	17.6	3EK4 220-1CJ4	47.8	54.2	58.3	67.0	44.9	212	123	51	204	111	690	2.1
24	19.2	3EK4 240-1CK4	52.2	59.1	63.6	73.1	49.0	242	140	58	234	111	820	2.3
25	20.0	3EK4 250-1CK4	54.3	61.6	66.3	76.2	51.0	242	140	58	234	111	820	2.3
27	21.6	3EK4 270-1CM4	58.7	66.5	71.6	82.3	55.1	278	161	67	270	111	960	2.7
30	24.0	3EK4 300-1CM4	65.2	73.9	79.5	91.4	61.2	278	161	67	270	111	960	2.8

Zaštitne karakteristike odabranog odvodnika prikazane su u Tabeli 2.11. Njihova provera vrši se na osnovu izraza (2.14). Očitana vrednost preostalog napona za nazivnu struju odvođenja 10 kA, 8/20  $\mu$ s ( $U_{10\text{ kA}, 8/20\ \mu\text{s}}$ ) iz Tabele 2.11 iznosi 39,8 kV. Prema uslovu zadatka standardni podnosivi udarni napon opreme iznosi  $U_{\text{pod}}=75$  kV. Odvodnik omogućava odgovarajući zaštitni nivo ako je ispunjen uslov [2.1]:

$$\frac{U_{\text{pod}}}{U_{10\text{ kA}, 8/20\ \mu\text{s}}} = \frac{75}{39,8} = 1,9 > 1,4 \quad (2.23)$$

Potrebno je napomenuti da primena postupka prema ABB-u, datog u poglavlju 2.3.2a, dovodi do istog rezultata proračuna trajnog radnog napona odnosno naznačenog napona odvodnika (12 kV i 15 kV, respektivno).

U nastavku je isti zadatak rešen primenom programskog alata za automatizaciju izbora MOP-a [2.40-2.42]. Na Slici 2.13. prikazana je ulazna maska sa podešenim kriterijumima za izbor odvodnika prenapona, proizvodnje Siemens. Na Slikama 2.14. i 2.15. prikazani su osnovni i dodatni podaci izabranog odvodnika 3EK4 150-1CF4, respektivno.

# Izbor odvodnika prenapona

Izbor vrste odvodnika

Proizvođač:

Kućište:

Zaštita izolacije (montaža)

Faza - zemlja

Neutralna tačka - zemlja

Pomoć

Napomena:

Uputstva proizvođača

[ABB](#) [SIEMENS](#)

Naponski kriterijumi

Nazivni / najviši napon sistema:  kV

Uzemljenje sistema

Efikasno  Neefikasno

Parametri zemljospoja

Trajanje zemljospoja:

Faktor zemljospoja k=:

Dodatni privremeni prenapon

Dodatni privremeni prenapon

Trajanje priv. prenapona:

Vrednost priv. prenapona:

Sposobnost apsorpcije energije

Nazivna struja pražnjenja:  kA

Klasa rasterećenja voda:

Mehanički kriterijumi

Nivo zagađenja sredine:

Maksimalno mehaničko opterećenje vrha odvodnika:  N

Klasa zaštite od nadpritiska (nazivna struja kratkog spoja):  kA

Slika 2.13. Ulazna maska sa podešenim kriterijumima za izbor 10 kV odvodnika proizvođača Siemens

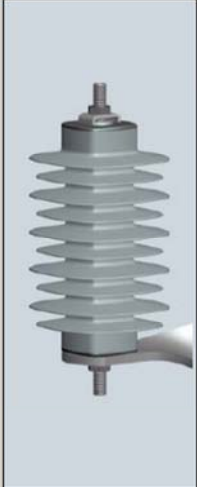
# SIEMENS

Tip

Električne karakteristike	Preostali naponi na odvodniku za date strujne impulse	Mehaničke karakteristike
Najviši napon sistema <input type="text" value="12"/> kV	<b>30/60 <math>\mu</math>s/<math>\mu</math>s</b> 0,5 kA <input type="text" value="30.6"/> kV	Klasa zaštite od nadpritiska <input type="text" value="20"/> kA
Naznačeni napon <input type="text" value="15"/> kV		<b>8/20 <math>\mu</math>s/<math>\mu</math>s</b> 5 kA <input type="text" value="37"/> kV 10 kA <input type="text" value="39.8"/> kV 20 kA <input type="text" value="45.7"/> kV
Trajni radni napon <input type="text" value="12"/> kV	Max. kratkotrajna sila na vrh odvodnika <input type="text" value="1563"/> N	
Nazivna struja pražnjenja <input type="text" value="10"/> kA	Max. kratkotrajni moment <input type="text" value="250"/> Nm	
Klasa rasterećenja voda <input type="text" value="1"/>		
Sposobnost apsorpcije energije <input type="text" value="3.5"/> kJ/kV		

Slika 2.14. Prikaz osnovnih podataka predloženog Siemensovog odvodnika 3EK4 150-1CF4 [2.43]

# SIEMENS

Podnosivi naponi izolacije kućišta	Dimenzije	Slika
Naponski talas 8/20 $\mu$ s/ $\mu$ s, suvo kućište <input type="text" value="99"/> kV	Visina (H) <input type="text" value="160"/> mm	
Napon industrijske učestanosti u trajanju od 1 min, vlažno kućište <input type="text" value="41"/> kV	Broj jedinica kućišta <input type="text" value="1"/>	
Podnosiva struja u trajanju od 2000 $\mu$ s <input type="text" value="325"/> A	Prečnik prstena za popravljanje raspodele potencijala (D) <input type="text" value="-"/> mm	
	Masa <input type="text" value="1.6"/> kg	
	Materijal kućišta <input type="text" value="Polimer"/>	
	Izvorni katalog <a href="#">Katalozi\3EK4 IEC</a>	

Slika 2.15. Prikaz dodatnih podataka predloženog Siemensovog odvodnika 3EK4 150-1CF4 [2.43]

### Primer 2.8.3

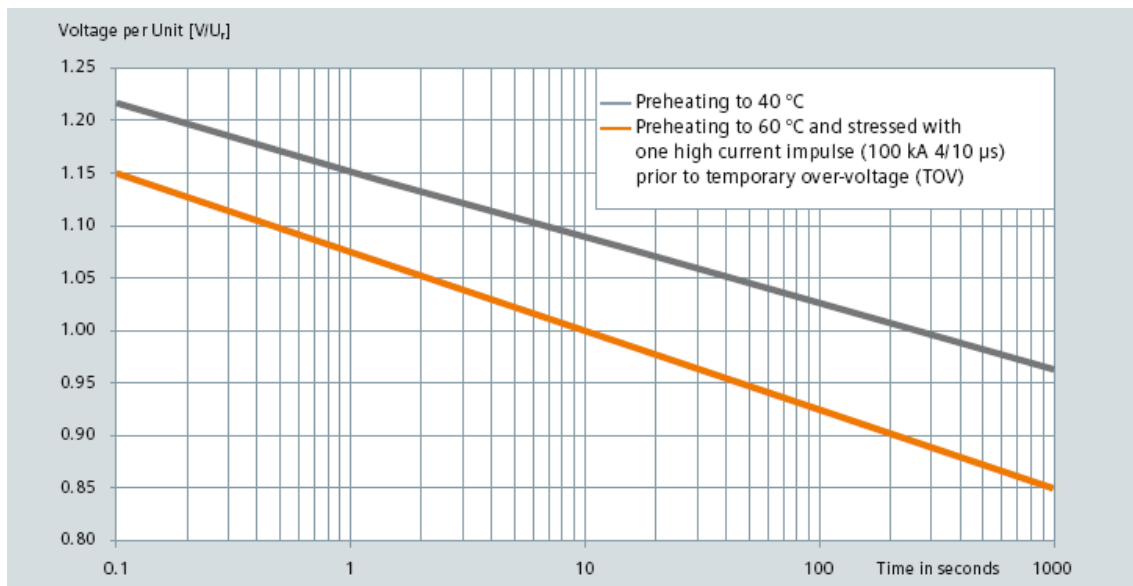
Za mrežu nazivnog napona  $U_n=10$  kV uzemljenu preko otpornika male vrednosti otpornosti preliminarno izabrati naznačeni napon odvodnika prenapona. Najviši napon sistema iznosi  $U_s=12$  kV. Odvodnik predvideti za standardne uslove rada u postrojenju sa prvim nivoom zagađenja i za montažu između faznog provodnika i zemlje. Standardni podnosivi udarni napon opreme je 75 kV. Proveriti ispunjenost zaštitnog nivoa.

Preliminarni izbor odvodnika uraditi za sledeće slučajeve:

a) Faktor zemljospoja  $K_Z$  nije definisan studijskom analizom i nije poznato trajanje zemljospoja.

b) Faktor zemljospoja  $K_Z$  nije definisan studijskom analizom, a vreme trajanja zemljospoja iznosi 3 s.

Slučajeve a) i b) uraditi za odvodnik prenapona tipa 3EK4, proizvodnje Siemens odnosno za odvodnik tipa MWK, proizvodnje ABB. Na Slici 2.16. prikazana je karakteristika podnosivog napona industrijske učestanosti u funkciji vremena za razmatran MOP tipa 3EK4 u odnosu na naznačeni napon  $U_r$  [2.43]. U Tabeli 2.12 date su karakteristike MOP-a tipa 3EK4 [2.43].



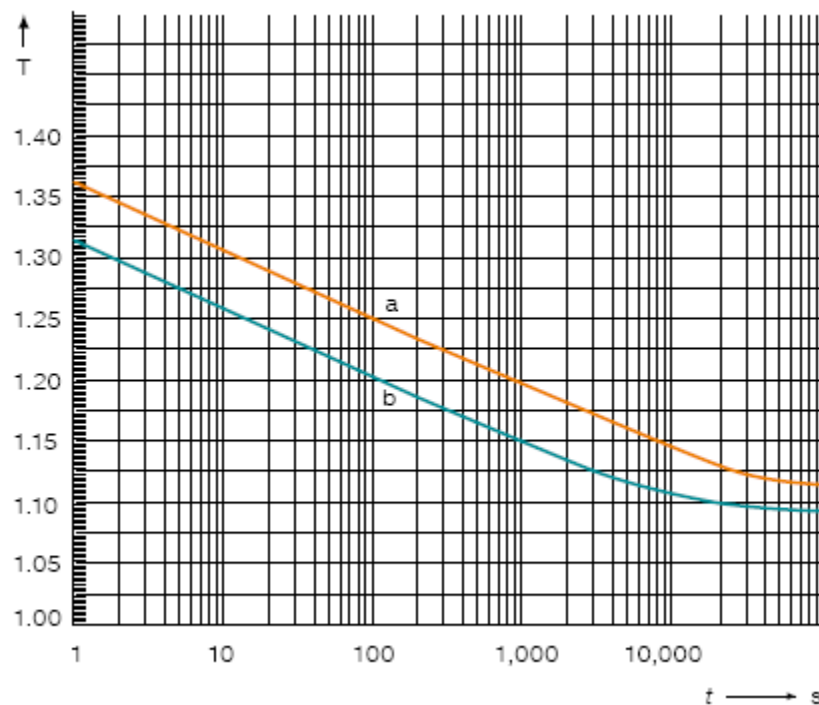
Slika 2.16. Karakteristika podnosivog napona industrijske učestanosti u funkciji vremena za MOP tipa 3EK4 u odnosu na naznačeni napon  $U_r$  [2.43]

Na Slici 2.17. data je karakteristika podnosivog napona industrijske učestanosti u funkciji vremena za MOP tipa MWK, proizvodnje ABB [2.3], u odnosu na trajni radni napon  $U_c$ ; a) Bez prethodnog opterećenja; b) Sa prethodnim opterećenjem garantovanom energijom  $W$ . U Tabeli 2.13 date su karakteristike odvodnika tipa MWK, proizvodnje ABB.



Tabela 2.12. Karakteristike MOP-a tipa 3EK4 [2.43]

Rated voltage $U_r$ [kV]	Continuous operating voltage $U_c$ [kV]	Part number	Maximum values of the residual voltages at discharge currents of the following impulses					Flashover distance [mm]	Housing insulation		Height H (see fig. 1) [mm]	Width W (see fig. 1) [mm]	Creepage distance [mm]	Net weight [kg]
			8/20 $\mu$ s 1 kA [kV]	8/20 $\mu$ s 5 kA [kV]	8/20 $\mu$ s 10 kA [kV]	8/20 $\mu$ s 20 kA [kV]	30/60 $\mu$ s 500 A [kV]		Lightning impulse withstand voltage 1.2/50 $\mu$ s [kV]	Power frequency withstand voltage 1 min., wet [kV]				
3	2.4	3EK4 030-1CB3	6.5	7.4	8.0	9.1	6.1	98	57	24	96	92	225	0.8
6	4.8	3EK4 060-1CB3	13.0	14.8	15.9	18.3	12.2	98	57	24	96	92	225	0.9
9	7.2	3EK4 090-1CC3	19.6	22.2	23.9	27.4	18.4	138	80	33	137	92	310	1.2
12	9.6	3EK4 120-1CC3	26.1	29.6	31.8	36.6	24.5	138	80	33	137	92	310	1.3
15	12.0	3EK4 150-1CF4	32.6	37.0	39.8	45.7	30.6	170	99	41	160	111	550	1.6
18	14.4	3EK4 180-1CJ4	39.1	44.4	47.7	54.9	36.7	212	123	51	204	111	690	2.0
21	16.8	3EK4 210-1CJ4	45.6	51.8	55.7	64.0	42.9	212	123	51	204	111	690	2.1
22	17.6	3EK4 220-1CJ4	47.8	54.2	58.3	67.0	44.9	212	123	51	204	111	690	2.1
24	19.2	3EK4 240-1CK4	52.2	59.1	63.6	73.1	49.0	242	140	58	234	111	820	2.3
25	20.0	3EK4 250-1CK4	54.3	61.6	66.3	76.2	51.0	242	140	58	234	111	820	2.3
27	21.6	3EK4 270-1CM4	58.7	66.5	71.6	82.3	55.1	278	161	67	270	111	960	2.7
30	24.0	3EK4 300-1CM4	65.2	73.9	79.5	91.4	61.2	278	161	67	270	111	960	2.8



Slika 2.17. Karakteristika podnosivog napona industrijske učestanosti u funkciji vremena za MOP tipa MWK, proizvodnje ABB [2.3], u odnosu na trajni radni napon  $U_c$ ; a) Bez prethodnog opterećenja; b) Sa prethodnim opterećenjem garantovanom energijom  $W$

Tabela 2.13. Karakteristike MOP-a tipa MWK, proizvodnje ABB [2.44]

$U_c$ Continuous operating voltage	$U_r$ Rated voltage	Residual voltage $U_{res}$ in kV peak at specified impulse current									
		wave 1/... $\mu$ s		wave 8/20 $\mu$ s				wave 30/60 $\mu$ s			
		5 kA peak	10 kA peak	1 kA peak	2.5 kA peak	5 kA peak	10 kA peak	20 kA peak	125 A peak	250 A peak	500 A peak
4	5.0	12.7	13.5	10.5	11.1	11.7	12.3	14.1	9.2	9.5	9.9
5	6.3	15.9	16.8	13.1	13.9	14.6	15.4	17.6	11.4	11.9	12.4
6	7.5	19.1	20.2	15.8	16.7	17.5	18.5	21.1	13.7	14.3	14.8
7	8.8	22.2	23.5	18.3	19.4	20.3	21.5	24.6	16.0	16.6	17.2
8	10.0	25.4	26.9	21.0	22.2	23.3	24.6	28.1	18.3	19.0	19.7
9	11.3	28.6	30.2	23.6	25.0	26.2	27.7	31.6	20.5	21.4	22.2
10	12.5	31.7	33.5	26.1	27.7	29.0	30.7	35.0	22.8	23.7	24.6
11	13.8	34.9	36.9	28.8	30.5	32.0	33.8	38.6	25.1	26.1	27.1
12	15.0	38.1	40.3	31.4	33.3	34.9	36.9	42.1	27.4	28.5	29.6
13	16.3	41.2	43.6	34.0	36.0	37.8	40.0	45.6	29.6	30.8	32.0
14	17.5	44.3	46.9	36.6	38.7	40.6	43.0	49.1	31.9	33.2	34.4
15	18.8	47.5	50.3	39.2	41.5	43.6	46.1	52.6	34.2	35.5	36.9
16	20.0	50.7	53.7	41.9	44.3	46.5	49.2	56.1	36.5	37.9	39.4
17	21.3	53.8	56.9	44.4	47.0	49.3	52.2	59.6	38.7	40.2	41.8
18	22.5	57.0	60.3	47.1	49.8	52.3	55.3	63.1	41.0	42.6	44.3

### Rešenje primera 2.8.3

Izbor metaloksidnog odvodnika prenapona neophodno je sprovesti tako da budu ostvareni pouzdan rad MOP-a i efikasna zaštita izolacije opreme od prenapona.

- Postupak prema Siemensu

a) Faktor zemljospoja  $K_Z$  nije definisan studijskom analizom i nije poznato trajanje zemljospoja.

S obzirom da se radi o mreži uzemljenoj preko otpornika, preliminarni izbor metaloksidnog odvodnika se preciznije može sprovesti prema postupku datom u Primeru 2.8.1, uz uvažavanje odgovarajuće vrednosti koeficijenta zemljospoja i trajanja kvara.

U prvom koraku određuje se minimalni trajni radni napon iz izraza:

$$U_{c\min} \geq 1,05 \cdot \frac{U_s}{\sqrt{3}} = 1,05 \cdot \frac{12}{\sqrt{3}} = 7,3 \text{ kV} \quad (2.24)$$

Naznačeni napon na osnovu minimalnog trajnog radnog napona je:

$$U_{r1} \geq 1,25 \cdot U_{c\min} = 1,25 \cdot 7,3 = 9,1 \text{ kV} \quad (2.25)$$

Kao što je napomenuto, vrednost 1,25 je tipična, ali je zavisna od proizvođača. Iz ovog razloga se u prospektima proizvođača obavezno navedene obe vrednosti napona  $U_c$  i  $U_r$  pa njihov izbor je neophodno zasnovati na ovim podacima datim u prospektu.

Sledi izbor naznačenog napona odvodnika prenapona  $U_{r2}$  na osnovu privremenog prenapona primenom izraza (2.1). Privremeni prenapon  $U_{TOV}$  određuje se na osnovu proizvoda faktora zemljospoja  $K_Z$  i maksimalnog radnog faznog napona sistema  $U_{mf}$ . Prema uslovu zadatka, faktor zemljospoja nije određen studijskom analizom. S obzirom da faktor zemljospoja ima vrednosti između 1,4 i 1,73 za mreže uzemljene preko impedanse, proračun će biti urađen za usvojenu vrednost  $K_Z = 1,73$  koja odgovara

izolovanoj mreži. To znači da je pretpostavljen slučaj kada naponi neoštećenih faza pri jednofaznom zemljospoju dobijaju vrednost međufaznog napona.

Što se trajanja privremenih prenapona tiče, već je napomenuto da ukoliko u mrežama uzemljenim preko otpornika nije poznato koliko traje zemljospoj, treba smatrati da vreme trajanja kvara iznosi 10 s. Potrebno je napomenuti da proračun naznačenog napona odvodnika prenapona  $U_{r2}$  za  $t=10$  s daje rezultat nešto kritičniji od stvarnog.

Koeficijent  $K_{TOV}$  određuje se na osnovu karakteristike podnosivog napona industrijske učestanosti u funkciji vremena prikazane na Slici 2.16. Ovaj koeficijent je dat u odnosu na naznačeni napon odvodnika. Gornja i donja kriva na Slici 2.16. odnose se na temperaturu od  $40^{\circ}\text{C}$  odnosno  $60^{\circ}\text{C}$  na koju je prethodno odvodnik zagrejan u trenutku nastanka privremenog prenapona. Teži uslovi odnose se na donju krivu, pa se preporučuje njeno korišćenje. U tom slučaju, vrednost koeficijenta  $K_{TOV}$  za krivu A i  $t=10$  s iznosi 1.

Naznačeni napon odvodnika prenapona  $U_{r2}$  na osnovu privremenog prenapona iznosi:

$$U_{r2} = \frac{U_{TOV}}{K_{TOV}} = \frac{K_Z \cdot \frac{U_s}{\sqrt{3}}}{K_{TOV,10s}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 12}{1} = 12 \text{ kV} \quad (2.26)$$

Završni korak u izboru naznačenog napona odvodnika svodi se na izbor naznačenog napona na osnovu najvišeg naznačenog napona odvodnika između  $U_{r1}$  i  $U_{r2}$ :

$$U_r \geq \max(U_{r1}, U_{r2}) = \max(9,1, 12) = 12 \text{ kV} \quad (2.27)$$

Na osnovu prikazanih odvodnika u prospektu proizvođača (Tabela 2.12), a na preporuku proizvođača, izabran je prvi odvodnik većeg naznačenog napona od napona proračunatog primenom (2.27). Prema Tabeli 2.11 usvojena je vrednost od  $U_r=15$  kV, dok je trajni radni napon  $U_c=12$  kV. Može se zaključiti da odabran odvodnik odgovara prethodnom Primeru 2.8.2, odnosno odvodnik je odabran kao da je mreža izolovana.

Podaci odgovaraju odvodniku tipa 3EK4 150-1CF4, proizvodnje Siemens. Prema uslovu zadatka standardni podnosivi udarni napon opreme iznosi 75 kV. Odvodnik omogućava odgovarajući zaštitni nivo s obzirom da je ispunjen uslov:

$$\frac{U_{pod}}{U_{10kA,8/20\mu s}} = \frac{75}{39,8} = 1,9 > 1,4 \quad (2.28)$$

b) Faktor zemljospoja  $K_Z$  nije definisan studijskom analizom, a vreme trajanja zemljospoja iznosi 3 s.

U prvom koraku određuje se minimalni trajni radni napon iz izraza:

$$U_{cmin} \geq 1,05 \cdot \frac{U_s}{\sqrt{3}} = 1,05 \cdot \frac{12}{\sqrt{3}} = 7,3 \text{ kV} \quad (2.29)$$

Naznačeni napon na osnovu minimalnog trajnog radnog napona je:

$$U_{r1} \geq 1,25 \cdot U_{cmin} = 1,25 \cdot 7,3 = 9,1 \text{ kV} \quad (2.30)$$

Sledi izbor naznačenog napona odvodnika prenapona  $U_{r2}$  na osnovu privremenog prenapona primenom izraza (2.1). Prema uslovu zadatka, faktor zemljospoja nije određen studijskom analizom. S obzirom da faktor zemljospoja ima vrednosti između 1,4 i 1,73 za mreže uzemljene preko impedanse proračun će biti urađen za usvojenu vrednost  $K_Z=1,73$  koja odgovara izolovanoj mreži. To znači da je pretpostavljen slučaj kada naponi neoštećenih faza pri jednofaznom zemljospoju dobijaju vrednost međufaznog napona.

Pretpostavljeno vreme trajanja kvara iznosi 3 s. Na osnovu dijagrama na Slici 2.16, za trajanje prenapona od 3 s i donju krivu, koeficijent  $K_{TOV}$  ima vrednost 1,04.

Naznačeni napon odvodnika prenapona  $U_{r2}$  na osnovu privremenog prenapona iznosi:

$$U_{r2} = \frac{U_{TOV}}{K_{TOV}} = \frac{K_Z \cdot \frac{U_s}{\sqrt{3}}}{K_{TOV,3s}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 12}{1,04} = 11,5 \text{ kV} \quad (2.31)$$

Završni korak u izboru naznačenog napona odvodnika svodi se na izbor naznačenog napona na osnovu najvišeg naznačenog napona odvodnika između  $U_{r1}$  i  $U_{r2}$ :

$$U_r \geq \max(U_{r1}, U_{r2}) = \max(9,1, 11,5) = 11,5 \text{ kV} \quad (2.32)$$

Na osnovu relacije (2.32) i kataloga datog u Tabeli 2.12 zaključuje se da je moguće izabrati odvodnik prenapona naznačenog napona  $U_r=12$  kV kome odgovara trajni radni napon  $U_c=9,6$  kV (odvodnik tipa 3EK4 120-1CC3) ili, na preporuku proizvođača, odvodnik prenapona naznačenog napona  $U_r=15$  kV kome odgovara trajni radni napon  $U_c=12$  kV (odvodnik tipa 3EK4 150-1CF4). Iz razloga sigurnosti u preliminarnom izboru odvodnika odabran je odvodnik tipa 3EK4 150-1CF4.

Prema uslovu zadatka standardni podnosivi udarni napon opreme iznosi 75 kV. Odvodnik omogućava odgovarajući zaštitni nivo s obzirom da je ispunjen uslov:

$$\frac{U_{pod}}{U_{10kA,8/20\mu s}} = \frac{75}{39,8} = 1,9 > 1,4 \quad (2.33)$$

- Postupak prema ABB-u

a) Faktor zemljospoja  $K_Z$  nije definisan studijskom analizom i nije poznato trajanje zemljospoja.

S obzirom da faktor zemljospoja  $K_Z$  nije definisan studijskom analizom, mogući su slučajevi opisani u poglavljima 2.3.2d i 2.3.1e. Prema poglavlju 2.3.2.d sistem je uzemljen preko otpornika male vrednosti otpornosti koji nema ravnomerno vrednost  $K_Z \leq 1,4$ , i u tom slučaju trajni radni napon  $U_c$  određuje se primenom relacije (2.11):

$$U_c \geq \frac{U_s}{K_{TOVc}} \quad (2.34)$$

gde je  $K_{TOVc}$  – koeficijent podnošenja privremenih prenapona u odnosu na trajni radni napon  $U_c$ . S obzirom da nije poznato trajanje zemljospoja, ovaj faktor određuje se za trajanje od 10 s, a na osnovu Slike 2.17, kriva b). Njegova vrednost iznosi  $K_{TOVc}=1,26$ .

Trajni radni napon  $U_c$  je:

$$U_c \geq \frac{U_s}{K_{TOVc}} = \frac{12}{1,26} = 9,5 \text{ kV} \quad (2.35)$$

Ako je struja kvara mala, pa nema automatskog isključenja, trajni radni napon odvodnika prenapona se, umesto primenom (2.34), određuje iz izraza:

$$U_c \geq U_s \quad (2.36)$$

što daje:

$$U_c \geq 12 \text{ kV} \quad (2.37)$$

Za usvojenu vrednost trajnog radnog napona  $U_c=12$  kV, prema Tabeli 2.13, dobija se naznačeni napon  $U_r=15$  kV.

Izabrani odvodnik omogućava odgovarajući zaštitni nivo s obzirom da je ispunjen uslov:

$$\frac{U_{pod}}{U_{10kA,8/20\mu s}} = \frac{75}{36,9} = 2 > 1,4 \quad (2.38)$$

Prema poglavlju 2.3.2.e sistem je uzemljen preko otpornika male vrednosti otpornosti za  $K_Z > 1,4$ , i u tom slučaju trajni radni napon  $U_c$  određuje se primenom relacije (2.13):

$$U_c \geq \frac{1,05 \cdot U_s}{K_{TOVc}} = \frac{1,05 \cdot 12}{1,26} = 10 \text{ kV} \quad (2.39)$$

Na osnovu usvojene vrednosti trajnog radnog napona  $U_c$  bira se, prema Tabeli 2.13, odgovarajuća vrednost naznačenog napona  $U_r$  i proverava zaštitni nivo.

b) Faktor zemljospoja  $K_Z$  nije definisan studijskom analizom, a vreme trajanja zemljospoja iznosi 3 s.

S obzirom da faktor zemljospoja  $K_Z$  nije definisan studijskom analizom, mogući su slučajevi opisani u poglavljima 2.3.2d i 2.3.1e. Prema poglavlju 2.3.2.d sistem je uzemljen preko otpornika male vrednosti otpornosti koji nema ravnomerno vrednost  $K_Z \leq 1,4$ , i u tom slučaju trajni radni napon  $U_c$  određuje se primenom relacije (2.11):

$$U_c \geq \frac{U_s}{K_{TOVc}} \quad (2.40)$$

gde je  $K_{TOVc}$  – koeficijent podnošenja privremenih prenapona u odnosu na trajni radni napon  $U_c$ . S obzirom da je trajanje zemljospoja 3 s, na osnovu Slike 2.17, kriva b) određuje se  $K_{TOVc} = 1,28$ .

Trajni radni napon  $U_c$  je:

$$U_c \geq \frac{U_s}{K_{TOVc}} = \frac{12}{1,28} = 9,4 \text{ kV} \quad (2.41)$$

Ako je struja kvara mala, pa nema automatskog isključenja, trajni radni napon odvodnika prenapona se, umesto primenom (2.40), određuje iz izraza:

$$U_c \geq U_s \quad (2.42)$$

što daje:

$$U_c \geq 12 \text{ kV} \quad (2.43)$$

Za usvojenu vrednost trajnog radnog napona  $U_c = 12 \text{ kV}$ , prema Tabeli 2.13, dobija se naznačeni napon  $U_r = 15 \text{ kV}$ .

Izabrani odvodnik omogućava odgovarajući zaštitni nivo s obzirom da je ispunjen uslov:

$$\frac{U_{pod}}{U_{10kA,8/20\mu s}} = \frac{75}{36,9} = 2 > 1,4 \quad (2.44)$$

Prema poglavlju 2.3.2.e sistem je uzemljen preko otpornika male vrednosti otpornosti za  $K_Z > 1,4$ , i u tom slučaju trajni radni napon  $U_c$  određuje se primenom relacije (2.13):

$$U_c \geq \frac{1,05 \cdot U_s}{K_{TOVc}} = \frac{1,05 \cdot 12}{1,28} = 9,8 \text{ kV} \quad (2.45)$$

Na osnovu usvojene vrednosti trajnog radnog napona  $U_c$  bira se, prema Tabeli 2.13, odgovarajuća vrednost naznačenog napona  $U_r$  i proverava zaštitni nivo.

## 1.9. Zaključci

Na osnovu rezultata prikazanih u Primerima 2.8.1-2.8.3 mogu se izvesti sledeći zaključci:

1. Proračun naznačenog napona MOP-a bitno zavisi od načina uzemljenja neutralne tačke sistema i podešenja relejne zaštite.
2. Različiti proizvođači definišu donekle različite postupke za proračun naznačenog napona MOP-a. Ako je izabran tip odvodnika prenapona jednog proizvođača, svrsishodno je primeniti postupak predložen od strane izabranog proizvođača.
3. Naznačeni napon MOP-a može imati različite vrednosti za jedan isti tip odvodnika prenapona jednog proizvođača, a u zavisnosti od izabrane klase odvodnika odnosno sposobnosti podnošenja privremenih prenapona.
4. Naznačeni napon MOP-a za razmatran sistem može se najpreciznije izračunati na osnovu poznatog, analizom utvrđenog, faktora zemljospoja i tačnog poznavanja trajanja zemljospoja na osnovu podešenja relejne zaštite. U tom slučaju koeficijent  $K_{TOV}$  očitava se za određenu vrednost privremenih prenapona i poznato trajanje zemljospoja.
5. U slučaju nepoznavanja faktora zemljospoja i trajanja kvara, preliminarni izbor odvodnika prenapona vrši se na osnovu najkritičnijih uslova (pretpostavljena najviša vrednost koeficijenta zemljospoja  $K_Z$  za dati način uzemljenja neutralne tačke sistema i trajanje kvara  $t=10$  s, što je duže od vremena u realnim sistemima). Ovakav postupak proračuna dovodi do kritičnog izbora MOP-a. Posebno se mora imati u vidu da predlog za izbor odvodnika projektant radi u postupku javnih nabavki, što znači da nije unapred poznat proizvođač odvodnika, tip odvodnika, njegove karakteristike, a često ni trajanje kvara, što su razlozi za preliminarni kritični izbor. Nakon izbora proizvođača odvodnika i odgovarajućeg tipa neophodno je sprovesti detaljan postupak proračuna i proveru ispunjenosti odgovarajućih uslova sa ciljem ostvarivanja pouzdanog rada MOP-a i efikasne zaštite izolacije opreme od prenapona.

## 1.10. Odvodnici prenapona za zaštitu neutralne tačke transformatora

Osnovna primena odvodnika prenapona odnosi se na zaštitu fazne izolacije opreme što se postiže postavljanjem odvodnika između faznog provodnika i zemlje. Pored ove uobičajene primene, postoje i specijalne primene odvodnika prenapona. Prema [2.3], specijalna primena odnosi se na postavljanje odvodnika između faznih provodnika (u vidu rasporeda sa 6 odvodnika ili u vidu tzv. sprege Neptun) ili odvodnika prenapona za zaštitu neutralne tačke transformatora. Postoje i specijalne primene odvodnika prenapona za zaštitu od prenapona u specifičnim sistemima kao što su železnice, na primer.

U projektovanju zaštite distributivnih i prenosnih mreža od prenapona najčešće su sledeće dve primene odvodnika:

- za zaštitu fazne izolacije opreme, što se postiže postavljanjem odvodnika između faznog provodnika i zemlje; njihov izbor razmatran je detaljno u prethodnim poglavljima.

- za zaštitu neutralne tačke transformatora.

U nastavku date su smernice za izbor odvodnika prenapona za zaštitu neutralne tačke transformatora. Prema [2.5], svaki neuzemljeni neutralni priključak transformatora, koji je izveden iz kazana pomoću prolaznog izolatora, potrebno je zaštititi odvodnikom od sklopnih i atmosferskih prenapona. Izolacija neutralne tačke u suprotnom može biti preopterećena u slučaju nailaska atmosferskih prenapona po više faza, kao i usled sklopnih prenapona pri nesimetričnim kvarovima. Predlaže se upotreba odvodnika koji poseduju iste ili niže vrednosti zaštitnih nivoa od odvodnika postavljenih između faznog provodnika i zemlje. Pri tome može se odabrati niži naznačeni napon ovih odvodnika s obzirom da je napon između neutralne tačke i zemlje niži. Preporučuje se naznačeni napon čija vrednost iznosi najmanje 60% vrednosti naznačenog napona odvodnika postavljenih između faznog provodnika i zemlje.

U nastavku su date smernice za izbor trajnog radnog napona odvodnika prenapona za zaštitu neutralne tačke transformatora prema ABB-u [2.3]. Prema smernicama, koje se odnose na odvodnike u srednjenaponskim mrežama, bira se trajni radni napon  $U_{cn}$ , a na osnovu njegove vrednosti i kataloških podataka, sledi odgovarajući naznačeni napon odvodnika  $U_{rn}$ .

Trajni radni napon  $U_{cn}$  odvodnika prenapona za zaštitu neutralne tačke transformatora određuje se u zavisnosti od načina uzemljenja neutralne tačke sistema [2.3]:

- a) Izolovan ili rezonantno uzemljen sistem

$$U_{cn} \geq \frac{U_s}{\sqrt{3}} \quad (2.46)$$

- b) Sistem uzemljen preko otpornika velike vrednosti otpornosti

$$U_{cn} \geq \frac{U_s}{K_{TOVc} \cdot \sqrt{3}} \quad (2.47)$$

gde je  $K_{TOVc}$  – koeficijent podnošenja privremenih prenapona u odnosu na trajni radni napon  $U_{cn}$ .

Sposobnost apsorpcije energije ovih odvodnika treba da bude ista ili veća od one zahtevane za odvodnike postavljene između faznog provodnika i zemlje.

Ostali slučajevi nisu razmatrani u uputstvima proizvođača.

### **Primer 2.10.1**

Za izolovanu mrežu nazivnog napona  $U_n=35$  kV preliminarno izabrati naznačeni napon metaloksidnog odvodnika prenapona za zaštitu neutralne tačke transformatora tipa PEXLIM, proizvodnje ABB. Najviši napon sistema iznosi  $U_s=38$  kV. Pretpostaviti da je trajanje zemljospoja u ovoj mreži duže od 30 min.

### **Rešenje primera 2.10.1**

Trajni radni napon odvodnika prenapona za zaštitu neutralne tačke transformatora biće određen primenom izraza (2.46):

$$U_{cn} \geq \frac{U_s}{\sqrt{3}} = \frac{38}{\sqrt{3}} = 22 \text{ kV} \quad (2.48)$$

U Tabeli 2.14. prikazane su karakteristike razmatranog tipa odvodnika PEXLIM [2.2]. Na osnovu kataloških podataka prikazanih u Tabeli 2.14 izabran je odvodnik čiji trajni radni napon iznosi  $U_{cn}=24$  kV. Odgovarajući naznačeni napon  $U_{rn}$  ima vrednost 30 kV.

Napomena: Trajni radni napon odvodnika prenapona za zaštitu fazne izolacije određuje se u ovom slučaju (slučaj izolovane mreže) iz izraza (2.8):

$$U_c \geq U_s = 38 \text{ kV} \quad (2.49)$$

Na osnovu kataloških podataka prikazanih u Tabeli 2.14 bio bi izabran odvodnik čiji trajni radni napon iznosi  $U_c=38 \text{ kV}$ . Odgovarajući naznačeni napon  $U_r$  ima vrednost  $48 \text{ kV}$ .

Iz izraza:

$$\frac{U_{rn}}{U_r} \cdot 100 = \frac{30}{48} \cdot 100 = 62,5\% \quad (2.50)$$

može se zaključiti da je ostvarena preporuka da naznačeni napon odvodnika za zaštitu neutralne tačke  $U_m$  iznosi najmanje 60% vrednosti naznačenog napona odvodnika za zaštitu fazne izolacije  $U_r$ .

Tabela 2.14. Karakteristike MOP-a tipa PEXLIM R [2.2]

## PEXLIM R

Guaranteed protective data 24 - 100 kV

Max. system voltage	Rated voltage	Max. continuous operating voltage <sup>1)</sup>		TOV capability <sup>2)</sup>		Max. residual voltage with current wave						
		as per IEC	as per ANSI/IEEE	1 s	10 s	30/60 $\mu$ s			8/20 $\mu$ s			
		$U_c$	MCOV			0.5 kA	1 kA	2 kA	5 kA	10 kA	20 kA	40 kA
$U_m$	$U_r$	$U_c$	MCOV	1 s	10 s	0.5 kA	1 kA	2 kA	5 kA	10 kA	20 kA	40 kA
kV <sub>rms</sub>	kV <sub>rms</sub>	kV <sub>rms</sub>	kV <sub>rms</sub>	kV <sub>rms</sub>	kV <sub>rms</sub>	kV <sub>peak</sub>	kV <sub>peak</sub>	kV <sub>peak</sub>	kV <sub>peak</sub>	kV <sub>peak</sub>	kV <sub>peak</sub>	kV <sub>peak</sub>
24 <sup>3)</sup>	18	14.4	15.3	20.7	19.8	37.1	38.5	40.3	44.0	46.7	52.3	59.7
	21	16.8	17.0	24.1	23.1	43.2	44.9	47.0	51.3	54.4	61.0	69.7
	24	19.2	19.5	27.6	26.4	49.4	51.3	53.8	58.7	62.2	69.7	79.6
	27	21.6	22.0	31.0	29.7	55.6	57.7	60.5	66.0	70.0	78.4	89.6
36 <sup>3)</sup>	30	24.0	24.4	34.5	33.0	61.7	64.2	67.2	73.3	77.7	87.1	100
	33	26.4	26.7	37.9	36.3	67.9	70.6	73.9	80.6	85.5	95.8	110
	36	28.8	29.0	41.4	39.6	74.1	77.0	80.6	88.0	93.3	105	120
	39	31.2	31.5	44.8	42.9	80.3	83.4	87.3	95.3	102	114	130
	42	34	34.0	48.3	46.2	86.4	89.8	94.0	103	109	122	140
	48	38	39.0	55.2	52.8	98.8	103	108	118	125	140	160